

МИНИОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА"
(ФГБОУ ВО «ИЖГТУ ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА»)

Бойчук А.Е.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям

по дисциплине «Сооружение объектов систем трубопроводного транспорта»

Рекомендовано учебно–методическим советом
ФГБОУ ВО «ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова» для использования в
учебном процессе в качестве элемента УЭМКД

для бакалавров направлений подготовки 15.03.02 «Технологические машины
и оборудование»; 21.03.01 «Нефтегазовое дело»
Профили «Машины и оборудование систем трубопроводного транспорта и
хранения углеводородов»; «Сооружение и ремонт объектов и систем
трубопроводного транспорта»

Ижевск 2017

Бойчук А.Е.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Сооружение объектов систем трубопроводного транспорта"[Текст] /А.Е. Бойчук. – Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2017. – 28 с.

Рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Тепловые двигатели и установки» (протокол №___ от ___. ___.2016)

В методических указаниях изложены основные требования к выполнению практических работ. Приведены примеры расчётов.

Рекомендовано студентам по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 21.03.01 «Нефтегазовое дело». Профили «Машины и оборудование систем трубопроводного транспорта и хранения углеводородов»; «Сооружение и ремонт объектов и систем трубопроводного транспорта» по дисциплине «Сооружение объектов систем трубопроводного транспорта».

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Сооружение объектов систем трубопроводного транспорта» для выполнения практических и курсовых работ.

Рецензент:

Д.т.н., профессор каф. «АМО»

ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

Н.М.Филькин

Содержание

Введение	4
Задача 1	5
Задача 2	7
Задача 3	9
Задача 4	14
Задача 5	19
Задача 6	22
Задача 7	23
Задача 8	26
Требования к оформлению работы	27
Список использованных источников	28

ВВЕДЕНИЕ

В России эксплуатируются системы магистральных трубопроводов протяженностью более 240 тыс. км, имеющие свыше 5 тыс. надземных технологических объектов обслуживания: компрессорные, насосные станции, хранилища и резервуарные парки. Протяженность промысловых трубопроводов составляет 350 тыс. км. Эксплуатируется 800 компрессорных и насосных станций, резервуарные парки объемом более 20 млн. м³, подземные хранилища вместимостью 45,6 млрд. м³.

Трудно переоценить роль трубопроводной системы России, ее народнохозяйственную эффективность в снабжение энергоресурсами и химическим сырьем внутренних потребителей, в обеспечение основных валютных поступлений от поставок природного газа, нефти, нефтепродуктов зарубежным странам.

Магистральные трубопроводы России в отличие от других стран представляют единые системы снабжения потребителей. Причем транспорт газа центрирован в ПАО «Газпром», нефти – в АК «Транснефть» и нефтепродуктов – в АК «Транснефтепродукт».

Такой организационно-технологический принцип построения трубопроводных систем обеспечивает их наибольшие резервные возможности, гибкое и оперативное маневрирование потоками, надежность функционирования.

Трубопроводы, несмотря на внешнюю конструктивную простоту, принципиально отличаются от других сооружений сложной схемой воздействия силовых факторов, разнообразием нагрузок, неопределённостью напряженно-деформированного состояния, масштабностью. К тому же, подземное расположение затрудняет их диагностирование и увеличивает вероятность возникновения отказов.

Сложность обеспечения надёжности магистральных трубопроводов России, прежде всего, состоит в их прокладке на большом протяжении в северных и субарктических районах, где расположены основные месторождения газа и нефти: Западной и Восточной Сибири, республик Коми и Саха, на Сахалине. Эти районы отличаются суровыми природно-климатическими условиями. Следует напомнить, что более половины территории России покрыты вечномёрзлыми грунтами. Многочисленные системы трубопроводов большого диаметра большой протяженности проложены в единых технических коридорах, которые имеют и пересечения друг с другом.

Одной из задач учебного процесса научить студента решать различные инженерные задачи, которые позволили бы правильно эксплуатировать объекты нефтегазового комплекса и грамотно подходить к вопросам сооружения и ремонта элементов систем трубопроводного транспорта.

Данные учебно-методические указания помогут решать различные технические задачи, встречающиеся на практике и углубить теоретические знания студента по данному курсу.

Задача 1

Рассчитать объём земляных работ при разработке траншеи магистрального трубопровода $I_{кат}$: условный диаметр $D_y=1400$; грунт суглинок $II_{кат}$; коэффициент откоса $n=1:0,5$; длина участка $L=35 \cdot 10^3$ м; скорость экскаватора $V=300$ м/ч.

