

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**“ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I”
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Факультет «Промышленное и гражданское строительство»
Кафедра «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1
по дисциплине «Основы гидравлики»

с методическими указаниями

для студентов, обучающихся по специальности
23.05.01 Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и
оборудование

заочная форма обучения

Санкт-Петербург, 2022

Общие указания

В настоящих методических указаниях приведены задания Контрольной работы № 1 с примерами их решения по дисциплине «Основы гидравлики» для студентов заочной формы обучения, обучающихся по дисциплине: 23.05.01 Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование.

Для каждой задачи дано по тридцать вариантов цифровых исходных данных. Номер варианта задан преподавателем в папке с исходными данными (обычно по последним двум цифрам шифра - номера зачётной книжки).

При выполнении заданий необходимо соблюдать следующие требования:

1. Работа пишется от руки чернилами в тетрадке в клетку/линейку 24-48 листов. Страницы должны быть пронумерованы. Графики выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в тетрадку.
2. Для КАЖДОЙ задачи необходимо написать: ФИО, номер шифра (или № варианта), № задачи, все исходные данные + исходный рисунок к задаче. Решение вести с пояснением каждого хода решения. В конце написать ответ.
3. Перед вычислением искомых величин следует вначале написать исходную формулу в буквенном выражении, дать пояснение всем входящим в нее параметрам, затем представить их численные значения с единицами измерения и привести окончательный ответ.
4. У всех размерных величин должна быть поставлена размерность в Международной системе единиц СИ. При решении задач необходимо строго следить за соблюдением единства размерностей величин, входящих в ту или иную расчетную зависимость.
5. Значение всех коэффициентов следует обосновать ссылкой на литературу.
6. Все ошибки, отмеченные преподавателем, должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа, либо корректором непосредственно в тексте. В сдо.пгупс.ру все исправления выкладываются отдельным файлом.

До начала сессии задачи с решениями можно отправлять на проверку в sdo.pgups.ru в виде скана, который необходимо разместить в задания Контрольной работы № 1 (Типовая задача № 4 – в задании **КР-1 Задача № 4**, Типовая задача № 1.2 – в задании **КР-1 Задача № 1.2** и так далее). После того, как вы разместите решение, необходимо написать преподавателю в личные сообщения письмо о том, что и куда вы разместили. Если задача решена верно, то появится оценка «зачтено», если будут замечания по решению – то они будут написаны в комментариях к задаче.

Одна задача = один файл в формате *.pdf (наименование файла **Задача № _ ФИО_шифр.pdf**, например, **Задача_1.1_Иванов А.А._07-001-13.pdf**).

Тетрадь с решёнными задачами необходимо привезти с собой на сессию (сдаётся в архив), либо прислать по почте на адрес кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика». Только после этого оценка вносится в зачётную книжку.

Методические указания разработала к.т.н., доцент Русанова Е. В.

Оглавление

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 1 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ»	4
Задача 1.1.	4
Задача 1.2.	7
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 2 «РАСЧЕТ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ»	13
Задача 2.1. «Расчет силы гидростатического давления на плоскую поверхность»	13
Задача 2.2. «Расчет силы гидростатического давления на криволинейную вертикальную поверхность»	18
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 3 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СТенок ТРУБОПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ»	24
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»	28
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»	31
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.3. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»	35
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 5.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТРУБОПРОВОДЕ»	38
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 5.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ»	41
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 6 «РАСЧЁТ КОРОТКИХ ТРУБОПРОВОДОВ»	45
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 7 «ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР»	61
ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 8 «РАСЧЁТ ТРУБЫ В НАСЫПИ»	68
Приложение 1	72
Приложение 2	72
Приложение 3	72
Приложение 4	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	74

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 1 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ»

Задача 1.1.

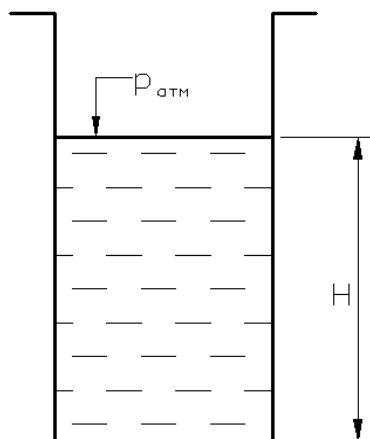


Рис.1

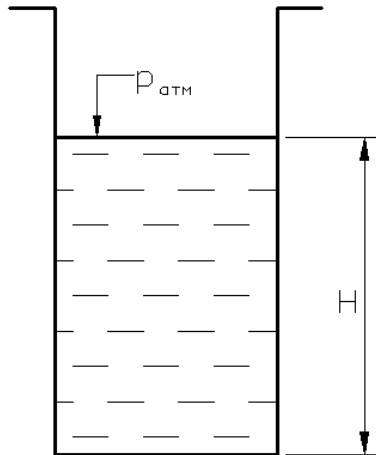
Открытый резервуар заполнен жидкостью (рис.1) до глубины H . Найти избыточное и абсолютное гидростатическое давление на дне резервуара. Данные для расчета приведены в табл.1.1. Плотности жидкостей приведены в Приложении 1.

Табл.1.1.

Вариант	1	2	3	4	5
Жидкость	вода	керосин	серная к-та	скипидар	нефть
H , м	50	5,5	0,4	0,5	3,0
Вариант	6	7	8	9	10
Жидкость	морск.вода	р-р глицерина	бензин	сливки 60%	ртуть
H , м	10	0,4	2,0	0,15	0,2
Вариант	11	12	13	14	15
Жидкость	спирт этил.	мёд	подс. масло	масло каст.	молоко
H , м	1,0	0,1	0,3	0,3	2,7
Вариант	16	17	18	19	20
Жидкость	эфир	мазут	масло маш.	воск	спирт
H , м	0,1	12	0,56	0,05	3,5
Вариант	21	22	23	24	25
Жидкость	масло льняное	масло персиковое	масло тыквенное	масло кунжутное	масло лавровое
H , м	1,0	0,10	0,6	0,25	0,07
Вариант	26	27	28	29	30
Жидкость	жидкое олово	стеарин хл.	масло соевое	масло какао	молоко цельн.
H , м	0,3	0,45	0,23	1,0	2,5

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

Задача 1.1.



Открытый резервуар заполнен жидкостью до глубины H . На плоскость действует атмосферное давление.

Найти: избыточное и абсолютное давление на дне резервуара. Данные для расчета приведены в табл.

Табл. Данные для расчёта задачи 1.1.

Вариант	0
Жидкость	МОЛОКО
H , м	1,5

Ход решения задачи

Избыточное давление можно найти по **основному уравнению гидростатики**:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h,$$

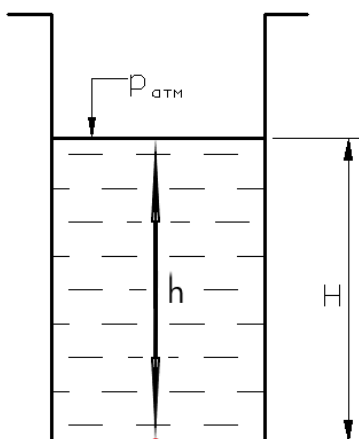
где p – давление в точке, которое надо найти, [Па];

p_0 – избыточное давление, которое действует на свободную плоскость жидкости, [Па];

ρ – плотность жидкости, [кг/м³];

g – ускорение свободного падения [м/с²]

h – заглубление точки под свободной плоскостью жидкости, [м]



Для примера будут следующие исходные данные:

- так как резервуар открыт, то на свободную плоскость действует атмосферное давление, избыточное давление при этом равно нулю $p_0 = 0$ Па
- плотность жидкости берём по Приложению 1: для молока $\rho = 1027$ кг/м³
- ускорение свободного падения для Санкт-Петербурга $g = 9,82$ м/с²
- заглубление заданной точки (дно резервуара) равно глубине резервуара, которая задана в исходных данных, т.е. $h = H = 1,5$ м

Таким образом, для данного примера избыточное давление на дне резервуара будет равно:

изб. $p_{\text{дно}} = p_0 + \rho \cdot g \cdot h = 0 + 1027 \cdot 9,82 \cdot 1,5 = 15\,128$ [Па]

Абсолютное давление – давление, подсчитанное по основному уравнению гидростатики с учётом атмосферного давления:

$$p^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

Атмосферное давление можно подсчитать по формуле:

$$p_{\text{атм.}} = \rho_{\text{рт.}} \cdot g \cdot h_{\text{рт.}} \text{ [Па]}$$

$\rho_{\text{рт.}}$ – плотность ртути ($\rho_{\text{рт.}} = 13\,600 \text{ кг/м}^3$);

g – ускорение свободного падения (для Санкт-Петербурга $g = 9,82 \text{ м/с}^2$);

$h_{\text{рт.}}$ – метры ртутного столба (данные берутся по прогнозу погоды), например, во вторник 09.02.2021 по прогнозу погоды $h_{\text{рт.}} = 784 \text{ мм рт.ст.}$, то есть это будет 0,784 м рт.ст.

Таким образом, атмосферное давление на этот момент будет составлять

атм. $p_{\text{атм.}} = \rho_{\text{рт.}} \cdot g \cdot h_{\text{рт.}} = 13\,600 \cdot 9,82 \cdot 0,784 = \underline{104\,705} \text{ Па}$

ВНИМАНИЕ!

При решении данной задачи значение атмосферного давления $h_{\text{рт.}}$, мм рт.ст., вы берёте по прогнозу погоды в момент решения задачи с указанием даты.

Для данного примера абсолютное давление на дне резервуара будет равно:

абс. $p_{\text{дно}}^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h = 104\,705 + 0 + 1027 \cdot 9,82 \cdot 1,5 =$
 $= 104\,705 + 15\,128 = 119\,833 \text{ [Па]}$

Ответ: $p_{\text{дно}} = 15,1 \text{ кПа}$; $p_{\text{дно}}^{\text{абс.}} = 119,8 \text{ КПа}$

Задача 1.2.

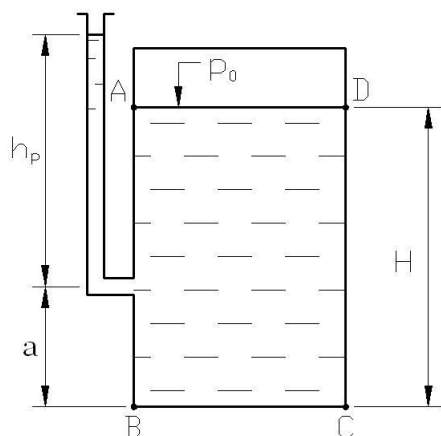


Рис.2

Закрытый прямоугольный резервуар заполнен жидкостью до глубины H (рис.2). Задаются плотность жидкости ρ , избыточное давление на поверхности p_0 (см. табл.1.2.).

Определить:

- 1) высоту жидкости в пьезометре h_p ;
- 2) избыточное и абсолютное давление в точках, указанных в табл.2.
- 3) построить эпюру ГСД на плоскость, указанную в таблице

Табл.1.2.

Вариант	1	2	3	4	5	6
Плотность, кг/м ³	500	600	700	800	900	1000
p_0 , кПа	80	75	70	65	60	55
H , м	10	2	1	12	9	5
a , м	5	0,5	0,3	6	4,5	2
точки	AB	BC	CD	BA	CB	DC

Вариант	7	8	9	10	11	12
Плотность, кг/м ³	1100	1200	1300	1400	1500	1600
p_0 , кПа	50	45	40	35	30	25
H , м	10	2,5	0,95	2	1,5	6
a , м	5	0,2	0,25	1	1,0	4
точки	AB	BC	CD	BA	CB	DC

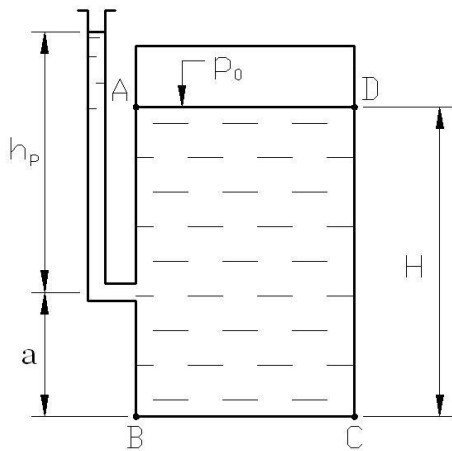
Вариант	13	14	15	16	17	18
Плотность, кг/м ³	1700	1800	1900	2000	2100	2200
p_0 , кПа	20	15	10	5	85	90
H , м	15	6	11	1,3	4	3
a , м	5	3	6	1,2	2	1,5
точки	AB	BC	CD	BA	CB	DC

Вариант	19	20	21	22	23	24
Плотность, кг/м ³	2300	2400	2500	2600	2700	2800
p_0 , кПа	52	46	41	37	28	22
H , м	6	4	3,5	0,75	2	0,5
a , м	5	1	2,5	0,25	1	0,3
точки	AB	BC	CD	BA	CB	DC

Вариант	25	26	27	28	29	30
Плотность, кг/м ³	2900	3000	3100	3200	3300	3400
p_0 , кПа	18	13	11	8	4	2
H , м	6	4	3,5	0,75	2	0,5
a , м	5	1	2,5	0,25	1	0,3
точки	AB	BC	CD	BA	CB	DC

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

Задача 1.2.



Закрытый прямоугольный резервуар заполнен жидкостью до глубины H . Давление на поверхности жидкости в резервуаре p_0 , плотность жидкости ρ , (см. табл.).

Определить:

- 1) высоту жидкости в пьезометре h_p ;
- 2) избыточное и абсолютное давление в точках, указанных в табл.2.
- 3) Построить эпюру ГСД на плоскости, указанную в табл.

Табл. Данные для расчёта задачи 1.2

Вариант	0
Плотность, кг/м ³	500
p_0 , кПа	25
H , м	3,0
a , м	1,9
точки	ABDC

Ход решения задачи

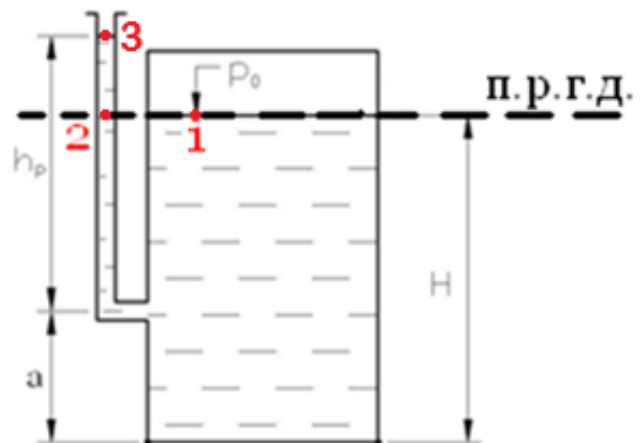
1) Определить: высоту воды в пьезометре h_p

Так как резервуар и пьезометр являются сообщающимися сосудами, которые заполнены одной и той же жидкостью, то для нахождения уровня жидкости в пьезометре необходимо провести п.р.г.д по уровню жидкости в резервуаре.

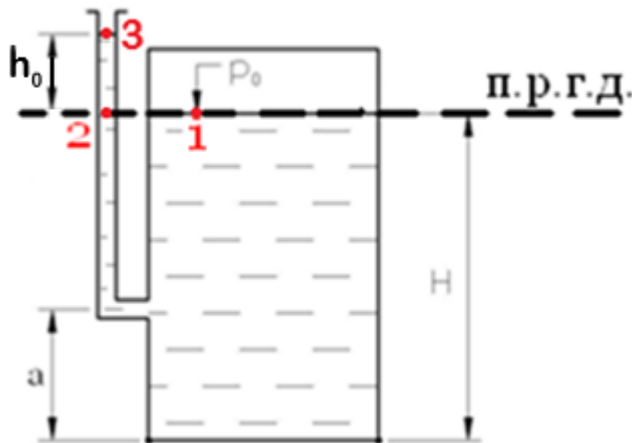
п.р.г.д. – плоскость равного гидростатического давления – это такая плоскость, в каждой точке которой гидростатическое давление одинаково. Обычно п.р.г.д. представляет собой семейство горизонтальных поверхностей.

Поставим точки:

- точка (.) 1 – на поверхности жидкости в резервуаре;
- точка (.) 2 – в пьезометре;
- точка (.) 3 – на поверхности жидкости в пьезометре.



Согласно определению п.р.г.д. гидростатическое давление в этих точках будет одинаково, то есть: $p_2 = p_1 = p_0 = 25\ 000\ \text{Па}$



Из основного уравнения гидростатики высота столба жидкости h_0 (от точки 2 до уровня воды в пьезометре 3) будет равна:

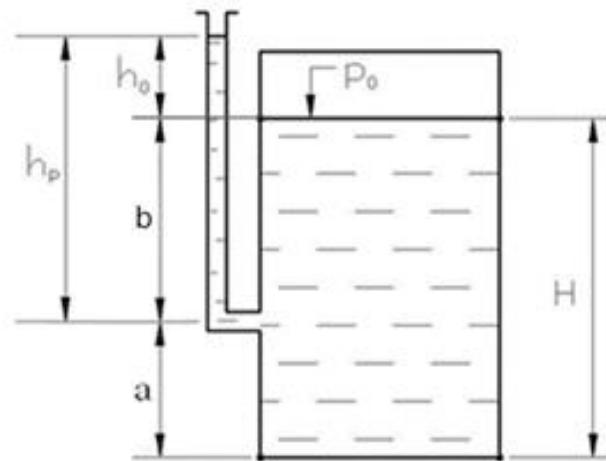
$$p_2 = p_3 + \rho \cdot g \cdot h_{2-3} = 0 \text{ (т.к. пьезометр открыт } p_3 = 0) + \rho \cdot g \cdot h_0 \text{ (из рисунка } h_{2-3} = h_0) = \rho \cdot g \cdot h_0,$$

т.е. $p_2 = \rho \cdot g \cdot h_0$, откуда

$$h_0 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} = \frac{25\,000}{500 \cdot 9,82} = 5,09 \text{ м}$$

Тогда высота воды в пьезометре будет равна:

$$h_p = h_0 + b = h_0 + (H - a) = 5,09 + (3,0 - 1,9) = 6,19 \text{ м}$$



Ответ: $h_p = 6,19 \text{ м}$

2) Определить избыточное и абсолютное давление в точках, указанных в табл.2. – А, В, С, D

Избыточное давление можно найти по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h,$$

где p – давление в данной точке, которое надо найти [Па];

p_0 – избыточное давление, которое действует на свободную плоскость жидкости в резервуаре [Па] (задано в исходных данных) $p_0 = 25\,000 \text{ Па}$;

ρ – плотность жидкости, [кг/м³] (задана в исходных данных) $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$;

g – ускорение свободного падения (для Санкт-Петербурга $g = 9,82 \text{ м/с}^2$);

h – глубина рассматриваемой точки относительно свободной поверхности [м].

т.к. точка А находится на поверхности жидкости, то $h_A = 0 \text{ м}$

т.к. точка В находится на дне резервуара, то $h_B = H = 3,0 \text{ м}$

т.к. точка С находится на дне резервуара, то $h_C = H = 3,0 \text{ м}$

т.к. точка D находится на поверхности жидкости, то $h_D = 0 \text{ м}$

изб.

для (.) А:

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_A = 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 0 = 25\,000 + 0 = 25\,000 \text{ Па}$$

для (.) В:

$$p_B = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_B = 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 3,0 = 25\,000 + 14\,730 = 39\,730 \text{ Па}$$

для (.) С:

$$p_C = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_C = 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 3,0 = 25\,000 + 14\,730 = 39\,730 \text{ Па}$$

для (.) D:

$$p_D = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_D = 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 0 = 25\,000 + 0 = 25\,000 \text{ Па}$$

Абсолютное давление – давление, подсчитанное по основному уравнению гидростатики с учётом атмосферного давления:

$$p^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

Величина атмосферного давления была подсчитана в предыдущей задаче 1.1:

$$p_{\text{атм.}} = \rho_{\text{рт.}} \cdot g \cdot h_{\text{рт.}} = 13\,600 \cdot 9,82 \cdot 0,784 = 104\,705 \text{ Па}$$

Таким образом, абсолютное давление в указанных точках А, В, С, D будет равно:

абс.

для (.) А:

$$p_A^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h_A = 104\,705 + 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 0 = 129\,705 \text{ Па}$$

для (.) В:

$$p_B^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h_B = 104\,705 + 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 3,0 = \\ = 104\,694 + 25\,000 + 14\,730 = 144\,435 \text{ Па}$$

для (.) С:

$$p_C^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h_C = 104\,705 + 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 3,0 = \\ = 104\,694 + 25\,000 + 14\,730 = 144\,435 \text{ Па}$$

для (.) D:

$$p_D^{\text{абс.}} = p_{\text{атм.}} + p_0 + \rho \cdot g \cdot h_D = 104\,705 + 25\,000 + 500 \cdot 9,82 \cdot 0 = 129\,705 \text{ Па}$$

Ответ:

$$p_A = 25,0 \text{ кПа}$$

$$p_B = 39,7 \text{ кПа}$$

$$p_C = 39,7 \text{ кПа}$$

$$p_D = 25,0 \text{ кПа}$$

$$p_A^{\text{абс.}} = 129,7 \text{ кПа}$$

$$p_B^{\text{абс.}} = 144,4 \text{ кПа}$$

$$p_C^{\text{абс.}} = 144,4 \text{ кПа}$$

$$p_D^{\text{абс.}} = 129,7 \text{ кПа}$$

3) Построить эпюру ГСД на плоскость, указанную в таблице CD

Эпюра ГСД – график распределения давления вдоль какой-либо поверхности.

Для построения эпюры необходимо знать следующее:

- гидростатическое давление всегда направлено по внутренней нормали к поверхности;
- гидростатическое давление в данной точке покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям и не зависит от ориентации площадки действия;
- с увеличением глубины гидростатическое давление увеличивается по линейной зависимости, то есть давление пропорционально глубине в первой степени

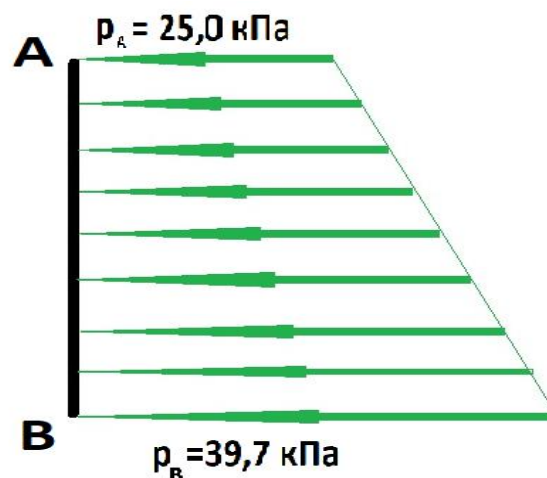
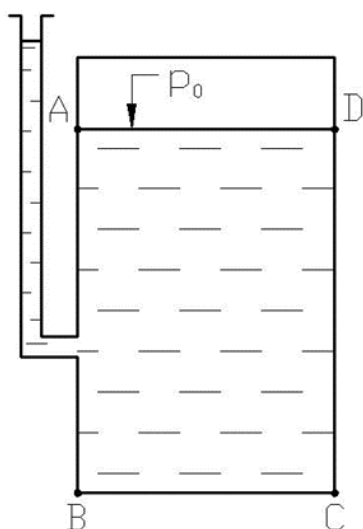
$$p \sim h^1$$

- на одной и той же глубине гидростатическое давление одинаковое.

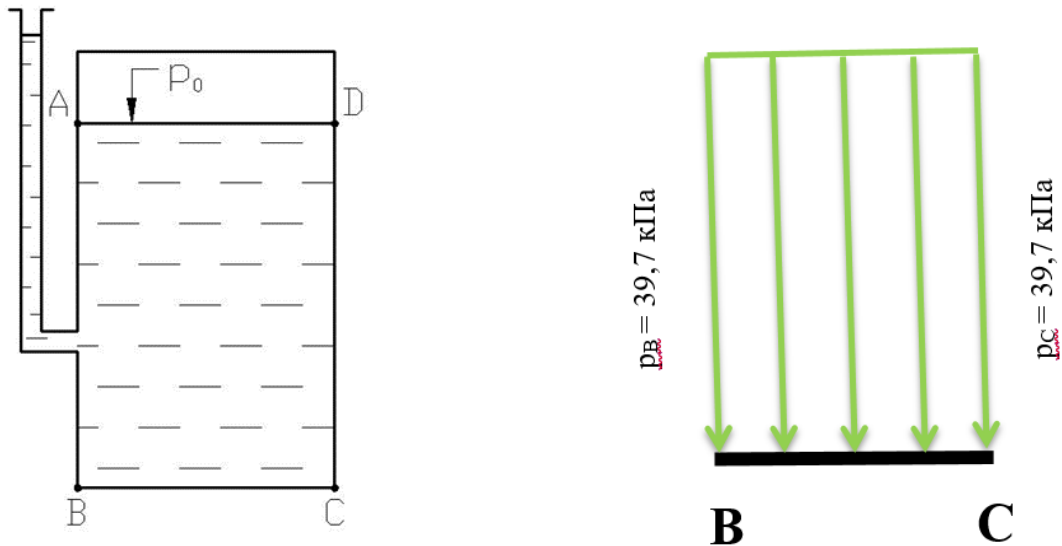
Значения избыточного давления в указанных точках А, В, С, D берутся из предыдущей части задачи:

$$p_A = 25,0 \text{ кПа}; p_B = 39,7 \text{ кПа}; p_D = 25,0 \text{ кПа}; p_C = 39,7 \text{ кПа}$$

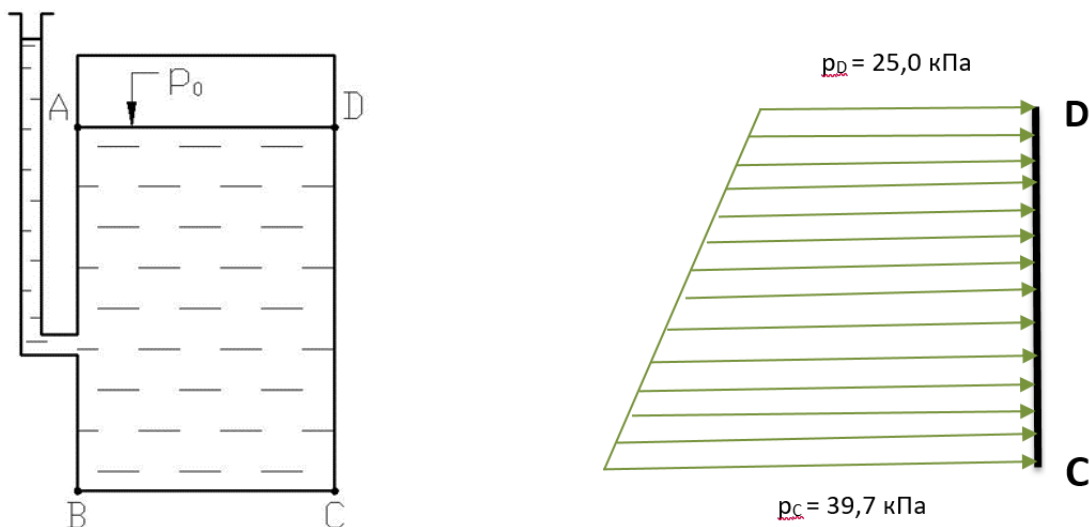
Плоскость АВ (ВА) находится слева от жидкости, жидкость – справа от заданной поверхности, следовательно, гидростатическое давление будет действовать справа налево перпендикулярно плоскости АВ (ВА).



Плоскость BC (CB) находится внизу, жидкость – сверху, следовательно, гидростатическое давление будет действовать сверху вниз, перпендикулярно BC (CB).

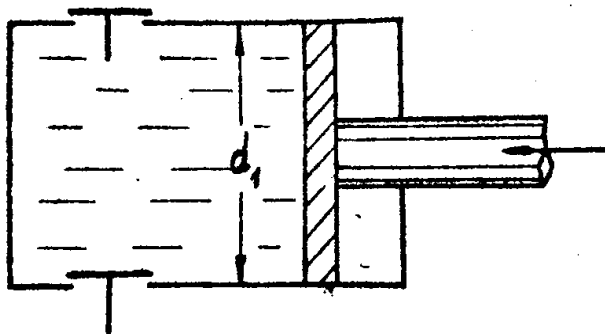


Плоскость CD (DC) находится справа от жидкости, жидкость – слева от заданной поверхности, следовательно, гидростатическое давление будет действовать слева направо перпендикулярно плоскости CD (DC).



ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 2 «РАСЧЕТ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ»

Задача 2.1. «Расчет силы гидростатического давления на плоскую поверхность»



Гидроцилиндр диаметром d_1 , м заполнен маслом с плотностью ρ_m , кг/м³. Из условия равновесия верхнего клапана весом G , Н и площадью ω , м² определить силу гидростатического давления на поршень и точку приложения силы.

- Показать на рисунке силу P и точку её приложения.
- Построить эпюру гидростатического давления на гидроцилиндр.

Вариант	1	2	3	4	5	6
d_1 , м	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50
Плотность, кг/м ³	700	710	720	730	740	750
G , Н	5,0	4,5	3,0	2,5	1,5	1,0
ω , м ²	0,0025	0,0015	0,0005	0,0010	0,0003	0,0004

Вариант	7	8	9	10	11	12
d_1 , м	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,64
Плотность, кг/м ³	760	770	780	790	800	810
G , Н	2,0	3,5	4,4	5,5	3,3	2,2
ω , м ²	0,0004	0,0035	0,0032	0,0011	0,0030	0,0020

Вариант	13	14	15	16	17	18
d_1 , м	0,66	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76
Плотность, кг/м ³	820	830	840	850	860	870
G , Н	4,0	1,2	5,8	3,6	2,8	4,8
ω , м ²	0,0064	0,0003	0,0006	0,0012	0,0070	0,0060

Вариант	19	20	21	22	23	24
d_1 , м	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88
Плотность, кг/м ³	880	890	900	910	920	930
G , Н	1,8	5,1	1,5	2,0	6,0	9,3
ω , м ²	0,0009	0,0017	0,0005	0,0025	0,0030	0,0031

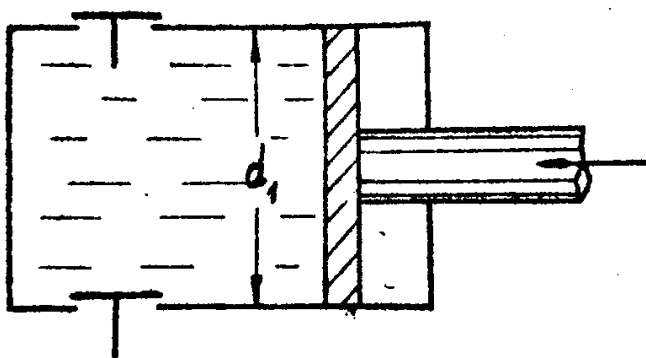
Вариант	25	26	27	28	29	30
d_1 , м	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
Плотность, кг/м ³	940	950	960	970	980	990
G , Н	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	35,0
ω , м ²	0,0020	0,0080	0,0040	0,0010	0,0060	0,0035

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

Задача 2.1.

Гидроцилиндр диаметром $d_1 = 0,30$ м заполнен маслом с плотностью $\rho_m = 2000$ кг/м³. Из условия равновесия верхнего клапана весом $G = 10$ Н и площадью $\omega = 0,0005$ м² определить силу гидростатического давления на поршень и точку приложения силы.

Показать на рисунке силу P и точку её приложения. Построить эпюру гидростатического давления на гидроцилиндр.



№ вар.	0
$d_1, \text{ м}$	0,30
$G, \text{ Н}$	10
$\omega, \text{ м}^2$	0,0005
$\rho_m, \text{ кг/м}^3$	2000

Найти:

- показать на рисунке силу P и точку её приложения;
- построить эпюру распределения избыточного гидростатического давления на гидроцилиндр.

Ход решения задачи

Любая сила характеризуется следующими параметрами:

- величина
- направление
- точка приложения

1) Величина

Величину силы гидростатического давления можно определить по формуле:

$$P = p_{\text{ц.т.}} \cdot S, [\text{Н}]$$

где P – сила гидростатического давления, действующая на плоскую фигуру, [Н];

$p_{\text{ц.т.}}$ – гидростатическое давление в центре тяжести плоской фигуры, [Па];

S – площадь плоской фигуры, [м²]

Площадь торца гидроцилиндра считается по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot (d_1)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,30)^2}{4} = 0,07065 \text{ [м}^2\text{]}$$

Гидростатическое давление в центре тяжести плоской фигуры можно найти по основному уравнению гидростатики:

$$p_{ц.т.} = p_0 + \rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ц.т.}, [\text{Па}],$$

p_0 – избыточное давление, которое действует на свободную плоскость жидкости, [Па]; из условия равновесия верхнего клапана:

$$p_0 = \frac{G}{\omega} = \frac{10}{0,0005} = 20\,000 [\text{Па}]$$

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, [кг/м³];

g – ускорение свободного падения (для Санкт-Петербурга $g = 9,82 \text{ м/с}^2$);

$h_{ц.т.}$ – заглубление центра тяжести плоской фигуры под свободной поверхностью жидкости.

$$h_{ц.т.} = \frac{d}{2} = \frac{0,30}{2} = 0,15 [\text{м}]$$

Таким образом, гидростатическое давление в центре тяжести плоской фигуры будет равно:

$$p_{ц.т.} = p_0 + \rho_{ж} \cdot g \cdot h_{ц.т.} = 20 \cdot 10^3 + 2000 \cdot 9,82 \cdot 0,15 = 22\,946 [\text{Па}]$$

Величина силы гидростатического давления, действующая на заданную плоскую фигуру, будет равна:

$$P = p_{ц.т.} \cdot S = 22\,946 \cdot 0,07065 = 1\,621 [\text{Н}] \approx 1,62 \text{ кН}$$

2) Направление

Сила гидростатического давления, как и гидростатическое давление, всегда направлено по внутренней нормали к поверхности, то есть, перпендикулярно торцу гидроцилиндра со стороны жидкости.

3) Точка приложения

Точка приложения силы P называется **центр давления** и обозначается (\cdot) D . Как правило, центр давления (\cdot) D находится ниже центра тяжести плоской фигуры (\cdot) C на величину эксцентриситета e .

Эксцентриситет – это смещение центра давления (\cdot) D относительно центра тяжести плоской фигуры (\cdot) C .

Эксцентриситет можно найти по формуле:

$$e = \frac{I_c}{y_c \cdot S}, [\text{м}]$$

I_c – центральный момент инерции плоской фигуры, подсчитанный относительно горизонтальной оси, проведённой через центр тяжести плоской фигуры.

Для круга момент инерции подсчитывается по формуле:

$$I_c = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot |d_1|^4}{64} = \frac{3,14 \cdot (0,30)^4}{64} = 0,0003974 \text{ м}^4$$

y_c – координата центра тяжести плоской фигуры по оси, проведенной вдоль поверхности. За начало координат принимается пересечение оси ОУ с пьезометрической поверхностью.

III – пьезометрическая поверхность – это воображаемая поверхность, в каждой точке которой действует атмосферное давление. В случае, когда на свободную поверхность жидкости действует избыточное давление, пьезометрическая поверхность будет находится выше свободной поверхности жидкости на величину h_0 :

$$h_0 = \frac{p_0}{\rho \cdot g} = \frac{22\,946}{2000 \cdot 9,82} = 1,018 \text{ м}$$

Заглубление центра тяжести (.) С под пьезометрической поверхностью:

$$h_c = h_{ц.т.} + h_0 = 0,15 + 1,018 = 1,168 \text{ м}$$

Координата центра тяжести (.) С:

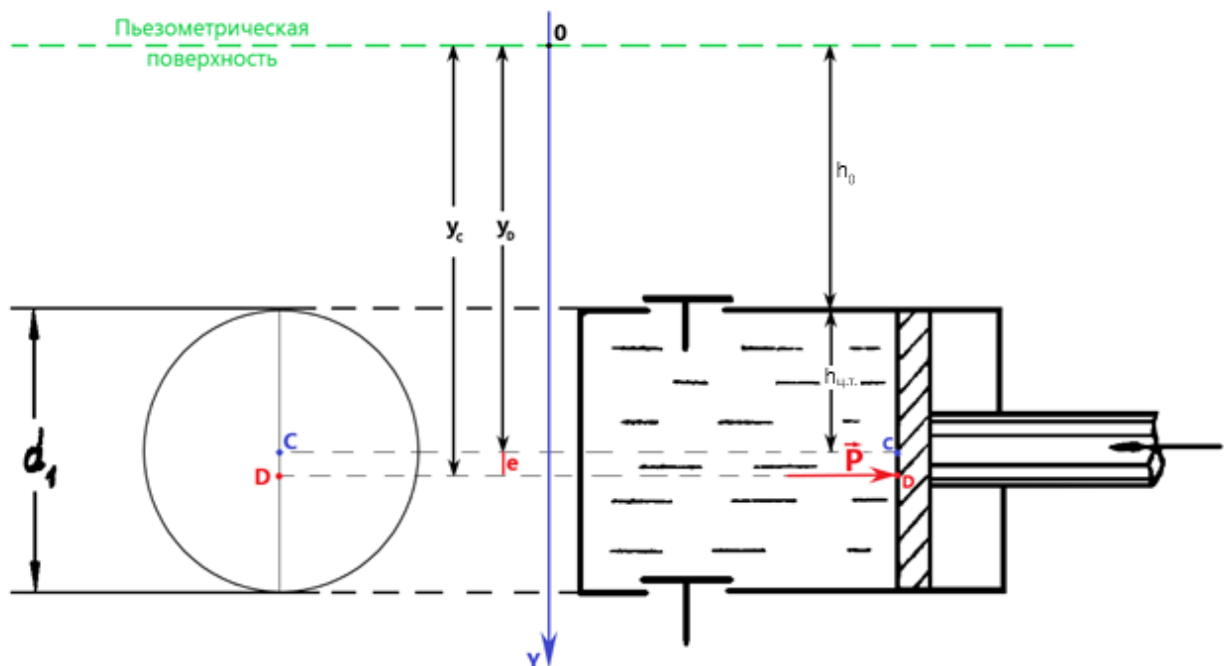
$$y_c = h_c = 1,168 \text{ м}$$

Таким образом, эксцентриситет будет равен:

$$e = \frac{I_c}{y_c \cdot S} = \frac{0,0003974}{1,168 \cdot 0,07065} = 0,0048, [\text{м}]$$

Координата центра давления (.) D будет равна:

$$y_D = y_c + e = 1,168 + 0,0048 = 1,173 \text{ м}$$



Ответ: $P = 1,62 \text{ кН}$; $e = 0,0048 \text{ м}$; $y_D = 1,173 \text{ м}$

4) Построить эпюру ГСД на плоскость АВ

Эпюра ГСД – график распределения давления вдоль какой-либо поверхности.

Для построения эпюры необходимо знать следующее:

- а) гидростатическое давление всегда направлено по внутренней нормали к поверхности;
- б) гидростатическое давление в данной точке покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям и не зависит от ориентации площадки действия;
- в) с увеличением глубины гидростатическое давление увеличивается по линейной зависимости, то есть давление пропорционально глубине в первой степени

$$p \sim h^1$$

- д) на одной глубине гидростатическое давление одинаковое.

Для построения эпюры на торец гидроцилиндра, необходимо найти гидростатическое давление в двух точках: в верхней точке и в нижней точке гидроцилиндра по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho_{ж} \cdot g \cdot h, [\text{Па}],$$

где p – давление в данной точке, которое надо найти [Па];

p_0 – избыточное давление в верхней точке гидроцилиндра [Па] (по расчёту $p_0 = 22\,946$ Па);

ρ – плотность жидкости, [кг/м³] (по исходным данным $\rho = 2000$ кг/м³);

g – ускорение свободного падения (для Санкт-Петербурга $g = 9,82$ м/с²);

h – глубина рассматриваемой точки относительно свободной поверхности [м].