Решение

Параметры земляных сооружений, применяемых при сооружении ГНП (ширина, глубина и откосы траншеи, сечение насыпи, крутизна её откосов и др.) устанавливают в зависимости от (D_n) трубопровода, способа его закрепления, рельефа местности, грунтовых условий. Размеры траншеи (глубина, ширина по дну, откосы) устанавливают в зависимости от диаметра трубопровода, характеристик грунтов и гидрогеологических условий.

Согласно СНиП 2.05.06-85* установлено для трубопроводов диаметром до 700 мм ширина траншеи по дну $D+300$ мм, где D – условный диаметр трубопровода и $1,5D$ для трубопроводов с условным диаметром более 700 мм. При наличии стеснённых условий для трубопроводов $D_y=1200 \div 1400$ с откосами 1:0,5 ширину по дну траншеи допускается уменьшать до $D+500$ мм. Ширина траншеи по дну на кривых участках под гнутые или сварные отводы равна двукратной величине по отношению к ширине на прямолинейных участках для обеспечения укладки трубопровода в кривую траншею. При балластировке трубопровода ширина траншеи по дну должна быть не менее $2,2D$, на участках трубопровода с использованием для балластировки нетканого синтетического материала $1,6D$. На рис.1 показаны основные параметры траншеи.

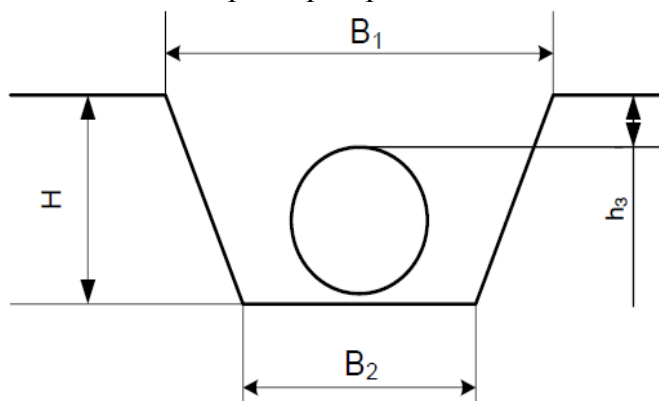


Рис.1 Основные параметры траншеи

B_1 – ширина по верху траншеи, м; B_2 – ширина по дну траншеи; H – глубина траншеи; h_3 – заглубление трубопровода

Глубина траншеи устанавливается из условий предохранения трубопровода от механических повреждений при переезде через него автотранспорта, строительных и сельскохозяйственных машин или от воздействия различного оборудования.

Согласно СНиП 2.05.06-85* заглубление трубопровода диаметром до 1000 мм – 0,8 м; для трубопроводов диаметром свыше 1000 мм – 1,0 м; для болотистых грунтов, подлежащих осушению – 1,1 м; для песчано-барханных грунтов – 1,0 м; для скальных грунтов при отсутствии движения автотранспорта – 0,6 ÷ 0,8 м.

Для условий задачи

$$D_n = D + 2\delta, \text{ для трубопровода } D_y 1400 \text{ } I_{кат} \delta = 18,7 \text{ мм}$$

$$D_n = 1420 + 2 \cdot 18,7 = 1420 + 37,4 = 1457,4 \approx 1458 \text{ мм,}$$

где D_n – наружный диаметр.

$$V = \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot H \cdot L,$$

где L – длина участка

$$\text{С учётом откосов } V_{зр} = (B_2 \cdot H + n \cdot H^2) \cdot L,$$

n – коэффициент откоса

$$\text{Ширина по дну траншеи } B_2 = 1,5D = 1,5 \cdot 1420 = 2130 \text{ мм} = 2,13 \text{ м}$$

$$\text{Глубина траншеи } H = D + 1 = 1,42 + 1 = 2,42 \text{ м}$$

$$V_{зр} = \left(2,13 \cdot 2,42 + \frac{1}{0,5} \cdot 2,42^2 \right) \cdot 35 \cdot 10^3 = 590359 \text{ м}^3$$

Из общего объёма земляных работ при разработке траншеи следует выделить объём работ по срезке растительного слоя, который обычно производят бульдозером или скрепером, а также объём работ по срезке недобора, который оставляют у дна котлована, разрабатываемого экскаватором, чтобы не нарушить целостность и прочность грунта у основания, на которое опирается сооружение.