изб.

для верхней (.) гидроцилиндра:

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_{\text{верхн.}} = 22\,946 + 2000 \cdot 9,82 \cdot 0 = 22\,946 \text{ Па}$$

для нижней (.) гидроцилиндра:

$$p_B = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_{\text{нижн.}} = 22\,946 + 2000 \cdot 9,82 \cdot 0,30 = 22\,946 + 5\,892 = 28\,838 \text{ Па}$$

Принцип построения эпюры показан в задаче 1.2 и в лекционном материале.

Задача 2.2. «Расчет силы гидростатического давления на криволинейную вертикальную поверхность»

Задача № 2.32

Вертикальный цилиндрический резервуар высотой H и диаметром D закрывается полусферической крышкой, сообщающейся с атмосферой через трубу с внутренним диаметром d (рис. 5).

Резервуар заполнен мазутом, плотность которого $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$

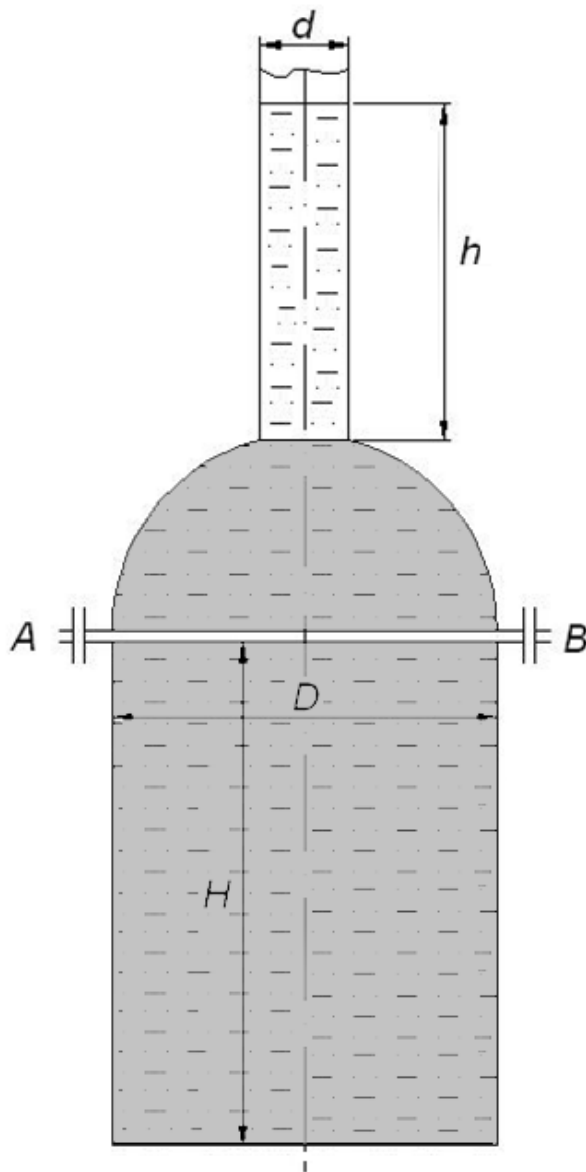


Рис. 5.

Требуется определить:

1. Высоту поднятия мазута h при повышении температуры на $t^{\circ}\text{C}$
2. Силу, отрывающую крышку резервуара при подъеме мазута на высоту h за счет его разогрева.

Коэффициент температурного расширения мазута принять равным:

$$\beta_t = 0,00072 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

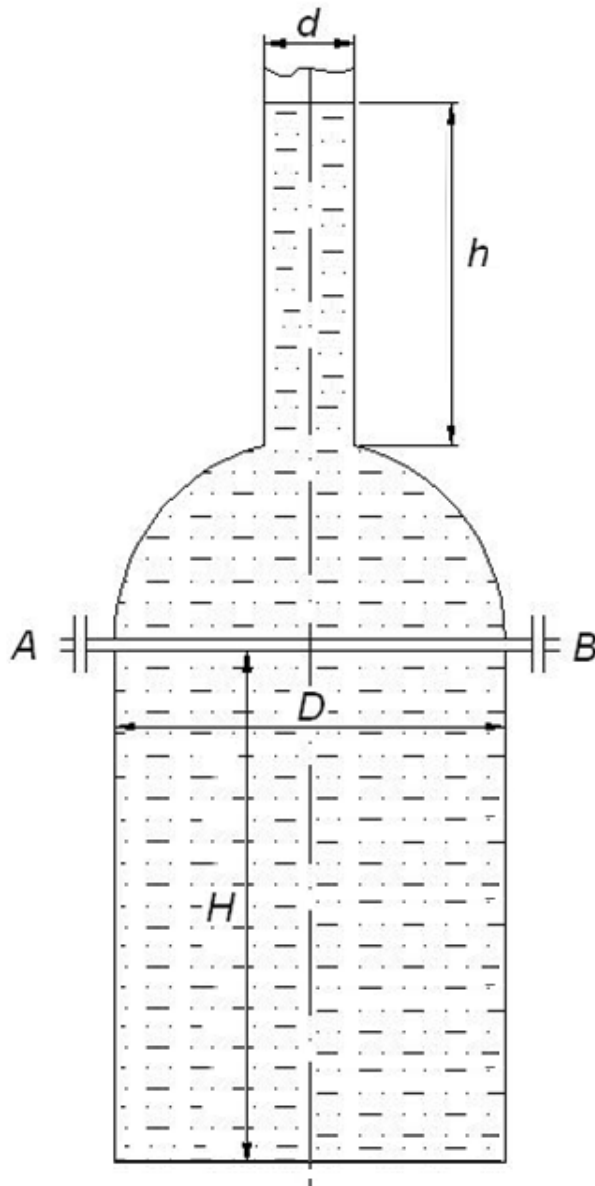
Варианты к задаче № 2.2

No вар.	Диаметр резервуара	Высота резервуара	Диаметр вент.трубы	Повышение температуры в резервуаре
	D, м	H, м	d, мм	Δt , °C
1	2,0	2,0	250	15
2	2,5	3,0	300	20
3	1,8	1,5	150	25
4	1,5	2,5	100	10
5	2,2	2,2	125	15
6	1,6	2,6	275	20
7	2,4	3,2	350	25
8	1,7	2,8	250	24
9	2,3	3,1	450	23
10	1,3	1,2	300	22
11	1,0	4,0	250	21
12	1,25	3,8	200	20
13	1,5	3,5	220	19
14	3,6	3,0	500	18
15	3,0	2,5	400	17
16	1,1	3,9	250	16
17	3,2	3,5	375	15
18	1,2	4,0	200	14
19	3,4	2,8	450	13
20	4,6	2,5	500	12
21	2,6	3,0	350	11
22	4,0	1,8	375	10
23	3,5	2,1	500	9
24	2,8	2,6	200	8
25	1,8	3,2	150	7
26	1	3,8	100	6
27	1,5	4,4	450	5
28	2,7	5	250	4
29	1,8	5,6	200	3
30	2	6,2	300	2

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

Задача 2.2.

Вертикальный цилиндрический резервуар высотой $H = 5,0$ м и диаметром $D = 2,1$ м закрывается полусферической крышкой, сообщающейся с атмосферой через трубу с внутренним диаметром $d = 225$ мм. Резервуар заполнен мазутом, плотность которого $\rho = 900$ кг/м³.



Требуется определить:

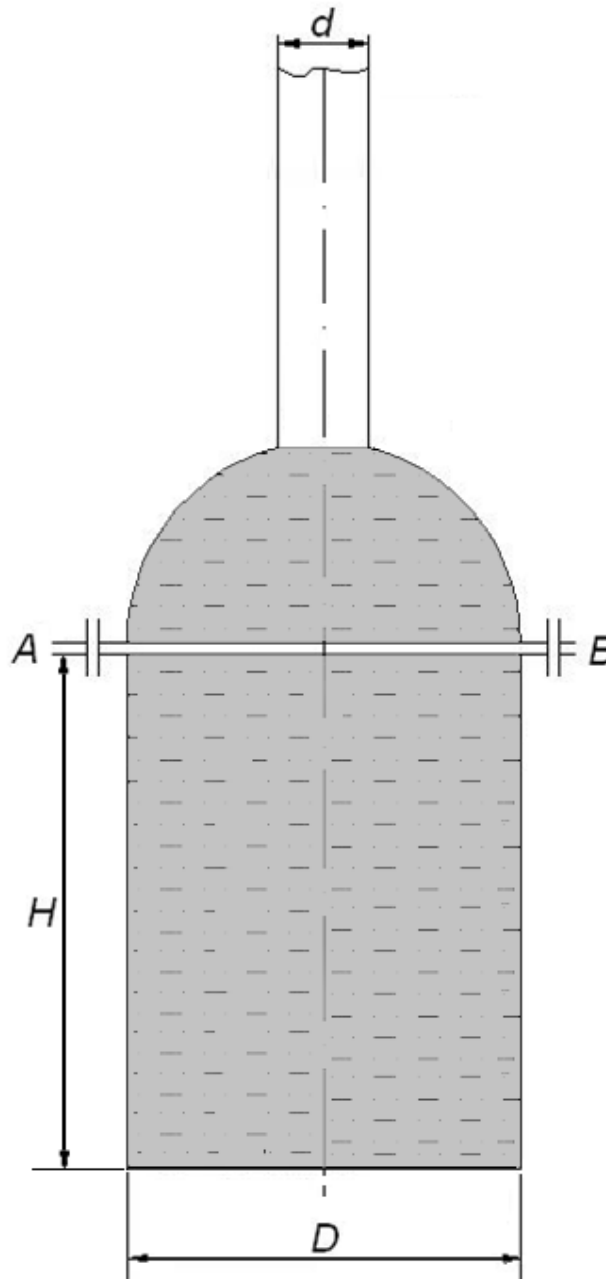
1. Высоту поднятия мазута h при повышении температуры на $t^{\circ}C = 2^{\circ}C$
2. Силу, отрывающую крышку резервуара при подъеме мазута на высоту h за счет его разогрева.

Коэффициент температурного расширения мазута принять равным

$$\beta_t = 0,00072 \text{ } 1/^{\circ}C$$

Ход решения задачи

1. Сначала необходимо определить объём резервуара W , состоящий из цилиндрической и полусферической частей. Это будет первоначальный объём мазута.



$$\begin{aligned} W &= W_{\text{цилл.}} + W_{\text{полусферы}} = W_{\text{цилл.}} + \frac{1}{2} W_{\text{сферы}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} = \\ &= \frac{3,14 \cdot (2,1)^2}{4} \cdot 5 + \frac{3,14 \cdot (2,1)^3}{12} = 3,46 \cdot 5 + 2,42 = 19,72 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

2. Затем, используя формулу для коэффициента температурного расширения β_t , находим приращение этого объема за счёт его увеличения при нагревании на $t^\circ\text{C}$:

$$\Delta W = W \cdot \beta_t \cdot \Delta t = 19,72 \cdot 0,00072 \cdot 2^\circ\text{C} = 0,0284 \text{ м}^3$$

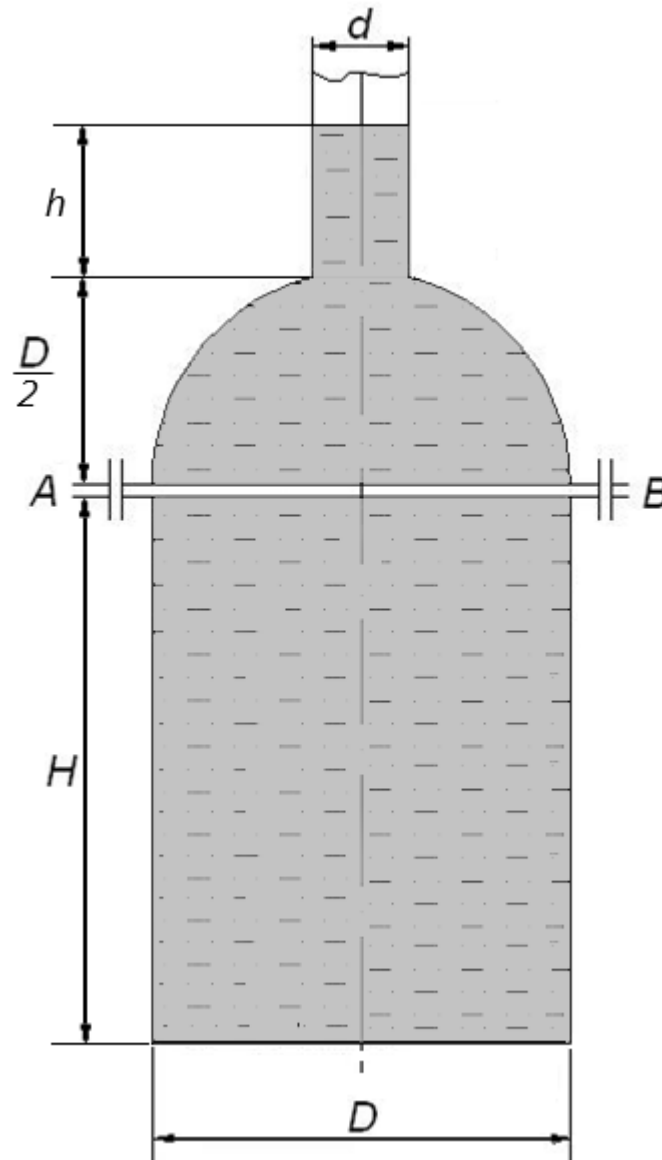
3. Поделив найденное приращение объема ΔW на площадь поперечного сечения трубы, получим искомую высоту поднятия мазута h .

Площадь поперечного сечения трубы:

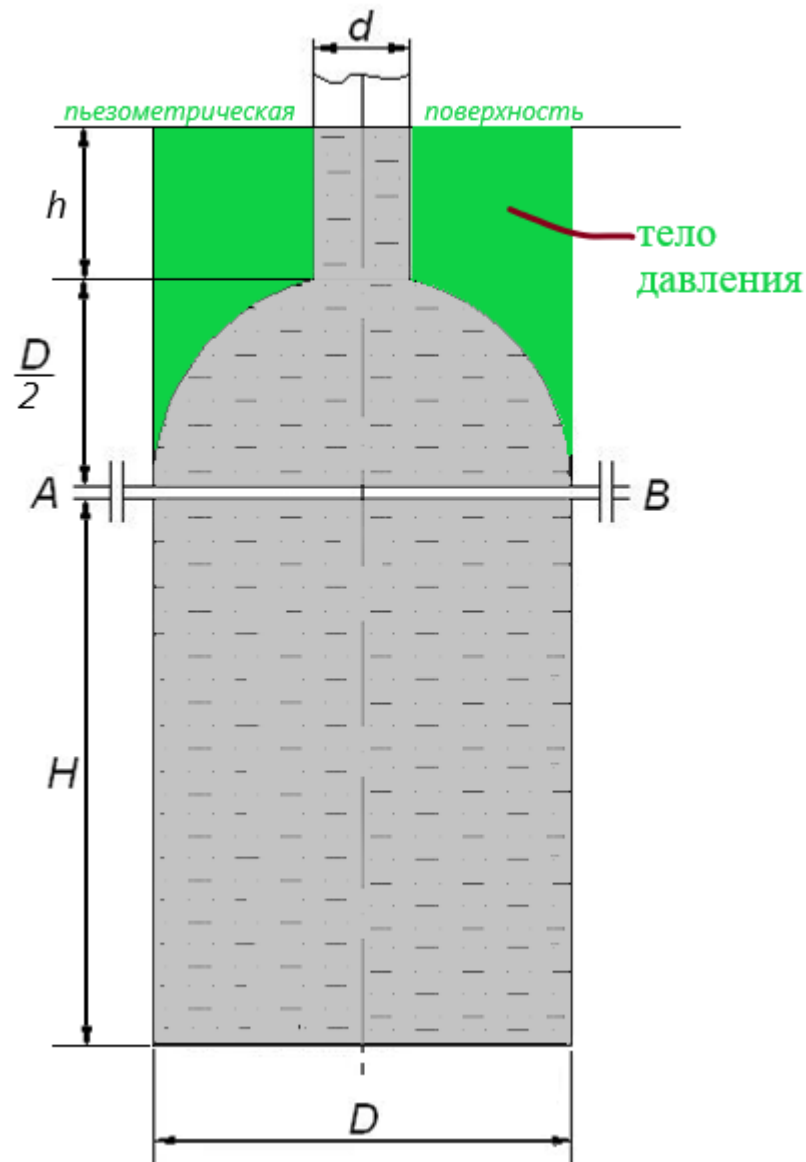
$$S_{\text{тр.}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,225)^2}{4} = 0,03974 \text{ м}^2$$

Высота поднятия мазута в трубе:

$$h = \frac{\Delta W}{S_{\text{тр.}}} = \frac{0,0284}{0,03974} = 0,71 \text{ м}$$



4. Для нахождения усилия, отрывающего крышку резервуара от плоскости разреза АВ, необходимо найти объём тела давления $W_{\text{т.д.}}$ (объем, ограниченный пьезометрической поверхностью, проведенной по свободной поверхности мазута в трубе; полусферической крышкой и вертикальной проектирующей поверхностью, построенной на контуре разреза АВ).



Этот объем будет состоять из объема цилиндра диаметром D и высотой $(D/2+h)$, из которого следует вычесть объем полусферы диаметром D и объем малого цилиндра диаметром d и высотой h .

$$\begin{aligned}
 W_{\text{т.д.}} &= \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(\frac{D}{2} + h\right) - \frac{\pi \cdot D^3}{12} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = \\
 &= \frac{3,14 \cdot (2,1)^2}{4} \cdot \left(\frac{2,1}{2} + 0,71\right) - \frac{3,14 \cdot (2,1)^3}{12} - \frac{3,14 \cdot (0,225)^2}{4} \cdot 0,71 = \\
 &= 6,09 - 2,42 - 0,03 = 3,64 \text{ м}^3
 \end{aligned}$$

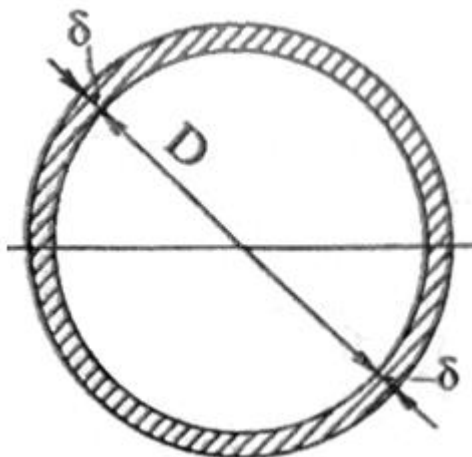
5. Искомое усилие будет направлено вверх и равно:

$$P_z = \rho \cdot g \cdot W_{\text{т.д.}} = 900 \cdot 9,82 \cdot 3,64 = 32\,170 \text{ Н}$$

Ответ: $h = 0,71 \text{ м}; P_z = 32,17 \text{ кН}$

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 3 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК ТРУБОПРОВОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ»

Труба с внутренним диаметром D , мм испытывает внутреннее давление жидкости p , м вод.ст.



Определить толщину стенки трубы δ , мм, соответствующую внутреннему давлению, если предельное напряжение на растяжение для стали $[\sigma_p]$, МПа. Коэффициент запаса прочности принять равным K в зависимости от условий эксплуатации.