Объём срезки растительного слоя

$$V_c = V_{ск} + V_{ср},$$

где $V_{ск}$ – объём срезки грунта в пределах котлована, м^3 ; $V_{ср}$ – тоже в пределах рабочей зоны, м^3 .

$$V_{ск} = B_1 \cdot L \cdot t_c,$$

где t_c – толщина срезаемого слоя, принимаем $t_c = 0,15 \div 0,20 \text{ м}$.

$$V_{ср} = B \cdot L \cdot t_c,$$

где B – ширина рабочей зоны на берме котлована, необходимой для складирования материалов, конструкции и движения строительных машин, принимается в зависимости от диаметра трубопровода и назначения земельного участка, примем $B = 32 \text{ м}$.

$$V_{ср} = 32 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 224000 \text{ м}^3$$

$$B_1 = D + 2b = D + 2 \cdot \frac{1}{n} \cdot H = 1,42 + 2 \cdot 0,5 \cdot 2,42 = 3,84 \text{ м}$$

$$V_{ск} = 3,84 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 26880 \text{ м}^3$$

$$V_c = 26880 + 224000 = 250880 \text{ м}^3$$

Объём земляных работ по зачистке недобора по дну траншеи

$$V_{зк} = B_2 \cdot L \cdot h_n$$

где h_n – толщина недобора, м. $h_n = 0,2 \text{ м}$

$$V_{зк} = 2,13 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 14910 \text{ м}^3.$$

$$V = V_{зр} + V_{зк} - V_c = 590359 + 14910 - 250880 = 354389 \text{ м}^3 [1]$$

Задание

Выполнить расчёт задачи 1 в соответствии с вариантом задания.
Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Условный диаметр D_y , мм	820	1020	1220	1420	1020	820	1220	1420	1220	1020
Категория трубопровода	II	I	III	I	II	III	I	II	III	II
Грунт/кат.	Глина III	Суглин ок II	Супесь II	Суглин ок II	Песок I	Глина III	Супесь II	Песок I	Суглин ок II	Глина III
Длина участка L , м	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$
Скорость экскаватора V , м/ч	200	260	160	300	320	300	240	180	300	200

Задача 2

Используя исходные данные задачи 1 определить установочную мощность роторного экскаватора для разработки траншеи под трубопровод диаметром D мм в заданном типе и категории грунта со скоростью экскаватора V м/ч

Решение

Первоначально необходимо определить ёмкость ковша экскаватора, который зависит от $V_{зр}$. Для определения воспользуемся таблицей 1.

Таблица 1

$V_{зр}$ (объём земляных работ), m^3	Q (ёмкость ковша экскаватора), m^3
До 500	0,15
500 1500	0,24 и 0,3
1500 5000	0,5
2000 8000	0,65
6000 11000	0,8
13000 18000	1,0÷1,25
Более 15000	1,5

Сначала определим параметры траншеи – глубину и ширину траншеи

Используя параметры задачи 1 определим площадь поперечного сечения в зависимости от крутизны откосов. Для крутизны 1:0,5

$$S = \frac{B_2 + (B_2 + H)}{2} \cdot H = \frac{2,13 + (2,13 + 2,42)}{2} \cdot 2,42 = 8,083 m^2$$

Определим установочную мощность экскаватора

$$N = k_y \cdot k_e \cdot k_p \cdot S \cdot V / 3600,$$

где k_y – коэффициент, учитывающий отношение времени разработки траншеи к времени рабочего цикла (табл.2); k_e – коэффициент, учитывающий расход мощности на вспомогательные механизмы (табл.3); k_p – удельное сопротивление резанию и копанию (табл.4); V – скорость движения экскаватора, м/ч; S – площадь поперечного сечения траншеи, m^2 .