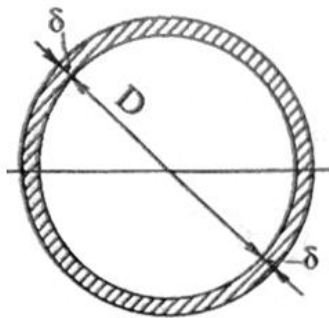
№ варианта	внутренний диаметр	давление на оси трубопровода	предельное напряжение материала стенок трубы	Условия эксплуатации
	D	p	$[\sigma]$	-
	мм	м.вод.ст	МПа	-
1	350	35	6,01	лёгкие
2	300	70	12,57	средние
3	275	65	17,02	тяжёлые
4	250	55	6,51	лёгкие
5	225	75	15,23	средние
6	215	40	9,86	тяжёлые
7	200	85	12,57	лёгкие
8	175	80	12,57	средние
9	150	45	6,01	тяжёлые
10	125	25	6,01	лёгкие
11	110	60	9,86	средние
12	100	50	12,57	тяжёлые
13	90	25	5,79	лёгкие

№ варианта	внутренний диаметр	давление на оси трубопровода	предельное напряжение материала стенок трубы	Условия эксплуатации
	D	p	[σ]	-
	мм	м.вод.ст	МПа	-
14	80	45	6,51	средние
15	600	15	17,02	тяжёлые
16	550	30	5,79	лёгкие
17	500	65	9,86	средние
18	475	75	15,23	тяжёлые
19	450	40	6,01	лёгкие
20	425	50	12,57	средние
21	300	60	17,02	тяжёлые
22	375	70	9,06	лёгкие
23	350	30	10,67	средние
24	300	100	15,23	тяжёлые
25	275	40	5,79	лёгкие
26	250	25	9,86	средние
27	225	65	17,02	тяжёлые
28	215	75	6,01	лёгкие
29	200	50	12,57	средние
30	100	15	15,23	тяжёлые

Примечание: 1 м вод.ст.= 0,00981 МПа

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

Задача 3.

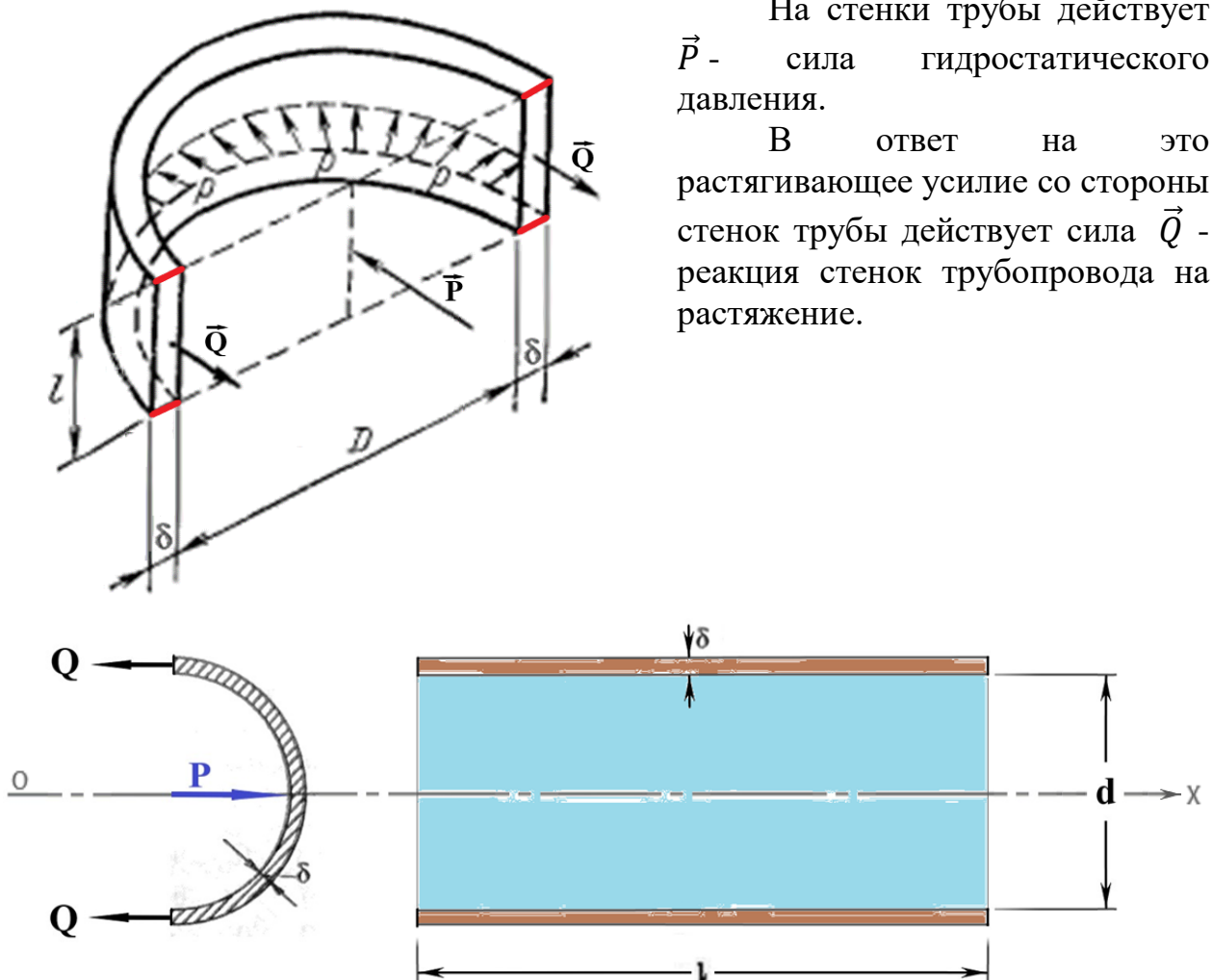


Труба с внутренним диаметром $D = 400$ мм испытывает внутреннее давление жидкости $p = 90$ м вод.ст. Определить толщину стенки трубы δ , мм, соответствующую внутреннему давлению, если предельное напряжение на растяжение для стали $[\sigma_p] = 17,02$ МПа. Условия эксплуатации - лёгкие.

Ход решения задачи

На стенки трубы действует \vec{P} - сила гидростатического давления.

В ответ на это растягивающее усилие со стороны стенок трубы действует сила \vec{Q} - реакция стенок трубопровода на растяжение.



Вдоль оси OX сумма этих сил будет равна:

$$\vec{P} + 2 \cdot \vec{Q} = 0$$

$$P - 2Q = 0$$

$$P = 2Q$$

P - сила гидростатического давления:

$$P = p_{\text{ц.т.}} \cdot \omega_{\text{тр.}} = p \cdot l \cdot d$$

p – давление по оси трубопровода;

$\omega_{\text{тр.}} = l \cdot d$ – площадь проекции (на рисунке показано голубым цветом), где d – внутренний диаметр трубопровода; l – длина трубопровода.

Q - реакция стенок трубопровода на растяжение:

$$Q = \sigma_p \cdot S_{\text{ст.}} = \sigma_p \cdot l \cdot \delta$$

σ_p – напряжение стенок трубы на растяжение;

$S_{\text{ст.}} = l \cdot \delta$ – площадь стенок трубопровода (на рисунке показано коричневым цветом), где l – длина трубопровода; δ – толщина стенок трубы.

Таким образом, приравнявая получившиеся выражения в уравнение $P = 2Q$, получаем:

$$p \cdot l \cdot d = 2 \cdot \sigma_p \cdot l \cdot \delta$$

Минимальную толщину стенок трубы можно определить по формуле:

$$\delta = k \cdot \frac{p \cdot d}{2[\sigma]}, [\text{мм}],$$

где

δ – толщина стенок трубы [мм]

d – внутренний диаметр трубопровода [мм];

p – давление по оси трубопровода [МПа];

$[\sigma]$ – предельное напряжение стенок трубы на растяжение [МПа]

k – коэффициент запаса:

$k=2$ – лёгкие условия эксплуатации

$k=4$ – средние условия эксплуатации

$k=6$ – тяжёлые условия эксплуатации

Таким образом:

1) Давление по оси трубопровода в стандартных единицах измерения:

$$p = 90 \text{ м вод. ст} = 90 \cdot 0,00981 = 0,883 \text{ МПа}$$

2) Так как условия эксплуатации лёгкие, то $k=2$

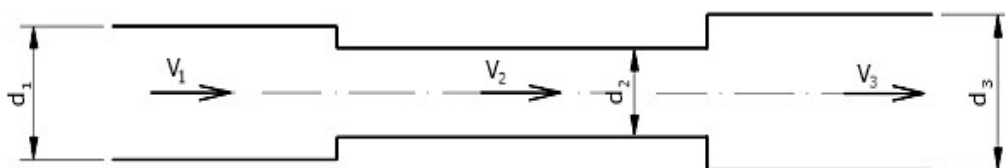
3) Минимальная толщина стенок трубы будет равна:

$$\delta = k \cdot \frac{p \cdot d}{2[\sigma]} = 2 \cdot \frac{0,883 \cdot 400}{2 \cdot 17,02} = 20,7 \text{ мм}$$

Ответ: толщина стенок трубы $D = 400$ мм составляет $\delta = 20,7$ мм

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

Определить расход воды Q , проходящей через трубу переменного сечения, если диаметр трубы 1 составляет d_1 , мм, диаметр трубы 2 составляет d_2 , мм, диаметр трубы 3 составляет d_3 , мм. Определить расход воды в данном трубопроводе и скорости движения потока воды на участках, если задана скорость движения воды V_1 , м/с.



Варианты исходных данных для типовой задачи № 4.1.

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_1 , мм	200	300	400	500	600	100	250	150	300	75
d_2 , мм	150	200	300	300	400	175	300	200	400	100
d_3 , мм	250	250	350	400	500	300	350	225	500	200
V_1 , м/с	1,50	0,80	1,30	0,90	1,10	2,10	1,60	1,70	2,50	1,20

Исходные данные	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d_1 , мм	300	350	400	450	500	200	400	100	500	300
d_2 , мм	250	250	350	400	450	300	450	125	600	450
d_3 , мм	200	150	300	300	400	150	350	110	400	250
V_1 , м/с	0,50	1,00	2,20	1,30	1,50	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80

Исходные данные	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
d_1 , мм	500	600	700	800	900	550	650	750	850	950
d_2 , мм	600	700	800	900	1000	450	550	550	750	850
d_3 , мм	700	800	900	1000	1200	350	350	450	650	550
V_1 , м/с	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 4.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

ВАРИАНТ № 0

Определить расход воды Q , проходящей через трубу переменного сечения, если диаметр трубы 1 составляет $d_1 = 150$ мм, диаметр трубы 2 составляет $d_2 = 100$ мм, диаметр трубы 3 составляет $d_3 = 200$ мм. Определить расход воды в данном трубопроводе и скорости движения потока воды на участках, если задана скорость движения воды $V_1 = 1,05$ м/с.

Исходные данные: вариант № 0

Исходные данные		Номер варианта
		0
Диаметр трубы 1	$d_1, \text{м}$	0,150
Диаметр трубы 2	$d_2, \text{м}$	0,100
Диаметр трубы 3	$d_3, \text{м}$	0,200
Скорость движения воды	$V_1, \text{м/с}$	1,05

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Расход воды в трубопроводе можно определить по формуле средней скорости:

$$V = \frac{Q}{\omega},$$

откуда расход можно выразить через формулу: $Q = \omega \cdot V$

Так как известны диаметр 1-ой части трубопровода, то площадь живого сечения трубы будет равна:

$$\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,150)^2}{4} = 0,01766 \text{ м}^2$$

Так как известны площадь живого сечения ω_1 и скорость в 1-ой части трубопровода V_1 , то расход воды в трубе будет равен:

$$Q = \omega_1 \cdot V_1 = 0,01766 \cdot 1,05 = 0,01855 \text{ м}^3/\text{с} = 18,55 \text{ л/с}$$

Зная расход и диаметры отдельных частей трубопровода, из уравнения неразрывности потока при установившемся движении можно найти скорость потока в любом живом сечении по формуле:

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2} \text{ и } V_3 = \frac{Q}{\omega_3}$$

Для трубы диаметром $d_2 = 100$ мм площадь живого сечения равна:

$$\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,100)^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2$$

Скорость V_2 равна:

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{0,01855}{0,00785} = 2,36 \text{ м/с}$$

Для трубы диаметром $d_3 = 200$ мм площадь живого сечения равна:

$$\omega_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,200)^2}{4} = 0,0314 \text{ м}^2$$

Скорость V_3 равна:

$$V_3 = \frac{Q}{\omega_3} = \frac{0,01855}{0,0314} = 0,59 \text{ м/с}$$

ОТВЕТ: $Q = 18,55 \text{ л/с}; V_2 = 2,36 \text{ м/с}; V_3 = 0,59 \text{ м/с}$

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

Определить потери напора и потери давления при изменении диаметра трубопровода с d_1 , мм, на d_2 , мм, если расход воды составляет Q , л/с.

Варианты исходных данных для типовой задачи № 4.2.

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_1 , мм	500	100	400	250	125	250	500	600	225	350
d_2 , мм	450	150	300	300	100	350	300	700	150	400
Q , л/с	300	25	150	110	20	125	350	525	90	300

Исходные данные	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d_1 , мм	500	100	125	150	225	700	250	350	125	110
d_2 , мм	400	150	100	175	175	800	225	400	110	225
Q , л/с	250	30	20	80	75	650	120	145	35	45

Исходные данные	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
d_1 , мм	225	150	300	275	110	100	300	125	350	400
d_2 , мм	150	300	275	450	100	200	150	250	200	600
Q , л/с	65	95	175	100	30	70	65	40	85	130

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 4.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

ВАРИАНТ № 0

Определить потери напора и потери давления при изменении диаметра трубопровода с $d_1 = 200$ мм на $d_2 = 250$ мм, если расход воды составляет $Q = 100$ л/с.

Исходные данные: вариант № 0

Исходные данные		Номер варианта
		0
Диаметр трубы 1	$d_1, \text{м}$	0,200
Диаметр трубы 2	$d_2, \text{м}$	0,250
Расход воды	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	0,100

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определяем вид местного сопротивления:

- а) если $d_1 > d_2$ – входной диаметр больше выходного диаметра, то это местное сопротивление называется **«резкое сужение»**. Этому местному сопротивлению соответствует схема:



- б) если $d_1 < d_2$ – входной диаметр меньше выходного диаметра, то это местное сопротивление называется **«резкое расширение»**. Этому местному сопротивлению соответствует схема:



1. В исходных данных задано:

$$d_1 = 200 \text{ мм} < d_2 = 250 \text{ мм},$$

Следовательно, это местное сопротивление – «**резкое расширение**»

2. Потери напора в данном местном сопротивлении можно определить по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g}, [\text{М}]$$

где

ζ – коэффициент местного сопротивления, безразмерный [-]

g – ускорение свободного падения, $g = 9,82 \text{ М/с}^2$

V – средняя скорость, обычно принимается скорость после местного сопротивления, т.е. V_2

2.1. Коэффициент местного сопротивления ζ можно определить теоретически:

А) Теоретический коэффициент местного сопротивления при резком (внезапном) расширении (р.р. – резкое расширение) потока равен:

$$\zeta_{\text{р.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 \text{ для скорости } V_2.$$

Б) Теоретический коэффициент местного сопротивления при резком (внезапном) сужении потока можно определить по эмпирической зависимости, предложенной учёным И. Е. Идельчиком:

$$\zeta_{\text{р.с.}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \text{ для скорости } V_2$$

Для трубы диаметром $d_1 = 200 \text{ мм}$ площадь живого сечения равна:

$$\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,200)^2}{4} = 0,0314 \text{ м}^2$$

Для трубы диаметром $d_2 = 250 \text{ мм}$ площадь живого сечения равна:

$$\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,250)^2}{4} = 0,04906 \text{ м}^2$$

Так как в п.1 было выяснено, что задано резкое расширение трубопровода, то коэффициент резкого расширения для заданных диаметров будет равен:

$$\zeta_{\text{р.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 = \left(\frac{0,04906}{0,0314} - 1 \right)^2 = 0,316$$

2.2. Скорость V_2 равна:

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{0,100}{0,04906} = 2,04 \text{ М/с}$$

2.3. Таким образом, потери напора составят:

$$\Delta h = h_m = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,316 \cdot \frac{(2,04)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,067 \text{ м}$$

3. Потери давления в местном сопротивлении можно определить по формуле:

$$\Delta p_m = \rho \cdot g \cdot h_m = \xi \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \text{ Па}$$

Таким образом, в данном местном сопротивлении потери давления составят:

$$\Delta p_m = \rho \cdot g \cdot h_m = 1000 \cdot 9,82 \cdot 0,067 = 658 \text{ Па}$$

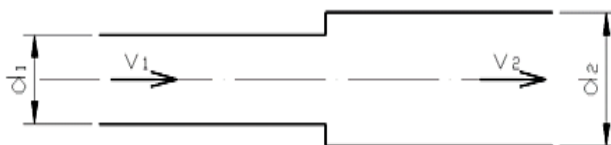
ОТВЕТ:

Потери напора $\Delta h = 0,067$ м

Потери давления $\Delta p = 658$ Па

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 4.3. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

Определить давление p_2 , кПа при резком расширении горизонтального трубопровода при изменении диаметра трубопровода с d_1 , мм, на d_2 , мм, если расход воды составляет Q , л/с. Давление в подводящем трубопроводе составляет p_1 , кПа.



Варианты исходных данных для типовой задачи № 4.3.

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q, л/с	335	198	133	57	66	428	42	256	49	656
d_1 , мм	350	250	200	150	250	500	100	300	110	800
d_2 , мм	550	300	250	200	300	600	125	400	175	900
p_1 , кПа	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70

Исходные данные	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Q, л/с	713	555	88	77	44	22	33	444	333	888
d_1 , мм	600	500	200	250	150	100	125	500	300	900
d_2 , мм	700	600	250	300	250	125	175	600	400	1000
p_1 , кПа	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120

Исходные данные	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Q, л/с	99	111	144	100	55	83	122	222	512	19
d_1 , мм	250	200	400	150	200	150	250	300	500	100
d_2 , мм	350	250	500	200	250	275	400	400	700	110
p_1 , кПа	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 4.3. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ»

Определить давление p_2 , кПа при резком расширении горизонтального трубопровода при изменении диаметра трубопровода с $d_1 = 300$ мм, на $d_2 = 400$ мм, если расход воды составляет $Q = 250$ л/с. Давление в подводящем трубопроводе составляет $p_1 = 100$ кПа.



ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для определения давления на выходе из местного сопротивления (резкое расширение потока) применим уравнение Даниила Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w$$

z – высота расположения рассматриваемой точки в потоке жидкости над некоторой горизонтальной плоскостью, которая называется плоскостью сравнения, обозначается О-О.

Примем за плоскость сравнения ось трубопровода, тогда $Z_1 = Z_2 = 0$

p – гидродинамическое давление в рассматриваемой точке;

p_1 – задано; p_2 – необходимо найти.

γ – вес единицы объема жидкости;

для воды $\gamma = \rho \cdot g = 1000 \text{ кг/м}^3 \times 9,81 \text{ м/с}^2 = 9810 \text{ Н/м}^3$

α – корректив кинетической энергии, учитывающий неравномерность распределения скоростей в рассматриваемом живом сечении потока; для данной задачи можно принять $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,05$

V – средняя скорость движения жидкости в рассматриваемом живом сечении;
 V_1 , м/с и V_2 , м/с – находится из уравнения неразрывности потока:

Для трубы диаметром $d_1 = 300$ мм площадь живого сечения равна:

$$\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,300)^2}{4} = 0,07065 \text{ м}^2$$

Скорость V_1 равна:

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{0,250}{0,07065} = 3,54 \text{ м/с}$$

Для трубы диаметром $d_2 = 400$ мм площадь живого сечения равна:

$$\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,400)^2}{4} = 0,1256 \text{ м}^2$$

Скорость V_2 равна:

$$V_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{0,250}{0,1256} = 1,99 \text{ м/с}$$

g – ускорение свободного падения, $g = 9,82 \text{ м/с}^2$.

Для определения потери напора при резком расширении для круглых труб применяется формула Борда:

$$h_{\text{р.р.}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{(3,54 - 1,99)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,122 \text{ м}$$

Таким образом, получаем:

$$0 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = 0 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - h_w$$

Умножим обе части уравнения на $\gamma = \rho \cdot g$

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \rho \cdot \frac{\alpha_1 V_1^2}{2} - \rho \cdot \frac{\alpha_2 V_2^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h_w = \\ &= 100\,000 + 1000 \cdot \frac{1,05 \cdot (3,54)^2}{2} - 1000 \cdot \frac{1,05 \cdot (1,99)^2}{2} \\ &\quad - 1000 \cdot 9,82 \cdot 0,122 = \\ &= 100\,000 + 6\,579 - 2\,079 - 1198 = 103\,302 \text{ Па} \end{aligned}$$

ОТВЕТ: давление $p_2 = 103,302$ кПа

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 5.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТРУБОПРОВОДЕ»

Объём воды W , л протекает по трубе диаметром d , мм за время t , мин. Определите режим движения жидкости в напорном трубопроводе, если температура воды t° , $^\circ\text{C}$.

Варианты исходных данных для типовой задачи № 5.1.

№ варианта	W	d	t	t°	род жидкости
	л	мм	мин	°C	вода
1	3	100	10	1	вода
2	35	150	5	2	вода
3	150	200	2	3	вода
4	60	250	1	4	вода
5	100	300	3	5	вода
6	150	350	6	6	вода
7	150	400	1,5	7	вода
8	50	450	0,3	8	вода
9	175	500	4,5	9	вода
10	400	550	10	10	вода
11	1500	600	1,2	11	вода
12	2000	650	5	12	вода
13	300	700	7,5	13	вода
14	500	750	8	14	вода
15	550	800	2,5	15	вода
16	200	850	1	16	вода
17	1200	900	12	17	вода
18	1700	950	20	18	вода
19	1800	1000	2	19	вода
20	11	25	1	20	вода
21	3	40	1,5	21	вода
22	11	50	8,5	22	вода
23	3	75	0,1	23	вода
24	40	90	0,5	24	вода
25	12	100	5	25	вода
26	4,5	110	0,5	26	вода
27	45	125	2,5	27	вода
28	15	150	0,25	28	вода
29	16	175	3	29	вода
30	3	200	0,3	30	вода

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ 5.1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТРУБОПРОВОДЕ»

Объём воды $W = 30$ л протекает по трубе диаметром $d = 325$ мм за время $t = 5$ минут. Определите режим движения жидкости в напорном трубопроводе, если температура воды $t^\circ = 42^\circ\text{C}$.

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Расход воды в трубопроводе можно определить по формуле:

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{300} = 0,000100 \text{ м}^3/\text{с}$$

где

объём воды $W = 30 \text{ л} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$,

время $t = 5 \text{ минут} = 5 \cdot 60 = 300 \text{ с}$

2. Площадь живого сечения можно определить по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,325)^2}{4} = 0,0829 \text{ м}^2$$

3. Среднюю скорость воды в трубопроводе определяем по формуле:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,000100}{0,0829} = 0,00121 \text{ м/с}$$

4. По роду жидкости и температуре определяем кинематический коэффициент вязкости ν , $\text{см}^2/\text{с}$. Для различных жидкостей зависимость вязкости от температуры различна. Для воды она имеет вид:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad [\text{Ст}]$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости воды для заданной температуры t , $^\circ\text{C}$.

По заданию температура воды $t^\circ = 42^\circ\text{C}$, следовательно, кинематический коэффициент вязкости будет равен:

$$v = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot 42 + 0,000221 \cdot (42)^2} =$$

$$= \frac{0,0178}{1 + 1,4154 + 0,3898} = \frac{0,0178}{2,8052} = 0,00635 \text{ [Ст]}$$

Или значение кинематического коэффициента вязкости можно посмотреть по Приложению 1 настоящих методических указаний.

5. Определяем число Рейнольдса. Для круглоцилиндрических напорных труб число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

Для упрощения вычислений все величины, входящие в формулу подставляются в см:

- средняя скорость движения потока воды в трубопроводе

$$V = 0,00121 \text{ м/с} = 0,121 \text{ см/с}$$

- диаметр $d = 325 \text{ мм} = 32,5 \text{ см}$
- кинематический коэффициент вязкости воды

$$\nu = 0,00635 \text{ Ст} = 0,00635 \text{ см}^2/\text{с}$$

Таким образом, число Рейнольдса будет равно:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,121 \cdot 32,5}{0,00635} = 619$$

6. В настоящее время считается, что границей между турбулентным и ламинарным режимом движения жидкости в круглоцилиндрических напорных трубах является критическое число Рейнольдса $Re_{кр.} = 2300$. Поэтому для определения режима движения жидкости в напорном трубопроводе необходимо вычисленное число Рейнольдса сравнить с критическим числом Рейнольдса:

- если $Re < Re_{кр}$ — режим ламинарный.
- если $Re > Re_{кр}$ — режим турбулентный.

В нашем случае $Re = 619 < Re_{кр.} = 2300$, следовательно, в заданном трубопроводе ламинарный режим.

ОТВЕТ: $Re = 619$, ламинарный режим

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 5.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ»

Задача: объём воды W , л прошёл через трубу диаметром d , мм за время t . Температура воды $t^{\circ}\text{C}$, шероховатость трубы Δ , мм. Определить область гидравлического сопротивления. Для полученной области вычислить значение коэффициента гидравлического трения λ .

. Варианты исходных данных для типовой задачи № 5.2.

№	W , л	d , мм	Время t , мин.	t° , $^{\circ}\text{C}$	Δ , мм	L , м
1	45	80	1,5	31	0,15	10
2	150	90	0,75	32	1,00	15
3	55	100	9	33	0,16	20
4	125	110	4	34	0,10	25
5	65	125	2	35	0,25	30
6	180	150	0,2	36	0,50	35
7	75	175	7	37	0,40	40
8	80	200	3	38	0,40	45
9	85	215	2	39	0,50	50
10	190	225	0,2	40	1,00	55
11	14	250	1	41	0,50	60
12	60	275	1,5	42	0,50	65
13	65	300	0,7	43	0,50	70
14	200	350	0,1	44	1,00	75
15	20	400	2,5	45	0,55	80
16	120	450	1,5	46	0,55	85
17	125	500	0,6	47	1,00	90
18	290	600	0,2	48	3,50	95
19	300	700	8,5	49	3,00	100
20	275	800	2	50	1,00	105
21	145	100	1	51	0,20	110
22	55	40	0,1	52	0,05	115
23	10	50	5	53	0,10	120
24	12	60	1,5	54	0,10	125
25	60	75	1,5	55	0,20	130
26	170	80	1	56	0,50	135
27	1,5	90	0,4	57	0,20	140
28	28	100	2,5	58	0,10	145
29	85	110	0,8	59	0,20	150
30	190	125	0,2	60	0,30	155

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 5.2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ»

Объём воды $W = 3$ л протекает по трубе диаметром $d = 25$ мм за время $t = 0,3$ минуты, температура воды $t^\circ = 30^\circ\text{C}$. Определить область гидравлического сопротивления и вычислить коэффициент гидравлического трения λ для найденной области.

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Расход воды в трубопроводе определим по формуле:

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{18} = 0,0001667 \text{ м}^3/\text{с}$$

где объём воды $W = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; время $t = 0,3$ минуты $= 0,3 \cdot 60 = 18 \text{ с}$

2. Площадь живого сечения определим по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,025)^2}{4} = 0,0004906 \text{ м}^2$$

3. Среднюю скорость воды в трубопроводе определяем по формуле:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,0001667}{0,0004906} = 0,3398 \text{ м/с}$$

4. По роду жидкости и температуре определяем кинематический коэффициент вязкости ν , $\text{см}^2/\text{с}$. Для различных жидкостей зависимость вязкости от температуры различна. Для воды она имеет вид:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad [\text{Ст}]$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости воды для заданной температуры t , $^\circ\text{C}$. По заданию температура воды $t^\circ = 30^\circ\text{C}$, следовательно, кинематический коэффициент вязкости будет равен:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot 30 + 0,000221 \cdot (30)^2} = \\ &= \frac{0,0178}{1 + 1,011 + 0,1989} = \frac{0,0178}{2,2099} = 0,008054 \quad [\text{Ст}] \end{aligned}$$

Или значение кинематического коэффициента вязкости можно посмотреть по Приложению 1 настоящих методических указаний.

5. Определяем число Рейнольдса.

Для упрощения вычислений все величины, входящие в формулу подставляются в см:

- средняя скорость движения потока воды в трубопроводе

$$V = 0,3398 \text{ м/с} = 33,98 \text{ см/с}$$

- диаметр $d = 25 \text{ мм} = 2,5 \text{ см}$

- кинематический коэффициент вязкости воды

$$\nu = 0,008054 \text{ Ст} = 0,008054 \text{ см}^2/\text{с}$$

Для круглоцилиндрических напорных труб число Рейнольдса определим по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{33,98 \cdot 2,5}{0,008054} = 10\,548$$

6. Для определения области гидравлического сопротивления воспользуемся таблицей:

Режим движения жидкости			
Ламинарный	Турбулентный		
	Гидравлически гладкие трубы	Гидравлически шероховатые трубы	
		Область докватричного сопротивления	Область квадратичного сопротивления
$Re < 2300$	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_3}$	$10 \frac{d}{\Delta_3} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_3}$	$500 \frac{d}{\Delta_3} < Re$
Формула Блазиуса $\lambda = \frac{64}{Re}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^1$	Формула Блазиуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^{1,75}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(Re, \Delta_3/d)$ $h_l \sim V^{1,75 \dots 2,00}$	Формула Шифринсона $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(\Delta_3/d)$ $h_l \sim V^2$

Определим границы областей гидравлического сопротивления:

2300

4000

$$10 \cdot \frac{d}{\Delta_3} = 10 \cdot \frac{25}{0,02} = 10 \cdot 1250 = 12\,500$$

$$500 \cdot \frac{d}{\Delta_3} = 500 \cdot \frac{25}{0,02} = 500 \cdot 1250 = 625\,000$$

Так как $4000 < Re = 10\,548 < 10 \frac{d_c}{\Delta_3} = 12\,500$, то получилась область гидравлического сопротивления – область гидравлически гладких труб, следовательно, коэффициент гидравлического трения необходимо подсчитать по формуле Блазиуса:

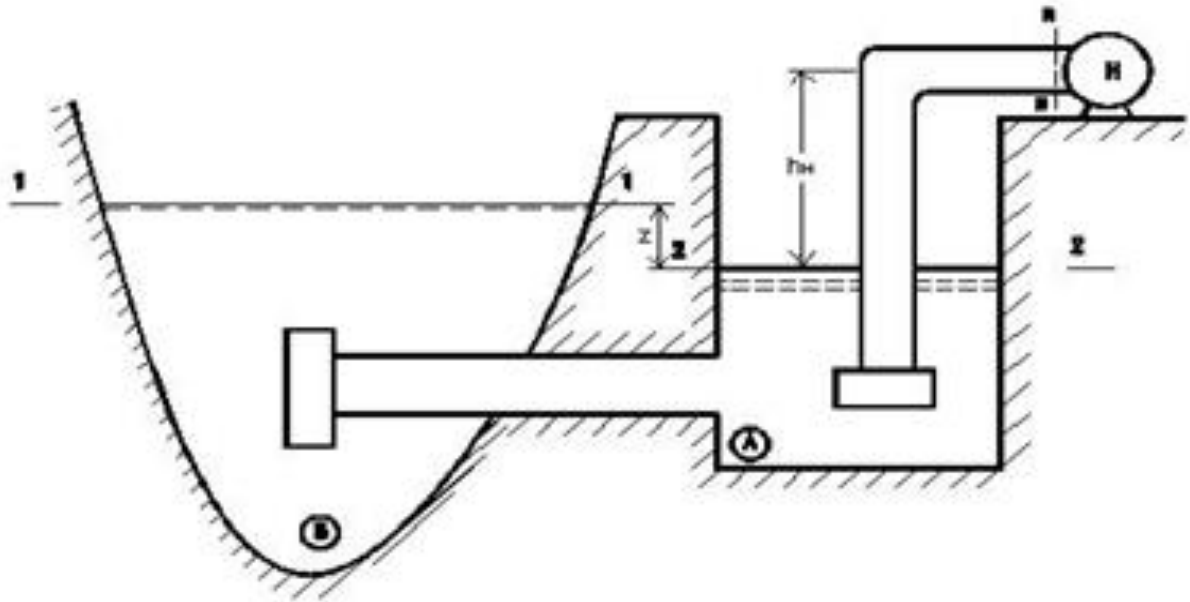
$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{(10\,548)^{0,25}} = \frac{0,3164}{10,134} = 0,0312$$

ОТВЕТ: область гидравлически гладких труб;

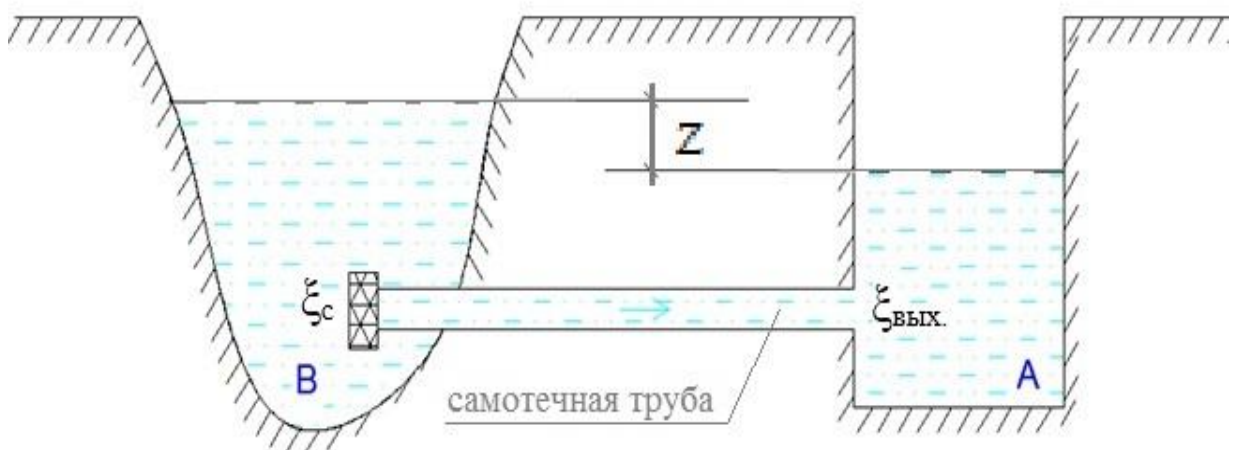
$$\lambda = 0,0312$$

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 6 «РАСЧЁТ КОРОТКИХ ТРУБОПРОВОДОВ»

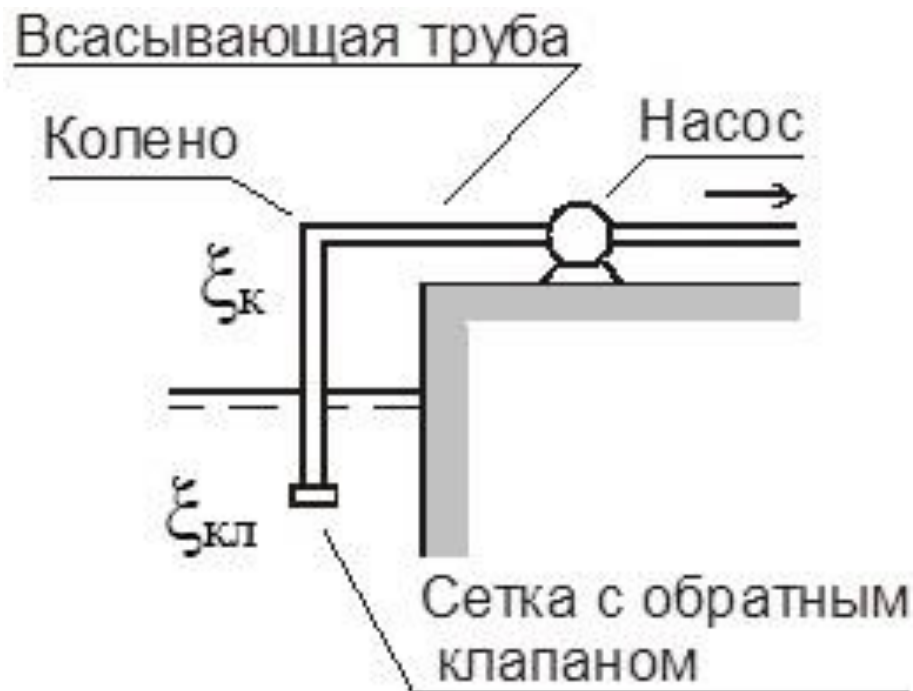
Вода в количестве Q , л/с, забирается насосом по всасывающей линии из берегового колодца **A**, который соединён с водоёмом **B** самотечной трубой.



Длина самотечной трубы составляет L_c , м, диаметр – d_c , мм Средняя шероховатость составляет $\Delta_c = 0,5$ мм. Коэффициент местного сопротивления сетки на самотечной трубе составляет ξ_c ; коэффициент местного сопротивления на выходе из самотечной трубы дан в справочной литературе. Корректив кинетической энергии $\alpha_c = 1,10$.



Длина всасывающей трубы составляет: вертикальная часть $L_{\text{вс.верт}}$, м, горизонтальная часть $L_{\text{вс.гор.}}$, м, диаметр $d_{\text{вс}}$, мм, средняя шероховатость составляет $\Delta_{\text{вс}} = 0,75$ мм. Коэффициент местного сопротивления сетки с обратным клапаном на всасывающей трубе составляет $\xi_{\text{кл}}$; коэффициент местного сопротивления колена по справочной литературе равен $\xi_{\text{к}} = 1,2$. Допустимая вакуумметрическая высота всасывания в трубопроводе перед входом в насос составляет: $H_{\text{вак.}}^{\text{доп.}} = 8,0$ м. Корректив кинетической энергии $\alpha_{\text{вс}} = 1,10$.



Необходимо:

для самотечной линии:

- 1) Определить z – разность уровней воды в водоёме и в колодце, м
- 2) Построить напорную и пьезометрическую линии для самотечной трубы

для всасывающей линии:

- 1) Определить $h_{\text{н}}$ – максимально допустимую высоту расположения оси насоса над уровнем воды в колодце, м
- 2) Построить напорную и пьезометрическую линии для всасывающей трубы насоса

Примечание:

1. Скоростями движения воды в сечениях на свободной поверхности воды в водоёме и в колодце следует пренебречь.
2. Температуру воды принять равной $t = 5^{\circ}\text{C}$.