Таблица 2

Коэффициент, учитывающий отношение времени разработки траншеи
к времени рабочего цикла (k_y)

Тип землеройной техники	Значение коэффициента k_y
Одноковшовый экскаватор	0,5÷0,8
Бульдозер	0,3÷0,9
Роторный экскаватор	1,0

Таблица 3

Коэффициент, учитывающий расход мощности на вспомогательные механизмы (k_e)

Тип землеройной техники	Значение коэффициента k_e
Одноковшовый экскаватор	0,2÷0,5
Бульдозер	0,2÷0,5
Роторный экскаватор	0,6÷0,8

Таблица 4

Удельное сопротивление резанию и копанию (k_p)

Категория грунта	Число ударов плотномер ДОРНИИ	Бульдозер	Экскаватор с обратной лопатой	Роторный экскаватор
I	1÷4	20÷85	30÷80	70÷230
II	5÷8	58÷210	70÷160	210÷400
III	9÷16	160÷300	120÷250	380÷660
IV	17÷34	260÷440	220÷360	650÷800
V	35÷70	330÷600	330÷550	800÷1200
VI	70÷140	480÷850	430÷750	1000÷2200

$$N = 1,0 \cdot 0,7 \cdot 250 \cdot 8,083 \cdot 300 / 3600 = 117,9 \approx 120 \text{ кВт}$$

На основании рассчитанной установочной мощности выбираем марку роторного экскаватора для земляных работ (табл.5) [1]

Таблица 5

Технические характеристики роторных экскаваторов

Параметры	Индекс машины		
	ЭТР-223А	ЭТР-224А	ЭТР-254А
Максимальная техническая производительность, м ³ /ч	650	600	1200÷1220
Категория разрабатываемого грунта	I – IV, мёрзлые грунты при глубине промерзания до 1,2м		I – IV, мёрзлые грунты при глубине промерзания до 2,5м
Размеры разрабатываемой траншеи, м			
глубина	2,2	2,2	2,5
ширина по дну	1,5	0,85	2,1
по верху (с откосами)	2,58	1,85	3,8
Рабочее оборудование (тип)	Навесное		Полуприцепное
Базовая машина	T-10M	T-10M	ДЭТ-250М2
Мощность двигателя, кВт	125	125	220
Диапазон скоростей рабочего хода, м/ч	10...300	10...300	12...1210
Транспортные скорости, км/ч	1,5...4,2	1,5...4,2	0,5...5,75
Диаметр ротора по зубьям ковшей, мм	3830	3830	4410

Задание

Выполнить расчёт задачи 2 в соответствии с вариантом задания.
Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Условный диаметр D_y , мм	820	1020	1220	1420	1020	820	1220	1420	1220	1020
Категория трубопровода	II	I	III	I	II	III	I	II	III	II
Грунт/кат.	Глина III	Суглинок II	Супесь II	Суглинок II	Песок I	Глина III	Супесь II	Песок I	Суглинок II	Глина III
Длина участка L , м	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$
Скорость экскаватора V , м/ч	200	260	160	300	320	300	240	180	300	200

Задача 3

Выполнить расчёт балластировки подводного перехода магистрального трубопровода: $D=720\text{мм}$; $L=200\text{м}$; $\delta=12\text{мм}$.

Решение

Для нормальной работы подводного перехода, уложенного по дну водоёма, необходимо обеспечить надёжную устойчивость.

Устойчивость создаётся силой веса трубы, силой веса перекачиваемого продукта, силой пригрузки чугунными или железобетонными утяжелителями.

Наиболее распространены утяжеляющие ж/б устройства различных типов и размеров: тип УБО, УБК-М, УТК (рис.2, рис.3).