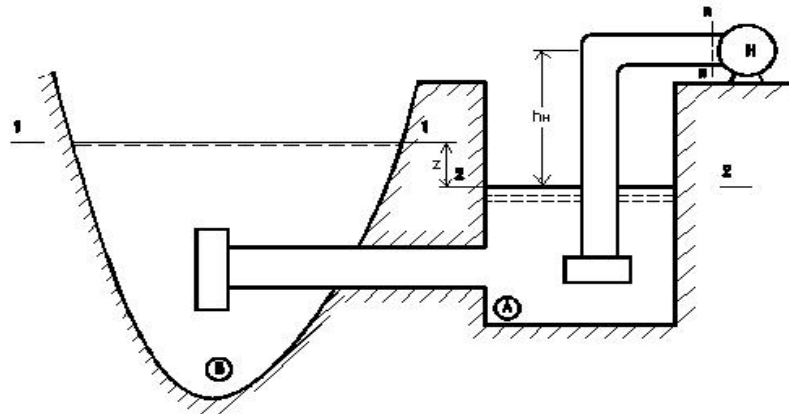
Варианты исходных данных для типовой задачи № 6

№ вар.	Q	d _c	l _c	ζ _c	d _{вс}	l _{вс. верт.}	l _{вс. гор.}	ζ _{кл}	H _{вак} ^{доп}
	л/с	мм	м	-	мм	м	м	-	м
1	120	350	50	1	325	10	9,0	5	8
2	14	125	25	9	100	10	2,0	5	8
3	65	250	55	2	200	10	3,0	3	8
4	45	250	35	8	175	10	3,5	3	8
5	30	200	15	3	100	10	4,0	2	8
6	35	200	51	4	175	10	8,0	5	8
7	125	350	20	13	200	10	7,0	2	8
8	16	150	64	5	100	10	2,0	4	8
9	8	110	35	12	65	10	3,0	3	8
10	6	110	46	8	50	10	1,5	2	8
11	50	300	30	6	250	10	4,0	6	8
12	90	300	20	10	275	10	5,0	5	8
13	45	225	36	7	150	10	2,5	4	8
14	40	225	50	11	125	10	1,5	3	8
15	25	175	18	8	100	10	8,0	2	8
16	20	175	20	6	160	10	4,5	6	8
17	110	350	60	14	250	10	2,5	4	8
18	12	125	45	1	110	10	5,0	5	8
19	65	275	50	9	200	10	9,0	4	8
20	65	275	35	4	200	10	4,0	4	8
21	25	200	55	5	110	10	6,0	3	8
22	25	200	15	3	110	10	3,0	3	8
23	10	110	13	10	90	10	3,0	5	8
24	6	110	25	5	90	10	3,0	6	8
25	18	150	46	7	100	10	5,5	4	8
26	100	325	14	12	300	10	5,0	5	8
27	150	250	30	1,5	225	10	4,5	7	8
28	120	250	40	2,5	200	10	4,0	6	8
29	175	300	50	0,5	275	10	6,0	5	8
30	180	300	60	2	250	10	6,7	4	8

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 6 «РАСЧЁТ КОРОТКИХ ТРУБОПРОВОДОВ»

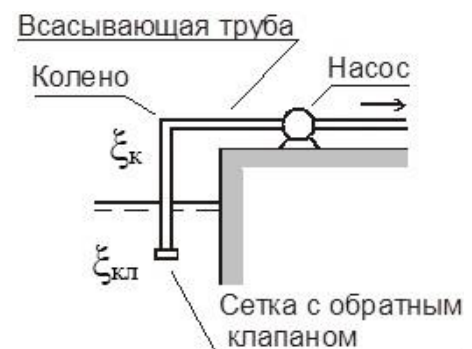
ВАРИАНТ № 0

Вода в количестве $Q=50$ л/с, забирается насосом по всасывающей линии из берегового колодца А, который соединён с водоёмом В самотечной трубой.



Длина самотечной трубы составляет $L_c=100$ м, диаметр самотечной трубы $d_c = 250$ мм. Средняя шероховатость составляет $\Delta_c = 0,2$ мм. Коэффициент местного сопротивления сетки на самотечной трубе составляет $\xi_c = 15$; коэффициент местного сопротивления на выходе из самотечной трубы дан в справочной литературе. Коэффициент кинетической энергии принять равным $\alpha_c = 1,1$.

Длина всасывающей трубы составляет $l_{вс} = 25$ м ($l_{вс.верт.} = 15$ м; $l_{вс.гор.} = 10$ м), диаметр всасывающей трубы $d_{вс} = 150$ мм; средняя шероховатость составляет $\Delta_{вс} = 0,2$ мм. Коэффициент местного сопротивления сетки с обратным клапаном на всасывающей трубе составляет $\xi_{кл} = 2,5$; коэффициент местного сопротивления колена $\xi_k = 1,5$. Допустимая вакуумметрическая высота всасывания в трубопроводе перед входом в насос составляет: $H_{вак.}^{доп.} = 8,00$ м. Коэффициент кинетической энергии принять равным $\alpha_{вс} = 1,1$



Необходимо:

для самотечной линии:

- 3) Определить z – разность уровней воды в водоёме и в колодце, м
- 4) Построить напорную и пьезометрическую линии для самотечной трубы

для всасывающей линии:

- 3) Определить h_n – максимально допустимую высоту расположения оси насоса над уровнем воды в колодце, м
- 4) Построить напорную и пьезометрическую линии для всасывающей трубы насоса

Примечание:

3. Скоростями движения воды в сечениях на свободной поверхности воды в водоёме и в береговом колодце можно пренебречь.
4. Температуру воды принять равной $t=20^\circ\text{C}$

Исходные данные: вариант № 0

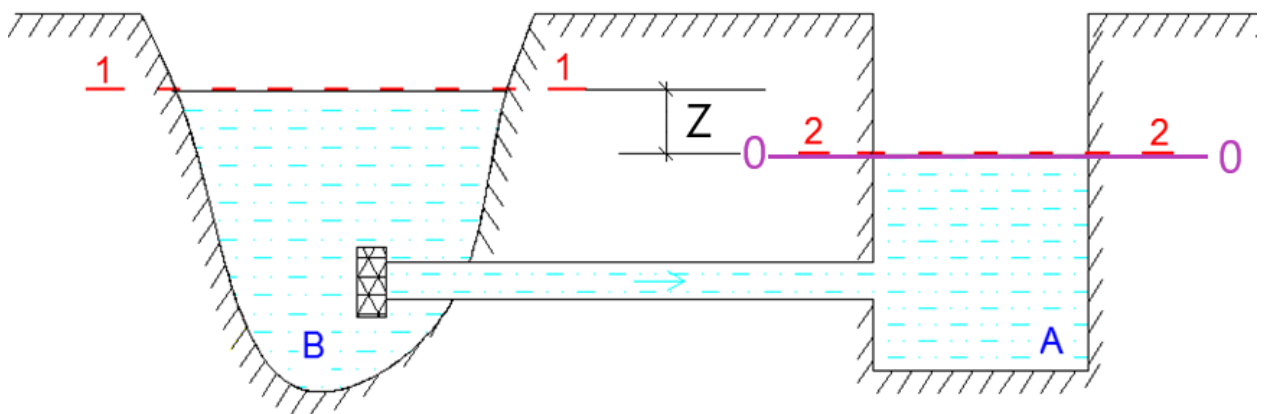
Наименование	обозначение	Единицы измерения СИ	Значение по заданию
Самотечная труба			
Расход воды	Q	$\text{м}^3/\text{с}$	0,050
Диаметр трубы	d_c	м	0,250
Средняя шероховатость трубы	Δ_c	м	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Длина самотечной трубы	l_c	м	100
Корректив кинетической энергии	α_c	-	1,10
Коэффициент местного сопротивления сетки на самотечной трубе	ξ_c	-	15
коэффициент местного сопротивления на выходе из самотечной трубы	$\xi_{\text{вых.}}$	-	1
Температура воды в водоёме	t	$^{\circ}\text{C}$	20
Всасывающая труба насоса			
Расход воды	Q	$\text{м}^3/\text{с}$	0,050
Диаметр трубы	$d_{\text{вс}}$	м	0,150
Средняя шероховатость трубы	$\Delta_{\text{вс}}$	м	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Длина всасывающей трубы, в том числе:	$l_{\text{вс.}}$	м	25
- длина вертикального участка всасывающей трубы	$l_{\text{вс.верт.}}$	м	15
- длина горизонтального участка всасывающей трубы	$l_{\text{вс.гор.}}$	м	10
Корректив кинетической энергии	$\alpha_{\text{вс}}$	-	1,10
Коэффициент местного сопротивления сетки с обратным клапаном на всасывающей трубе	$\xi_{\text{кл}}$	-	2,5
Коэффициент местного сопротивления колена	$\xi_{\text{к}}$	-	1,5
Температура воды в береговом колодце	t	$^{\circ}\text{C}$	20
Допустимая вакуумметрическая высота всасывания в трубопроводе перед входом в насос	$H_{\text{вак.}}^{\text{доп.}}$	м	8,00

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1) для самотечной линии определить Z – разность уровней воды в водоеме и в колодце, м

Чтобы определить разность уровней воды в береговом колодце А по отношению к уровню в водоеме В следует составить уравнение Даниила Бернулли для двух сечений потока.

Выберем сечение 1-1 на поверхности воды в водоеме и сечение 2-2 на поверхности воды в береговом колодце. Произвольную горизонтальную плоскость сравнения 0-0 проведём по уровню воды в береговом колодце:



Напишем уравнение Д.Бернулли для выбранных живых сечений 1-1 и 2-2 относительно выбранной плоскости сравнения 0-0:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w1-2}$$

Выразим члены уравнения Д.Бернулли:

Геометрическая высота: так как сечение 1-1 находится выше плоскости сравнения 0-0 на величину Z , то, следовательно, $Z_1 = Z$;

так как сечение 2-2 совпадает с плоскостью сравнения 0-0, то, следовательно, $Z_2 = 0$.

Пьезометрическая высота: так как давление на свободной поверхности воды в водоеме и в колодце равно атмосферному p_a , то

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} \quad \text{и} \quad \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma}$$

Скоростная высота: по условию задачи скорость на поверхности воды считается пренебрежимо малой, т.е. $V_1 = 0$ и $V_2 = 0$.

$$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \approx 0 \quad \text{и} \quad \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \approx 0$$

После проведенного анализа членов уравнения Д. Бернулли, получим следующий расчетный вид уравнения:

$$z + \frac{P_a}{\gamma} + 0 = 0 + \frac{P_a}{\gamma} + 0 + h_{w1-2}$$

После сокращений, получим

$$Z = h_{w1-2} \quad (*)$$

где h_{w1-2} - потери напора при движении воды по самотечной трубе.

Т.к. самотечная труба рассматривается как короткий трубопровод, то при их расчете учитываются оба вида потерь напора: местные и по длине.

$$h_{w1-2} = h_m + h_\ell$$

где h_m - потери напора в местных сопротивлениях (в сетке и на выходе из трубы) вычисляются по формуле Вейсбаха;

h_ℓ - потери напора по длине в самотечной линии, которые возникают за счет трения жидкости о стенки трубы, определяются по формуле Вейсбаха-Дарси.

$$h_{w1-2} = h_c + h_{lc} + h_{\text{ВЫХ.}} = \xi_c \frac{V_c^2}{2g} + \lambda_c \cdot \frac{l_c}{d_c} \cdot \frac{V_c^2}{2g} + \xi_{\text{ВЫХ.}} \cdot \frac{V_c^2}{2g}$$

где

V_c - средняя скорость движения воды по самотечной трубе, м/с;

$$V_c = \frac{Q}{\omega} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_c^2} = \frac{4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})}{3,14 \cdot (250 \cdot 10^{-3})^2} = 1,02 \text{ м/с}$$

$g=9,82 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

ξ_c - коэффициент местного сопротивления на сетке (по исходным данным $\xi_c = 15$),

$\xi_{\text{ВЫХ.}}$ - коэффициент местного сопротивления на выходе из трубы (по справочной литературе $\xi_{\text{ВЫХ.}} = 1$),

l_c - длина самотечного трубопровода (по исходным данным $l_c = 100 \text{ м}$);

d_c - диаметр самотечного трубопровода (по исходным данным $d_c = 250 \text{ мм}$);

λ_c - коэффициент гидравлического трения.

Коэффициент гидравлического трения определяется по эмпирической формуле в зависимости от области гидравлического сопротивления (ПРИЛОЖЕНИЕ 2). Область гидравлического трения определяется по числу

Рейнольдса и относительной гладкости трубы $\frac{d}{\Delta}$.

Re_c - число Рейнольдса на участке самотечной трубы (данные для расчёта подставляем в [см]: $V_c = 1,02 \text{ м/с} = 102 \text{ см/с}$; $d_c = 250 \text{ мм} = 25 \text{ см}$; ν - кинематический коэффициент вязкости.

Значения кинематического коэффициента вязкости для воды.

Температура, °C	Кинематический коэффициент вязкости, см ² /с
	вода
20	0,01010

Согласно ПРИЛОЖЕНИЮ 1 для 20°C коэффициент $\nu = 0,01010 \text{ см}^2/\text{с}$

$$Re_c = \frac{V_c \cdot d_c}{\nu} = \frac{102 \cdot 25}{0,01010} = 252\,475$$

Определим область гидравлического сопротивления:

$$10 \cdot \frac{d_c}{\Delta_э} = 10 \cdot \frac{250}{0,2} = 10 \cdot 1250 = 12\,500$$

$$500 \cdot \frac{d_c}{\Delta_э} = 500 \cdot \frac{250}{0,2} = 500 \cdot 1250 = 625\,000$$

Режим движения жидкости			
Ламинарный	Турбулентный		
	Гидравлически гладкие трубы	Гидравлически шероховатые трубы	
		Область доквадратичного сопротивления	Область квадратичного сопротивления
$Re < 2300$	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_э}$	$10 \frac{d}{\Delta_э} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_э}$	$500 \frac{d}{\Delta_э} < Re$
Формула Блазиуса $\lambda = \frac{64}{Re}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^1$	Формула Блазиуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^{1,75}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(Re, \Delta_э/d)$ $h_l \sim V^{1,75...2,00}$	Формула Шифринсона $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(\Delta_э/d)$ $h_l \sim V^2$

Так как $10 \frac{d_c}{\Delta_э} = 12\,500 < Re = 252\,475 < 500 \frac{d_c}{\Delta_э} = 625\,000$, то получилась область гидравлического сопротивления – **доквадратичная область гидравлического сопротивления**, следовательно, коэффициент гидравлического трения необходимо подсчитать по формуле Альтшуля:

$$\lambda_c = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d_c} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{252\,475} + \frac{0,2}{250} \right)^{0,25} = 0,020$$

Зная коэффициент местного сопротивления на сетке ($\xi_c = 15$), коэффициент гидравлического трения самотечной трубы ($\lambda_c = 0,020$) и коэффициент местного сопротивления на выходе из трубы ($\xi_{\text{вых.}} = 1$), потери напора в самотечной линии составят:

$$\begin{aligned}h_{w1-2} &= h_c + h_{lc} + h_{\text{вых.}} = \xi_c \frac{V_c^2}{2g} + \lambda_c \cdot \frac{l_c}{d_c} \cdot \frac{V_c^2}{2g} + \xi_{\text{вых.}} \cdot \frac{V_c^2}{2g} = \\ &= 15 \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} + 0,020 \cdot \frac{100}{0,250} \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} + 1 \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} = \\ &= 1,26 \text{ м}\end{aligned}$$

Таким образом, разница уровней воды в водоёме и береговом колодце составит, м:

$$Z = h_{w1-2} = 1,26 \text{ м}$$

ОТВЕТ: Z=1,26 м

2) построить напорную линию Н-Н и пьезометрическую линию Р-Р для самотечной трубы.

Линии строятся на мм формата А4.

Напорная линия Н-Н представляет собой график распределения напора по длине.

В пределах водоема и берегового колодца напорная линия совпадает с линией поверхности воды, т.к. скоростью в сечениях на свободной поверхности воды в водоёме и в береговом колодце пренебрегаем.

При входе в самотечную трубу напор скачкообразно (вертикально вниз) уменьшается на величину потери напора на сетке самотечной трубы:

$$h_c = \xi_c \frac{V_c^2}{2g} = 15 \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,79 \text{ м}$$

В плоскости входного сечения в самотечную трубу откладываем эту величину вертикально вниз от уровня воды в водоеме.

Далее происходит потеря по длине, которая в конце участка самотечной трубы достигает величины:

$$h_l = \lambda_c \cdot \frac{l_c}{d_c} \cdot \frac{V_c^2}{2g} = 0,020 \cdot \frac{100}{0,250} \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,42 \text{ м}$$

Для построения напорной линии с учетом потери напора по длине поступаем следующим образом. Из конца вертикального отрезка h_c проводим горизонтальную линию и в конце участка самотечной трубы откладываем от нее вниз величину h_{lc} и соединяем наклонной линией концы отрезков h_c и h_{lc}

В выходном сечении самотечного трубопровода происходит местная потеря на выходе, поэтому откладываем вертикально вниз величину:

$$h_{\text{ВЫХ}} = \xi_{\text{ВЫХ}} \frac{V_c^2}{2g} = 1 \cdot \frac{(1,02)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,05 \text{ м}$$

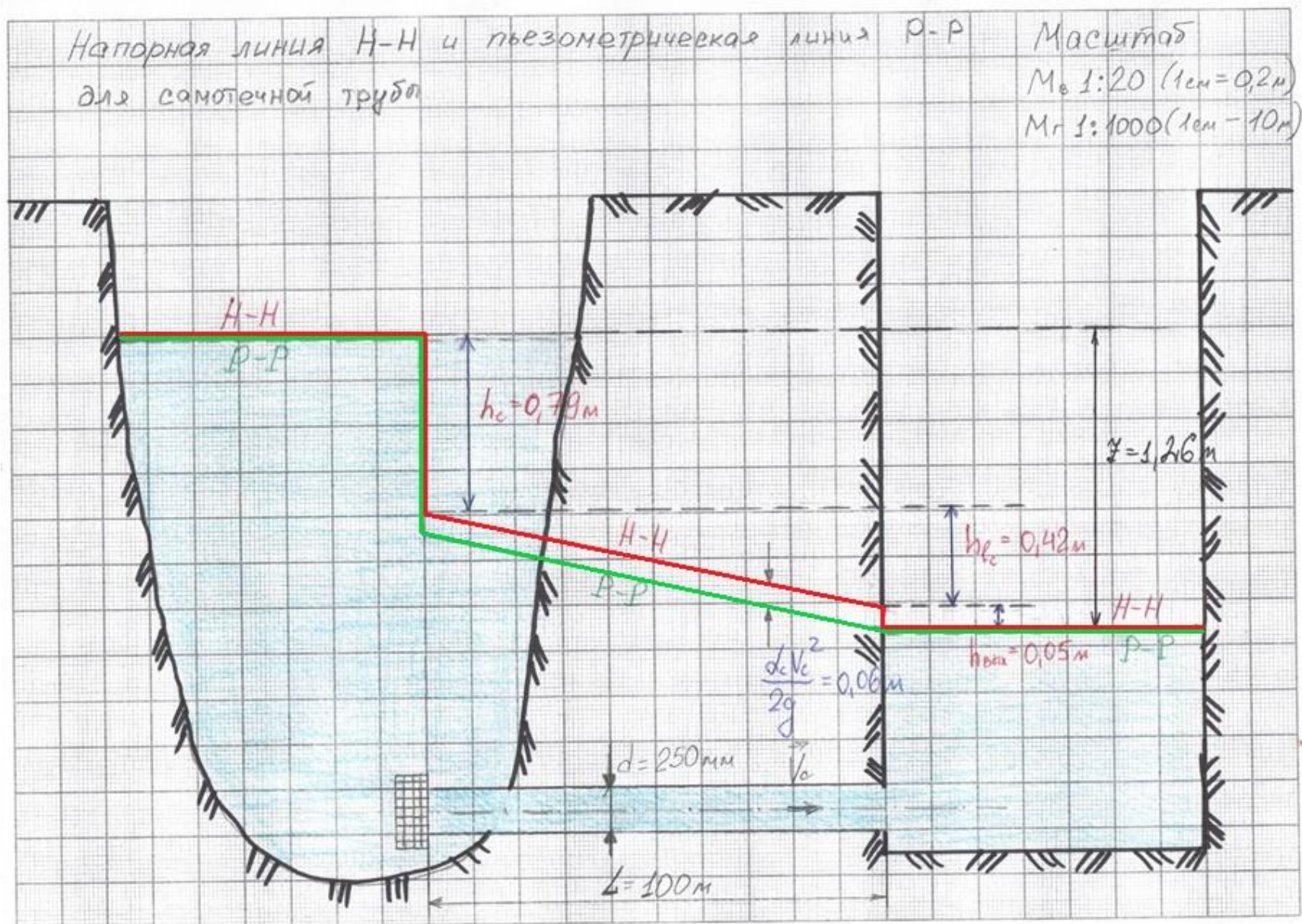
Пьезометрическая линия Р-Р будет располагаться ниже напорной Н-Н на величину скоростной высоты $\frac{\alpha_c \cdot V_c^2}{2g} = \frac{1,1 \cdot (1,02)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,06 \text{ м}$

Проверка № 1:

$$\left. \begin{aligned} \sum h &= h_c + h_{lc} + h_{\text{ВЫХ.}} \\ &= 0,79 + 0,42 + 0,05 = \\ &= 1,26 \text{ м} \end{aligned} \right| \Delta_1 = 1,26 - 1,26 = 0 \text{ м} \leq 0,05 \text{ м}$$

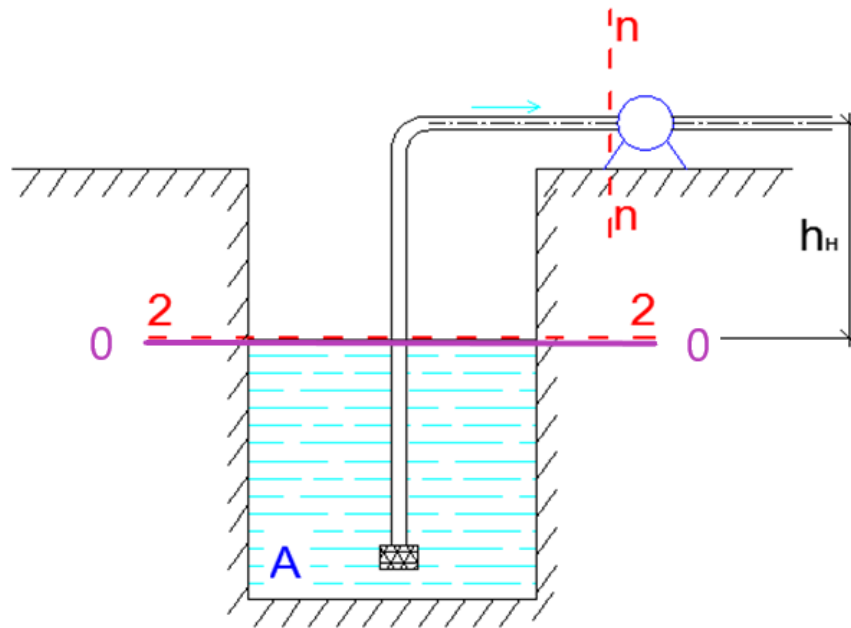
Условие выполнено

$h_{w1-2} = 1,26 \text{ м}$



3) для всасывающей линии определить h_n – максимально допустимую высоту расположения оси насоса над уровнем воды в колодце, м

Для определения высоты расположения насоса над уровнем воды в береговом колодце следует составить уравнение Д. Бернулли для двух сечений. Выберем сечение 2-2 на поверхности воды в береговом колодце А и n-n – сечение перед насосом. Произвольную горизонтальную плоскость сравнения 0-0 проведем по уровню воды в береговом колодце.