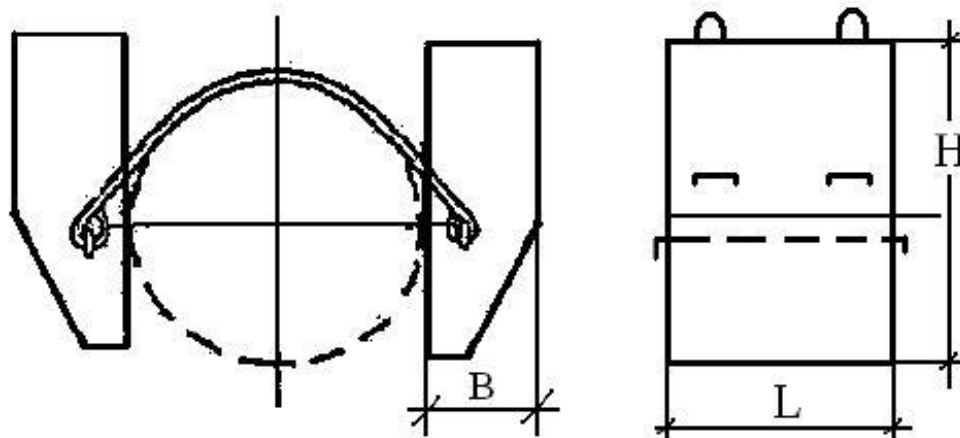


Рис.2 Схема утяжелителей типа УБО для балластировки газопровода

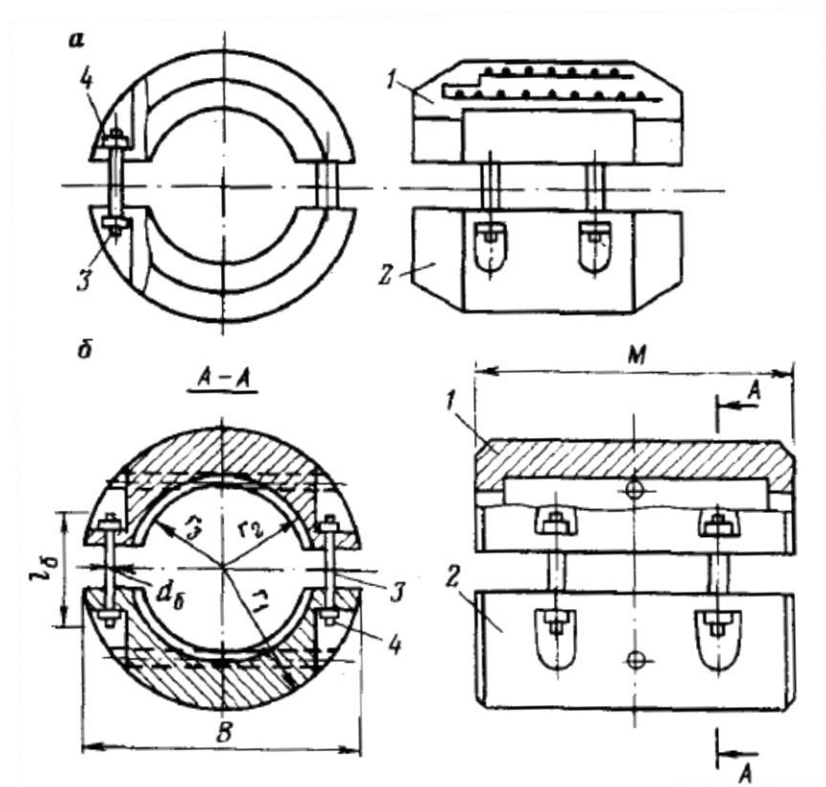


Рис.3 Кольцевые утяжелители: а – железобетонный; б – чугунный;
1,2 – верхняя и нижняя половины груза; 3 – болт; 4 – гайка

Таблица 6

Характеристика утяжелителей типа УБО

Марка	Диаметр трубопровода	Габаритные размеры, мм			Объём утяжелителя, m^3	Масса утяжелителя, t
		H	L	B		
УБО-1	1420	1600	1200	600	1,872	4,305
УБО-2	1220	1400	1350	600	1,843	4,238
УБО-3	1020	1100	1500	550	1,455	3,346
	820	1100	1500	550	1,455	3,346
	720	1100	1500	550	1,455	3,346
УБО-4	530	750	1500	400	0,75	1,725

Таблица 7

Характеристика утяжелителей типа УБК-М

Марка	Размеры, мм			Расход бетона, m^3	Масса изделия, t
	B	H	L		
УБК-1,4	2400	1760	1000	2,55	6
УБК-1,2	2000	1570	900	1,7	4,1
УБК-1,0	1840	1370	900	1,44	3,46
УБК-0,8	1600	1120	900	1,12	2,7
УБК-0,7	1500	1030	900	0,98	2,36
УБК-0,5	1300	760	900	0,68	1,6
УБК-0,4	1100	690	900	0,54	1,3

Таблица 8

Характеристика сборных ж/б кольцевых утяжелителей типа УТК

Марка утяжелителя	Расход материалов на один утяжелитель		Масса, кг		
			Одного утяжелителя	1 м утяжеляющего покрытия	
	бетон, м ³	сталь, кг		на воздухе	на воде
УТК 1020-24-1	0,69	76,94	1587	1323	748
УТК 1020-24-2	0,88	76,94	2024	1687	953
УТК 1220-24-1	0,98	88,7	2254	1878	1062
УТК1220-24-2	1,23	88,7	2829	2358	1332
УТК 1420-24-1	1,24	98,3	2850	2377	1343
УТК 1420-24-2	1,79	98,3	4120	3431	1939

Для балластировки магистральных трубопроводов на переходах через водные преграды, болота III типа, озёра, где применяется метод протаскивания, используют чугунные или ж/б кольцевые утяжелители (пригруза). Сборный ж/б кольцевой утяжелитель типа УТК изготавливается из бетона класса В20 плотностью 2,3 т/м³ и состоит из двух симметричных полуколец, которые монтируются на трубе по деревянной или полимерной футеровке и скрепляются между собой стальными болтами. Аналогичный вид имеют и чугунные пригруза (табл.9) [1].

Таблица 9

Характеристика чугунных кольцевых утяжелителей

Наружный диаметр трубопровода, мм	Масса груза, кг	Размеры, мм						
		груза				болтов		
		r_1	r_2	r_3	B	M	d_6	L_6
530	450	380	315	305	355	530	20	170
720	1100	480	410	400	455	910	24	180
820	1100	530	460	450	505	820	24	180
1020	1100	630	560	550	605	705	24	180
1220	2000	750	660	650	725	884	30	260
1420	2000	870	770	750	845	884	30	260

При расчёте отрицательной плавучести должно выполняться следующее неравенство

$$B \geq \sum B_i,$$

где B_i – необходимые нормативные пригрузки

$$B_i = n_i \cdot B_{\text{ф}i}$$

где n_i – коэффициент перегрузки; $B_{\text{ф}i}$ – фактические нагрузки, которые определяются по формулам.

Пригрузки для компенсации взвешивающего усилия

$$B_A = n_e \cdot \rho_e \cdot V \cdot g$$

где n_e – коэффициент, учитывающий возможное увеличение объёмной массы воды в паводок при засыпке и т.п., $n_e=1,1$; ρ_e – плотность воды с учётом взвешенных частиц грунта, кг/м³; V – объём воды, вытесненной 1 м длины трубопровода, м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Гидродинамические воздействия на трубопровод, B_e

$$B_e = 0,03 \cdot \rho_e \cdot v^2 \cdot D$$

где v – средняя скорость течения потока воды, м/с, принимаем $v=0,5$ м/с; D – проекция 1 м длины трубопровода на плоскость, перпендикулярную вектору скорости потока, м².

Дополнительная пригрузка для обеспечения устойчивости на сдвиг, B_z

$$B_z = 0,1 \cdot \rho_g \cdot v^2 \cdot D$$

Дополнительная пригрузка на упругий изгиб трубопровода в соответствии с проектным профилем.

В случае с обоими заземлёнными концами

$$B_{изг} = \frac{384 \cdot f \cdot E \cdot I}{l^4},$$

где f – стрела прогиба, м. Данная величина задана. E – модуль упругости материала трубы, H/m^3 , для стального трубопровода $E=2,06 \cdot 10^5 MPa$; l – длина криволинейного участка траншеи, м; I – момент инерции, для трубопровода справедливо

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4), \text{ где } D \text{ и } d - \text{наружный и внутренний диаметр трубопровода.}$$

$$\text{Суммарный вес пригрузки } B \geq \sum B_i = (B_A - g) + B_g + B_z + B_{изг}$$

где g – масса 1 м длины трубопровода в воздухе, кг.

Сила веса пригрузки $G_{zp}H$, на весь трубопровод составит:

$$G_{zp} = B \cdot L,$$

тогда количество пригрузов, установленных на трубопровод:

$$n_0 = \frac{G_{zp}}{g_{zp}},$$

где g_{zp} – масса одного груза, $H (кгс)$

Значение n_0 округляется до целого числа в большую сторону. Принятое значение обозначается n и применяется в дальнейших расчётах.

$$\text{Расстояние между грузами } l_i = \frac{L}{n}, \text{ м}$$

По предельному сопротивлению на сдвиг по грунту определяется тяговое усилие протаскиваемого трубопровода T_{zp}, H :

$$T_{zp} = k_m \cdot G_{zp} \cdot f,$$

где k_m – коэффициент трогания с места, $k_m=2,0$; f – коэффициент трения скольжения, $f=0,6 \div 1,0$; G_{zp} – сила веса пригрузки.

Разрывное усилие R_n, H :

$$R_n = T_{zp} \cdot k,$$

где k – коэффициент прочности, $k=4$

Количество канатов принимаются согласно ГОСТ. Для уменьшения тягового усилия применяем тележки узкой колеи или роликовые опоры.