Напишем уравнение Д.Бернулли для выбранных живых сечений 2-2 и n-n относительно выбранной плоскости сравнения 0-0:

$$z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = z_n + \frac{p_n}{\gamma} + \frac{\alpha_n V_n^2}{2g} + h_{w2-n}$$

Геометрическая высота:

так как сечение 2-2 совпадает с плоскостью сравнения 0-0, то, следовательно, $Z_2 = 0$

так как сечение n-n находится выше плоскости сравнения 0-0 на величину h_n , то, следовательно, $Z_n = h_n$

Пьезометрическая высота:

так как давление на свободной поверхности воды в береговом колодце равно атмосферному p_a , то, следовательно $p_2 = p_a$

$p_n = p_n$ - давление в сечении n-n;

Скоростная высота:

по условию задачи скорость на поверхности воды считается пренебрежимо

малой, следовательно, $\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \approx 0$

$V_n = V_{sc}$ – скорость движения воды во всасывающей трубе

После проведенного анализа членов уравнения Д. Бернулли, получим следующий расчетный вид уравнения:

$$0 + \frac{p_a}{\gamma} + 0 = h_n + \frac{p_n}{\gamma} + \frac{\alpha_{вс} V_{вс}^2}{2g} + h_{w_{вс}}$$

или

$$\frac{p_a}{\gamma} = h_n + \frac{p_n}{\gamma} + \frac{\alpha_{вс} V_{вс}^2}{2g} + h_{w_{вс}}$$

Перенесём в левую часть $\frac{p_n}{\gamma}$, получим величину вакуума в сечении n-n:

$$\frac{p_a - p_n}{\gamma} = \frac{P_{вак}}{\gamma} = h_{вак}$$

Таким образом, окончательно расчетное выражение будет иметь вид:

$$h_{вак} = h_n + \frac{\alpha_{вс} V_{вс}^2}{2g} + h_{w_{вс}}$$

Откуда определяем h_n – максимально допустимую высоту расположения оси насоса над уровнем воды в колодце, м, по формуле:

$$h_n = h_{вак} - \frac{\alpha_{вс} V_{вс}^2}{2g} - h_{w_{вс}} \quad (**)$$

$h_{вак}$ – допустимая вакуумметрическая высота всасывания во всасывающей трубе, м, $h_{вак} = H_{вак. доп.} = 8,00$ м вод. ст.;

$h_{w_{вс}}$ - потери напора во всасывающей трубе:

$$h_{w_{вс}} = h_{m_{вс}} + h_{l_{вс}};$$

$h_{m_{вс.}} = \xi_{кл} \cdot \frac{V_{вс}^2}{2g} + \xi_{к} \cdot \frac{V_{вс}^2}{2g}$ - местные потери напора на всасывающей трубе (на всасывающей сетке и в колене);

$h_{l_{вс}}$ - потери напора по длине на всасывающейся трубе:

$$h_{l_{вс.}} = \lambda_{вс} \cdot \frac{l_{вс}}{d_{вс}} \cdot \frac{V_{вс}^2}{2g}$$

$V_{вс.}$ – скорость движения воды во всасывающей трубе, м/с, определяется по формуле:

$$V_{вс} = \frac{Q}{\omega} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{вс}^2} = \frac{4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})}{3,14 \cdot (150 \cdot 10^{-3})^2} = 2,83 \text{ м/с}$$

Коэффициент гидравлического трения $\lambda_{\text{вс}}$ может быть определен по эмпирической формуле в соответствии с определённой областью гидравлического сопротивления (ПРИЛОЖЕНИЕ 2).

$Re_{\text{вс}}$ - число Рейнольдса на участке всасывающей трубы насоса (данные для расчёта подставляем в [см]: $V_{\text{с}} = 2,83 \text{ м/с} = 283 \text{ см/с}$; $d_{\text{с}} = 150 \text{ мм} = 15 \text{ см}$; ν - кинематический коэффициент вязкости.

Значения кинематического коэффициента вязкости для воды.

Температура, °С	Кинематический коэффициент вязкости, см ² /с
	вода
20	0,01010

Согласно ПРИЛОЖЕНИЮ 1 для 20°С коэффициент $\nu=0,01010 \text{ см}^2/\text{с}$)

$$Re_{\text{вс}} = \frac{V_{\text{вс}} \cdot d_{\text{вс}}}{\nu} = \frac{283 \cdot 15}{0,01010} = 420\,297$$

Определим область гидравлического сопротивления:

$$10 \cdot \frac{d_{\text{вс}}}{\Delta_{\text{э}}} = 10 \cdot \frac{150}{0,2} = 7\,500$$

$$500 \cdot \frac{d_{\text{вс}}}{\Delta_{\text{э}}} = 500 \cdot \frac{150}{0,2} = 375\,000$$

Режим движения жидкости			
Ламинарный	Турбулентный		
	Гидравлически гладкие трубы	Гидравлически шероховатые трубы	
		Область доквадратичного сопротивления	Область квадратичного сопротивления
$Re < 2300$	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}}$	$10 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}}$	$500 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}} < Re$
$\lambda = \frac{64}{Re}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^1$	Формула Блазиуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^{1,75}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(Re, \Delta_{\text{э}}/d)$ $h_l \sim V^{1,75 \dots 2,00}$	Формула Шифринсона $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(\Delta_{\text{э}}/d)$ $h_l \sim V^2$

Так как $500 \frac{d_{\text{с}}}{\Delta_{\text{э}}} = 375\,000 < Re = 420\,297$, то получилась область гидравлического сопротивления – **квадратичная область гидравлического сопротивления**, следовательно, коэффициент гидравлического трения необходимо подсчитать по формуле Шифринсона:

$$\lambda_{\text{вс}} = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d_c}\right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,2}{150}\right)^{0,25} = 0,021$$

Зная коэффициент местного сопротивления на всасывающем клапане ($\xi_{\text{кл}} = 2,5$), коэффициент гидравлического трения всасывающей трубы насоса ($\lambda_{\text{вс}} = 0,021$) и коэффициент местного сопротивления на повороте трубы 90° (т.е. в колене) ($\xi_{\text{к}} = 1,5$), потери напора во всасывающей трубе насоса составят, м:

$$\begin{aligned} h_{w2-n} = h_{w\text{вс.}} &= \xi_{\text{кл}} \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} + \lambda_{\text{вс}} \cdot \frac{l_{\text{вс}}}{d_{\text{вс}}} \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} + \xi_{\text{к}} \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} = \\ &= 2,5 \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} + 0,021 \cdot \frac{(15 + 10)}{0,150} \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} + 1,5 \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = \\ &= 3,06 \text{ м} \end{aligned}$$

Подставив в выражение (**) значения вакуума, скоростной высоты $\frac{V_{\text{вс}}^2}{2g}$ и потери напора во всасывающей трубе, получим максимальную величину высоты расположения оси насоса над уровнем воды в береговом колодце – $h_{\text{н}}$:

$$h_{\text{н}} = H_{\text{вак.}}^{\text{доп.}} - \frac{\alpha_{\text{вс}} \cdot V_{\text{вс}}^2}{2g} - h_{w\text{вс.}} = 8,00 - \frac{1,1 \cdot (2,83)^2}{2 \cdot 9,82} - 3,06 = 4,49 \text{ м}$$

ОТВЕТ: $h_{\text{н}} \leq 4,49 \text{ м}$

4) построить напорную линию Н-Н и пьезометрическую линию Р-Р для всасывающей трубы насоса

Линии строятся на мм формата А4.

В пределах берегового колодца напорная линия Н-Н совпадает с линией поверхности воды, т.к. скоростью в сечении на свободной поверхности воды в береговом колодце пренебрегаем.

При входе во всасывающую трубу напор скачкообразно (вертикально вниз) уменьшается на величину местных потерь напора:

- на всасывающем клапане: $h_{\text{кл.}} = \xi_{\text{кл}} \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} = 2,5 \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = 1,02 \text{ м}$

- по длине на вертикальном участке всасывающей линии:

$$h_{l_{\text{вс.верт.}}} = \lambda_{\text{вс}} \cdot \frac{l_{\text{вс.верт.}}}{d_{\text{вс}}} \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} = 0,021 \cdot \frac{15}{0,150} \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,86 \text{ м}$$

- и местные потери напора в колене: $h_{\text{к}} = \xi_{\text{к}} \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} = 1,5 \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,61 \text{ м}$

Далее происходит потеря по длине, которая в конце горизонтального участка всасывающей трубы достигает величины:

$$h_{l_{\text{вс.гор.}}} = \lambda_{\text{вс}} \cdot \frac{l_{\text{вс.гор.}}}{d_{\text{вс}}} \cdot \frac{V_{\text{вс}}^2}{2g} = 0,021 \cdot \frac{10}{0,150} \cdot \frac{(2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,57 \text{ м}$$

Пьезометрическая линия Р-Р будет располагаться ниже напорной Н-Н на величину скоростной высоты $\frac{\alpha_{\text{вс}} V_{\text{вс}}^2}{2g} = \frac{1,1 \cdot (2,83)^2}{2 \cdot 9,82} = 0,45 \text{ м}$

Проверка № 2:

$$\sum h = h_{\text{кл.}} + h_{l_{\text{вс.верт.}}} + h_{\text{к}} + h_{l_{\text{вс.гор.}}} = 1,02 + 0,86 + 0,61 + 0,57 = 3,06 \text{ м}$$

$$\Delta_2 = 3,06 - 3,06 = 0 \text{ м} \leq 0,05 \text{ м}$$

Условие выполнено

$$h_{w2-n} = 3,06 \text{ м}$$

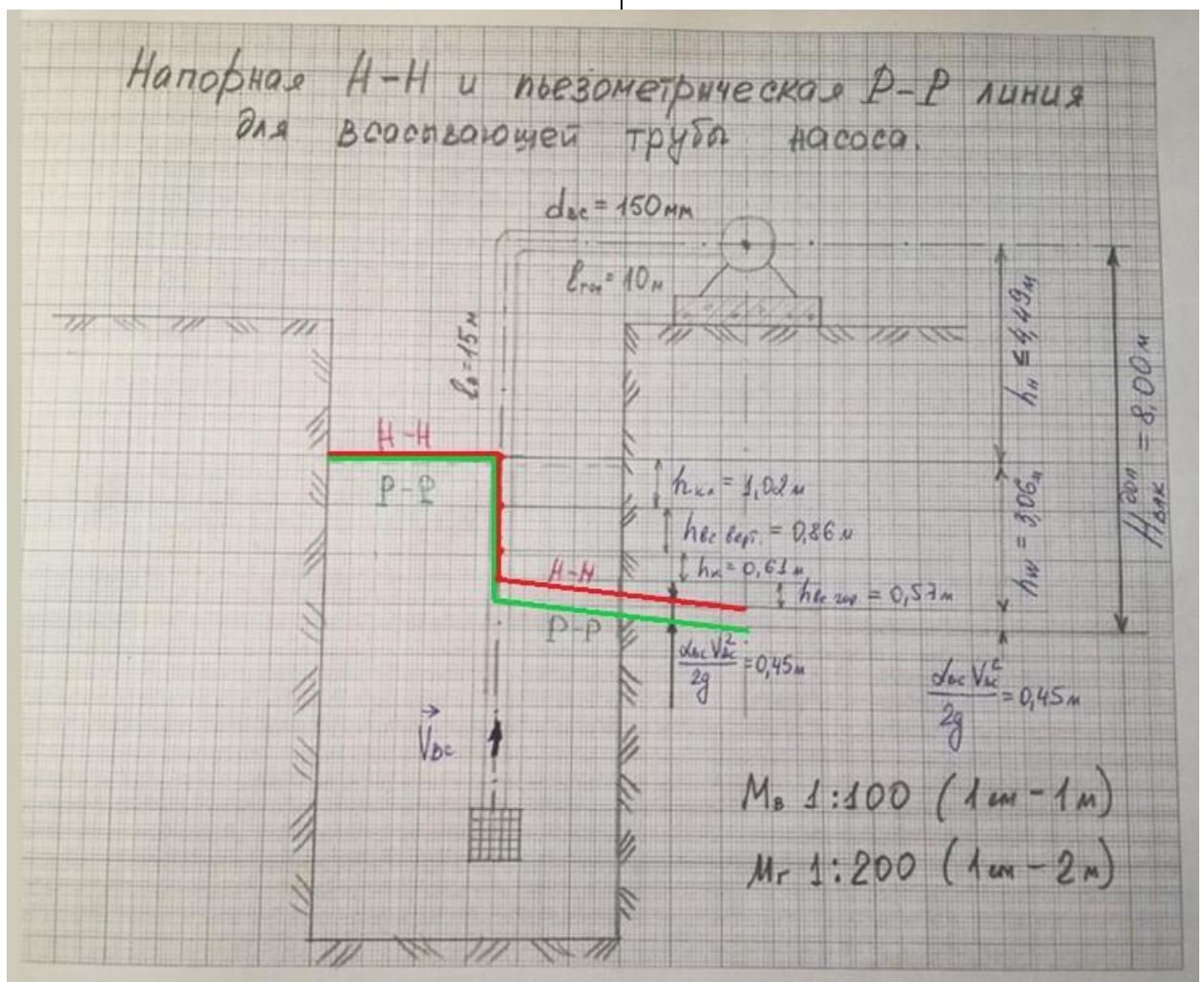
Проверка № 3:

$$h_{\text{н}} + \frac{\alpha_{\text{вс}} V_{\text{вс}}^2}{2g} + h_{w\text{вс}} = 4,49 + 0,45 + 3,06 = 8,00 \text{ м}$$

$$\Delta_3 = 8,00 - 8,00 = 0 \text{ м} \leq 0,05 \text{ м}$$

Условие выполнено

$$H_{\text{вак}}^{\text{доп}} = 8,00 \text{ м}$$



ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 7 «ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР»

По трубопроводу длиной L , м, диаметром d , мм, и толщиной стенок трубы, δ , мм, перекачивается вода с расходом Q , л/с. Давление в трубопроводе составляет p_0 , м вод.ст.



Требуется:

1. Определить повышение давления в трубопроводе, если время закрывания задвижки составит t_3 , сек.
2. Найти максимально допустимое давление для данного трубопровода, если допустимое напряжение стенок на разрыв составляет $[\sigma]$, МПа.
3. Сделать вывод о влиянии ГУ на трубопровод.

Значения констант принять следующие:

$$E_{\text{ж}} = 20'700 \text{ кгс/см}^2$$

$$E_{\text{тр.}} = 2 \times 10^6 \text{ кгс/см}^2$$

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 98,1 \text{ кПа} = 98,1 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 1000 \cdot 9,81 = 9'810 \text{ Н/м}^3$$

$$1 \text{ м.вод.ст} = 9,80665 \text{ кПа}$$

Варианты исходных данных для типовой задачи № 7

№	L	d	δ	Q	p ₀	t _з	[σ]
вар.	м	мм	мм	л/с	м вод.ст.	сек.	МПа
1	500	900	5,8	600	40	0,50	90
2	800	850	6,2	505	25	3,00	48
3	600	800	9,3	450	30	1,00	50
4	1500	750	8,5	400	60	3,30	60
5	500	700	5,3	380	40	0,90	80
6	700	650	4,8	120	45	2,30	42
7	900	600	7,1	180	55	1,50	50
8	1200	550	13,6	180	50	3,50	20
9	2000	500	10,3	225	60	2,10	45
10	1400	450	5,6	208	35	3,80	48
11	1300	400	8,1	222	70	1,90	65
12	2500	350	9,2	200	75	4,50	55
13	1600	300	10,8	250	80	2,30	70
14	600	250	9,8	189	90	3,10	30
15	2200	200	11,1	100	20	2,80	37
16	800	150	2,0	50	20	3,50	54
17	1200	100	6,2	20	25	1,60	27
18	600	125	3,3	40	30	4,50	20
19	1500	150	8,9	60	35	2,20	40
20	500	175	4,0	80	40	0,90	75
21	700	215	4,8	120	45	0,90	90
22	900	315	7,0	150	50	1,80	50
23	1200	425	13,6	275	55	1,80	45
24	2000	475	10,3	300	60	4,00	51
25	1400	525	5,6	350	65	1,90	100
26	1300	575	6,7	361	70	2,80	82
27	2500	625	8,0	404	75	4,50	80
28	1600	675	12,5	444	80	3,30	50
29	600	725	9,8	500	85	1,00	75
30	2200	775	10,0	600	90	4,40	80

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 7 «ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР»

Исходные данные:

ВАРИАНТ № 0

Наименование	обозначение	Единицы измерения СИ	Значение по заданию
Длина трубопровода	L	м	500
Диаметр трубопровода	d	м	1,0
Толщина стенок трубопровода	δ	м	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Расход воды в трубопроводе	Q	м ³ /с	0,350
Рабочее давление в трубопроводе	p ₀	кПа	441,299
Время закрытия задвижки	t _з	сек	2,00
Допустимое напряжение стенок трубопровода на разрыв	[σ]	кПа	$60 \cdot 10^3$
Модуль упругости жидкости	E _ж	кПа	2 030 670
Модуль упругости стенок трубы	E _{тр.}	кПа	$196,2 \cdot 10^6$
Вес единицы объёма жидкости	γ	Н/м ³	9810

$$1 \text{ м.вод.ст} = 9,80665 \text{ кПа}$$

$$45 \text{ м.вод.ст} = 45 \cdot 9,80665 = 441,299 \text{ кПа}$$

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 98,1 \text{ кПа} = 98,1 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$E_{\text{ж}} = 20\,700 \text{ кгс/см}^2 = 20\,700 \cdot 98,1 = 2\,030\,670 \text{ кПа}$$

$$E_{\text{тр.}} = 2 \times 10^6 \text{ кгс/см}^2 = 2 \times 10^6 \cdot 98,1 = 196,2 \times 10^6 \text{ кПа}$$

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1) Определяется скорость распространения ударной волны c , м/с, по формуле:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж} \cdot g}{\gamma}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} \cdot d}{E_{тр.} \cdot \delta}}} = \frac{\sqrt{\frac{2\,030\,670 \times 10^3 \cdot 9,82}{9810}}}{\sqrt{1 + \frac{2\,030\,670 \times 10^3}{196,2 \times 10^6 \times 10^3} \cdot \frac{d}{\delta}}} = \frac{1425,74}{\sqrt{1 + 0,01035 \cdot \frac{d}{\delta}}}$$

где $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости, Па; $E_{тр.}$ – модуль упругости стенок трубы, Па; d – диаметр трубы, м; δ – толщина стенок трубы, м

$$c = \frac{1425,74}{\sqrt{1 + 0,01035 \cdot \frac{d}{\delta}}} = \frac{1425,74}{\sqrt{1 + 0,01035 \cdot \frac{1,0}{4,9 \cdot 10^{-3}}}} = \frac{1425,74}{1,7642} = 808,15 \text{ м/с}$$

2) Определяется фаза ударной волны t_0 , с, по формуле:

$$t_0 = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 500}{808,15} = 1,24 \text{ с}$$

где L – длина трубопровода, м; по заданию $L=500$ м;

c – скорость распространения ударной волны, м/с

3) Определяется тип гидравлического удара в зависимости от соотношения времени открытия задвижки и фазы гидравлического удара:

$t_0 > t_3$ – прямой

$t_0 < t_3$ – не прямой

где t_0 – фаза ударной волны, сек; t_3 – время закрытия задвижки, с

В задаче $t_3 = 2,0$ с,

Так как $t_3 = 2,0 \text{ с} > t_0 = 1,24 \text{ с}$ – следовательно, тип гидравлического удара - **непрямой** гидравлический удар.