Тяговое усилие при протаскивании на тележках $T_{ук}, H$:

$$T_{ук} = k \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + T_4,$$

где T_1 – сила трения качения колёс тележки по рельсам, $H (кгс)$

$$T_1 = \frac{(g_n + g_m) \cdot f_1}{r_k}, H (кгс)$$

где g_n – масса 1 м длины протаскиваемого трубопровода, $H (кгс)$; g_m – масса тележки на 1 м длины трубопровода, $H (кгс)$; r_k – радиус колеса тележки, м; f_1 – коэффициент трения качения колёс тележки по рельсам, $f_1=0,12$.

T_2 – сила трения в подшипниках осей тележки, $H (кгс)$

$$T_2 = \frac{(g_n + g_m) \cdot f_2 \cdot r_p^c}{r_k},$$

где f_2 – коэффициент трения скольжения осей в подшипниках, $f_2=0,12$; r_p^c – радиус оси ската тележки, м.

T_3 – усилие на преодоление сопротивления рёбер колёс при движении их по рельсам, H (кгс)

$$T_3 = 0,5 \cdot (T_1 + T_2)$$

$$T_4 – \text{усилие трения каната о грунт } T_4 = g_{\text{кан}} \cdot f_3,$$

где $g_{\text{кан}}$ – масса каната на 1м длины трубопровода, H (кгс); f_3 –коэф. трения скольжения каната о грунт. Принимаем $f_3=1$.

При протаскивании трубопровода по роликовой дорожке тяговое усилие $T_{p.o}$ H (кгс) определяется:

$$T_{p.o} = k \cdot (T_1 + T_2) + T_4,$$

где T_1 – сила трения качения трубопровода по роликам, H (кгс)

$$T_1 = \frac{g_n \cdot f_4}{r_p},$$

где f_4 – коэф. трения качения дерева по стали (футеровка), $f_4=0,2$; r_p –радиус ролика, м; $r_p=0,15$ м.

T_2 – сила скольжения осей роликов в опорах, H (кгс)

$$T_2 = \frac{g_n \cdot f_4 \cdot r_p^c}{r_p},$$

где r_p^c – радиус оси ролика, м

T_3 – добавочное сопротивление от неточной укладки осей роликовых опор, H (кгс)

$$T_3 = 0,4 \cdot (T_1 + T_2)$$

Усилие от пригрузки для компенсации взвешивающего усилия $B_A=4827 H$

Масса 1м длины трубопровода в воздухе для трубопровода $D=720$ мм $g=2060 H$

Определяем пригрузку для компенсации гидродинамических воздействий:

$$B_g = 0,03 \cdot 1100 \cdot 0,5^2 \cdot 0,72 = 5,94 \approx 6 H (0,6 \text{ кгс})$$

Дополнительная пригрузка для обеспечения устойчивости на сдвиг

$$B_z = 0,1 \cdot 1100 \cdot 0,5^2 \cdot 0,72 = 19,8 \approx 20 H (2 \text{ кгс})$$

Дополнительная пригрузка на упругий изгиб трубопровода в соответствии с проектным профилем. Рассматриваем трубопровод как балку с обоими защемлёнными концами.

$$B_{изг} = \frac{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,00167 \cdot 1,6}{506250 \cdot 10^{11}} = 417 H (41,7 \text{ кгс})$$

Определим суммарный вес пригрузки

$$B \geq B_i = (4827 - 2060) + 6 + 20 + 417 = 3210 H (327 \text{ кгс})$$

Сила веса пригрузки на весь трубопровод

$$G_{zp} = 3210 \cdot 200 = 642000 H (65443 \text{ кгс})$$

Количество грузов, установленных на трубопроводе, при этом примем, что $g_{гр}=4900 H$ (500кгс)

$$n_0 = \frac{642000}{4900} = 131; n=131,$$

тогда расстояние между грузами $l_i = \frac{200}{131} = 1,5 м$

Тяговое усилие протаскиваемого трубопровода по предельному сопротивлению на сдвиг

$$T_{\text{сп}} = 2,0 \cdot (642000 + 2060 \cdot 200) \cdot 1 = 2108000 H (214883 кгс)$$