4) Определяется давление p , Па, в трубопроводе по формуле:

$$p = p_0 + \Delta p_{уд.}$$

где p_0 – рабочее давление в трубопроводе, Па; $\Delta p_{уд.}$ – ударное давление, Па, определяется в зависимости от типа гидравлического удара:

а. при прямом гидравлическом ударе: $\Delta p_{уд.} = \rho \cdot \Delta V \cdot c$

b. при непрямом гидравлическом ударе: $\Delta p_{уд.} = \rho \cdot \Delta V \cdot c \cdot \frac{t_0}{t_3}$

где ρ – плотность воды ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$);

$\Delta V = V_0 - V_{кон.}$ – изменение скорости движения потока жидкости, м/с,

где

$V_0 = \frac{Q}{\omega}$ – средняя скорость движения потока жидкости по трубопроводу в начальный момент времени, м/с; ω – площадь живого сечения трубы, м^2 ;

$V_{кон.}$ – конечная скорость движения потока жидкости, ($V_{кон.} = 0$ м/с);

t_0 – фаза ударной волны, с; t_3 – время закрытия задвижки, с.

Площадь живого сечения трубы: $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1,0)^2}{4} = 0,785 \text{ м}^2$

Средняя скорость движения воды: $V_0 = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,350}{0,785} = 0,46 \text{ м/с}$

Изменение скорости движения потока жидкости:

$$\Delta V = V_0 - V_{кон.} = 0,46 - 0 = 0,46 \text{ м/с}$$

Так как тип гидравлического удара получился непрямым, то повышение давления в трубопроводе подсчитывается по формуле:

$$\Delta p_{уд.} = \rho \cdot \Delta V \cdot c \cdot \frac{t_0}{t_3} = 1000 \cdot 0,46 \cdot 808,15 \cdot \frac{1,24}{2,00} = 230\,484 \text{ Па} = 230,484 \text{ кПа}$$

Повышенное давление p , Па, в трубопроводе составит:

$$p = p_0 + \Delta p_{уд.} = 441,299 \text{ кПа} + 230,484 \text{ кПа} = 671,783 \text{ кПа}$$

5) Максимально допустимое давление для данного трубопровода подсчитывается по формуле: $p_{max} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \delta}{d}$, [Па]

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение стенок трубопровода на разрыв, Па;

d – диаметр трубы, м; δ – толщина стенок трубы, м.

$$p_{max} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \delta}{d} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 10^3 \text{ кПа} \cdot 4,9 \text{ мм}}{1000 \text{ мм}} = 588 \text{ кПа}$$

б) Определяется влияние гидравлического удара на трубопровод:

a. если $p < p_{max}$, то опасности для трубопровода нет

b. если $p > p_{max}$, то трубопровод может разорваться при ГУ. Необходимо предпринимать меры против ГУ.

Так как $p = 672 \text{ кПа} > p_{max} = 588 \text{ кПа}$, **есть опасность** повреждения трубопровода при гидравлическом ударе.

Если существует опасность для трубопровода – разрушение стенок трубы при гидравлическом ударе, то необходимо увеличить толщину стенок трубы δ и пересчитать с п.1

1. увеличиваем толщину стенок трубы на 1 мм:

$$\delta' = \delta + 1 \text{ мм} = 4,9 + 1 = 5,9 \text{ мм}$$

2. определяем скорость распространения ударной волны:

$$c = \frac{1425,74}{\sqrt{1 + 0,01035 \cdot \frac{d}{\delta}}} = \frac{1425,74}{\sqrt{1 + 0,01035 \cdot \frac{1,0}{5,9 \cdot 10^{-3}}}} = \frac{1425,74}{1,6596} = 859,09 \text{ М/с}$$

3. определяем фазу ударной волны t_0 , с, по формуле:

$$t_0 = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 500}{859,09} = 1,16 \text{ с}$$

4. определяем тип гидравлического удара: так как $t_3 = 2,0 \text{ с} > t_0 = 1,16 \text{ с}$ – следовательно, тип гидравлического удара - **непрямой** гидравлический удар.

5. так как тип гидравлического удара получился непрямой, то повышение давления в трубопроводе подсчитаем по формуле:

$$\Delta p_{уд.} = \rho \cdot \Delta V \cdot c \cdot \frac{t_0}{t_3} = 1000 \cdot 0,46 \cdot 859,09 \cdot \frac{1,16}{2,00} = 229\,205 \text{ Па} = 229,205 \text{ кПа}$$

6. давление p , Па, в трубопроводе составит:

$$p = p_0 + \Delta p_{уд.} = 441,299 \text{ кПа} + 229,205 \text{ кПа} = 670,504 \text{ кПа}$$

7. максимально допустимое давление при увеличении стенок трубы на 1 мм $\delta' = 5,9 \text{ мм}$ будет равно:

$$p_{max} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \delta}{d} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 10^3 \text{ кПа} \cdot 5,9 \text{ мм}}{1000 \text{ мм}} = 708 \text{ кПа}$$

8. так как $p = 671 \text{ кПа} < p_{max} = 708 \text{ кПа}$, то **нет опасности** повреждения трубопровода при гидравлическом ударе.

7) Минимально допустимое время закрывания задвижки определяется по формуле:

$$T_{min} = \frac{\rho \cdot V_0 \cdot c \cdot t_0}{p_{max}}, [c]$$

$$T_{min} = \frac{\rho \cdot V_0 \cdot c \cdot t_0}{p_{max}} = \frac{1000 \cdot 0,46 \cdot 859,09 \cdot 1,16}{708\,000} = 0,65 \text{ с}$$

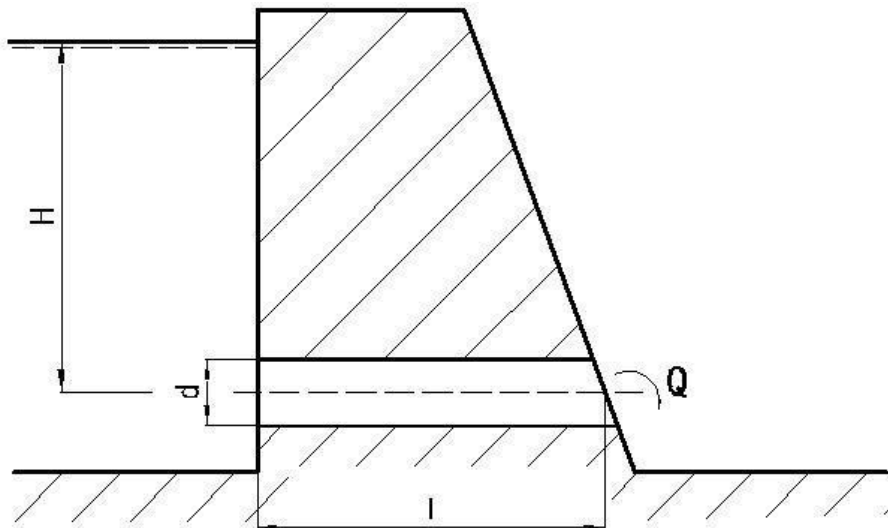
8) Устройства для предотвращения гидравлического удара

Необходимо представить схему/фотографию 1 (одного) любого устройства для предотвращения гидравлического удара с подробным описанием принципа действия данного устройства.

(Можно прикрепить дополнительным отдельным файлом в электронном виде.)

ТИПОВАЯ ЗАДАЧА № 8 «РАСЧЁТ ТРУБЫ В НАСЫПИ»

Определить расход воды Q , проходящей через водоспускную трубу в бетонной плотине, если напор перед трубой H , м, диаметр трубы d , м, длина трубы в насыпи составляет l , м.



Варианты исходных данных для типовой задачи № 4

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H , м	10	9	8	7	6	8	6	9	7	9,5
d , м	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
l , м	4	6	9,5	5	8	10,5	6,5	10	12,5	11

Исходные данные	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
H , м	6	5	4	3	2	2	8	7	9,5	6
d , м	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
l , м	10,5	14	7	12	16	1	2,5	5,5	2,5	3,5

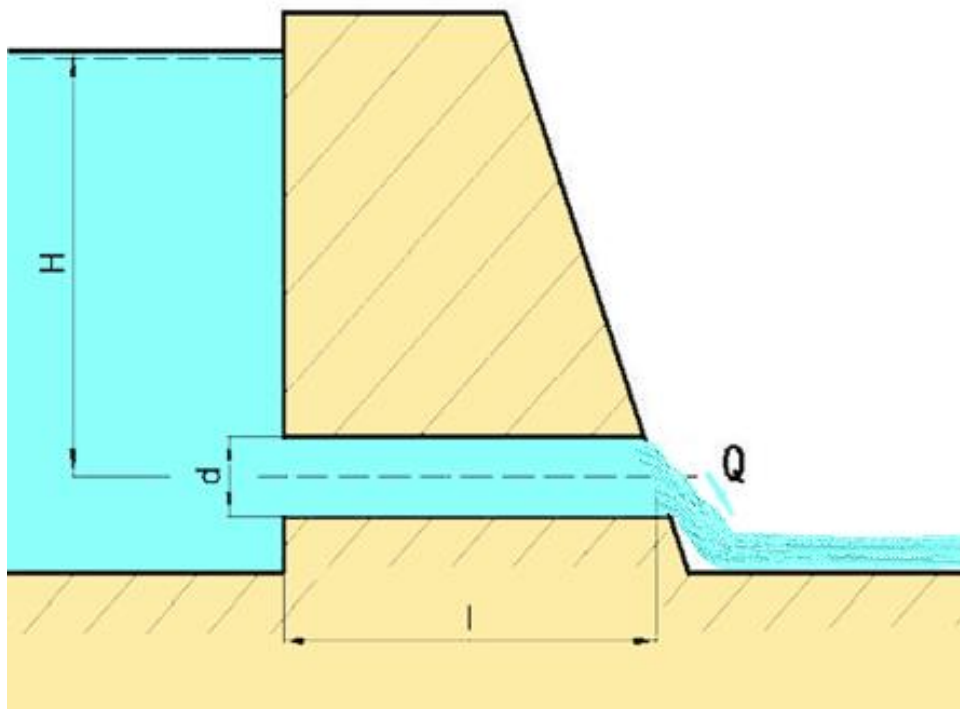
Исходные данные	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
H , м	5	10,5	4	12	9,5	6	7	4	6	10
d , м	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,75
l , м	9,5	4,5	5,5	8,5	6,5	7,5	9,5	3,5	8,5	11,5

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ № 8

«РАСЧЁТ ТРУБЫ В НАСЫПИ»

ВАРИАНТ № 0

Определить расход воды Q , проходящей через водопускную трубу в бетонной плотине, если напор перед трубой составляет $H = 5,5$ м, диаметр трубы равен $d = 0,5$ м, длина трубы в насыпи составляет $l = 1,5$ м.



Исходные данные: вариант № 0

Исходные данные		Номер варианта
		0
Напор перед трубой	H , м	5,5
Диаметр трубы	d , м	0,5
Длина трубы в насыпи	l , м	1,5

ХОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Расход воды, проходящей через водоспускную трубу, определяется по формуле.

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH}, \left[\text{м}^3 / \text{с} \right]$$

где

$\omega, [\text{м}^2]$ - площадь живого сечения трубы диаметром d , м

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,5)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,25}{4} = 0,19625 \text{ м}^2$$

g – ускорение свободного падения (для СПб и ЛО $g = 9,82 \text{ м/с}^2$);

H – напор перед трубой, м, по заданию $H = 5,5 \text{ м}$;

μ - коэффициент расхода.

Для определения коэффициента расхода μ следует выяснить, как работает водоспускная труба: как насадок, как отверстие или как короткий трубопровод:

А) Чтобы труба работала как **насадок**, должны одновременно соблюдаться два условия:

1. Длина трубы должна находиться в пределах $4d \leq l \leq 6d$

2. Вакуум в насадке $h_{\text{вак}}$ должен быть меньше максимально допустимого значения $H_{\text{вак}}^{\text{max}} = 8 \text{ м. вод. ст.}$. Значение $h_{\text{вак}} = 0,88 \cdot H$

Если эти условия выполняются, то водоспускная труба будет работать как насадок, для которого коэффициент расхода насадка равен $\mu = 0,82$.

Проверяем вариант А:

1) $4d = 4 \cdot 0,5 \text{ м} = 2 \text{ м}$

$6d = 6 \cdot 0,5 \text{ м} = 3 \text{ м}$

$4d = 2 \text{ м} \leq l = 1,5 \text{ м} \leq 6d = 3 \text{ м}$ – **условие не выполняется**

2) $h_{\text{вак}} = 0,88 \cdot H = 0,88 \cdot 5,5 \text{ м} = 4,84 \text{ м} < 8 \text{ м. вод. ст}$ – **условие выполняется**

Так как одно из условий работы трубы как насадка не выполняется, то вариант А не подходит. То есть, данная труба не работает как насадок.

В) При длине трубы $6d < l$ водоспускная труба рассчитывается как **короткий трубопровод**, т.е. учитываются местные потери напора и потери напора по длине. Коэффициент расхода в этом случае определяется по формуле:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{l}{d}}}$$

где

λ - коэффициент гидравлического трения, который для бетонных труб равен $\lambda = 0,020$;

$\xi_{\text{вх}} = 0,5$ - коэффициент местного сопротивления при входе потока в трубу.

Проверяем вариант В:

$$В) 6d = 6 \cdot 0,5\text{м} = 3\text{ м}$$

$$6d = 3\text{ м} < l = 1,5 \text{ – условие не выполняется}$$

Следовательно, вариант В тоже не подходит. То есть, данная труба не работает как короткий трубопровод.

С) Если одно из 2^x условий работы трубы как насадка не выполняется (то есть, либо $l \leq 4d$, либо $h_{\text{вак}} > 8\text{м}$) или оба условия не выполняются, то водопускная труба будет работать как **отверстие** и коэффициент расхода отверстия равен $\mu = 0,62$.

Проверяем вариант С:

$$1) 4d = 4 \cdot 0,5\text{м} = 2\text{ м}$$

$$l = 1,5\text{ м} \leq 4d = 2\text{ м} \text{ – условие выполняется}$$

$$2) h_{\text{вак}} = 0,88 \cdot H = 0,88 \cdot 5,5\text{м} = 4,84\text{ м}$$

$$h_{\text{вак}} = 4,84\text{ м} > 8\text{ м. вод. ст} \text{ – условие не выполняется}$$

Так как одно из условий работы трубы как насадка не выполняется, но при этом выполняется условие $l \leq 4d$, следовательно данная труба работает как отверстие. Коэффициент расхода отверстия $\mu = 0,62$.

Расход воды через водопускную трубу определяем по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH} = 0,62 \cdot 0,19625 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,82 \cdot 5,5} = 1,26 \text{ м}^3/\text{с}$$

ОТВЕТ: $Q = 1,26 \text{ м}^3/\text{с}$

Приложения

Приложение 1

Плотности некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³
бензин	750
вода	1000
воск	995
жидкое олово	6800
керосин	800
мазут	890
масло какао	964
масло касторовое	960
масло кунжутное	919
масло лавровое	880
масло льняное	938
масло машинное	900
масло персиковое	920
масло соевое	927
масло тыквенное	925

Жидкость	Плотность, кг/м ³
мёд	1350
молоко	1027
молоко цельн.	1030
морск. вода	1027
нефть	850
подс. масло	923
р-р глицерина	1210
ртуть	13600
серная к-та	1800
скипидар	860
сливки 60%	926
спирт	800
спирт этил.	790
стеарин хл.	920
эфир	710

Приложение 2

Плотность воды ρ в зависимости от температуры

T, °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ρ , кг/м ³	1000	999,6	998,9	998,2	996,9	995,6	993,9	992,2	990	988	985	983

Приложение 3.

Значения кинематического коэффициента вязкости для воды.

Температура, °C	Кинематический коэффициент вязкости, см ² /с	Температура, °C	Кинематический коэффициент вязкости, см ² /с
	вода		вода
0	0,01780	16	0,01118
5	0,01519	17	0,01089
6	0,01473	18	0,01062
7	0,01429	19	0,01032
8	0,01387	20	0,01010
9	0,01348	25	0,00899
10	0,01310	30	0,00805
11	0,01274	40	0,00659
12	0,01240	50	0,00550
13	0,01207	70	0,00401
14	0,01176	90	0,00306
15	0,01146	100	0,00271

Приложение 4.

Методика расчёта коэффициента гидравлического трения λ в напорных трубопроводах.

Режим движения жидкости			
Ламинарный	Турбулентный		
	Гидравлически гладкие трубы	Гидравлически шероховатые трубы	
		Область докватричного сопротивления	Область квадратичного сопротивления
$Re < 2300$	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_э}$	$10 \frac{d}{\Delta_э} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_э}$	$500 \frac{d}{\Delta_э} < Re$
$\lambda = \frac{64}{Re}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^1$	Формула Блазиуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ $\lambda = f(Re)$ $h_l \sim V^{1,75}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(Re, \Delta_э/d)$ $h_l \sim V^{1,75 \dots 2,00}$	Формула Шифринсона $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ $\lambda = f(\Delta_э/d)$ $h_l \sim V^2$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учеб. для вузов – изд. 6-е, репринтное – М. : Издательский дом БАСТЕТ, 2013. – 672 с.: ил.
2. Андрижиевский, А.А. Механика жидкости и газа. [Электронный ресурс] - Электрон. дан. - Минск : "Вышэйшая школа", 2014. - 208 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/65568>
3. Моргунов, К.П. Гидравлика. [Электронный ресурс] - Электрон. дан. - СПб. : Лань, 2014. - 288 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/51930>
4. Индивидуальные задания по гидравлике и гидрогазодинамике: с методическими указаниями для студентов очного и очно-заочного обучения по направлению 280700 "Техносферная безопасность" и специальности 271501 "Строительство железных дорог, мостов и транспортны. [Электронный ресурс] - Электрон. дан. - СПб. : ПГУПС, 2012. - 38 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/41106>