Определим разрывное усилие

$$R_n = 2108000 \cdot 4 = 8432000 H (859531 кгс)$$

При применении тележки для уменьшения тягового усилия, сила трения качения колёс тележки по рельсам

$$T_1 = \frac{(5270 + 2060) \cdot 0,12}{0,175} = 5026 H (512 кгс)$$

Сила трения в подшипниках осей тележки

$$T_2 = \frac{(5270 + 2060) \cdot 0,12 \cdot 0,02}{0,175} = 100 H (10,2 кгс)$$

Усилие, необходимое на преодоление сопротивления рёбер у колёс при движении их по рельсам

$$T_3 = 0,5 \cdot (5026 + 100) = 2563 H (261 кгс)$$

$$T_4 = 35 \cdot 1 = 35 H (3,6 кгс)$$

Тяговое усилие при протаскивании трубопровода на тележках

$$T_{\text{ук}} = [2 \cdot (5026 + 100 + 2563) + 35] \cdot 200 = 3082600 H (314230 кгс)$$

Разрывное усилие каната $R_n = 66512 \cdot 4 = 266048 H (27120 кгс)$

По соответствующему ГОСТ подбираем канат диаметром $d=24 мм$

При протаскивании трубопровода по роликам сила трения качения

$$T_1 = \frac{5270 \cdot 0,2}{0,15} = 7027 H (716 кгс)$$

Сила скольжения осей роликов в опорах

$$T_2 = \frac{5270 \cdot 0,2 \cdot 0,03}{0,15} = 211 H (22 кгс)$$

Добавочное сопротивление от неточной укладки осей роликовых опор

$$T_3 = 0,4 \cdot (7027 + 211) = 2895 H (295 кгс)$$

Тяговое усилие при протаскивании трубопровода по роликовой дорожке

$$T_{\text{р.д}} = [2 \cdot (7027 + 211 + 2895) + 35] \cdot 200 = 4060200 H (413884 кгс)$$

Разрывное усилие каната $R_n = 101632 \cdot 4 = 406528 H (41440 кгс)$

По ГОСТ выбираем канат диаметром $d=32,5 мм [1]$

Задание

Выполнить расчёт задачи 3 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Условный диаметр D_y , мм	820	1020	1220	1420	1020	820	1220	1420	1220	1020
Толщина стенки δ , мм	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
Длина трубопровода L , м	300	500	400	400	300	200	500	300	400	500

Задача 4

Определить число катодных станций, их мощность, тип и срок службы анодных заземлителей при антикоррозионной защите стального магистрального изолированного трубопровода протяжённостью $L=450\text{ км}$; наружным диаметром $D=820\text{ мм}$, с толщиной стенки $\delta=10\text{ мм}$. Трубопровод уложен в грунтах с удельным электрическим сопротивлением: на длине $l_1=67,5\text{ км}$ – $\rho_{cp1}=10\text{ Ом}\cdot\text{м}$; на длине $l_2=67,5\text{ км}$ – $\rho_{cp2}=27\text{ Ом}\cdot\text{м}$; на длине $l_3=225\text{ км}$ – $\rho_{cp3}=55\text{ Ом}\cdot\text{м}$; на длине $l_4=90\text{ км}$ – $\rho_{cp4}=105\text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Электрическое сопротивление изоляционного покрытия на единице длины трубопровода на этих участках принимаем соответственно $R_{из1}=2700\text{ Ом}\cdot\text{м}$; $R_{из2}=1800\text{ Ом}\cdot\text{м}$; $R_{из3}=1300\text{ Ом}\cdot\text{м}$; $R_{из4}=750\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Расстояние от СКЗ до трубопровода $l=10\text{ м}$. $l_{np}=350\text{ м}$; $n=10$; $d=75\text{ мм}$; $l_g=3\text{ м}$; $l_e=54\text{ м}$; $h=3,5\text{ м}$; $\delta_{аз}=4\text{ мм}$.

Решение

Определение расчётных значений защитного потенциала:

$$E_{\max, \min} = E_{защ(\max, \min) - E_{ест}}, (B)$$

где $E_{\max}$ и $E_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное расчётные значения защитных потенциалов; $E_{ест}$ – естественный потенциал сооружения в почве. Для стальных трубопроводов $E_{ест}=-0,55B$ принято по МСЭ; $E_{защ(\max, \min)}$ – максимальный (минимальный) защитный потенциал.

Для стальных трубопроводов с частичным нарушением битумной изоляции приняты следующие значения защитных потенциалов:

$$E_{защ, \max} = -1,52B; E_{защ, \min} = -0,87B$$

$$E_{\max} = -0,97B; E_{\min} = -0,32B$$

Определение среднего удельного электрического сопротивления грунтов на трассе трубопровода

$$\rho_{cp} = \frac{\sum \rho_{cp,i} l_i}{L}, (Ом\cdot м)$$

$$\rho_{cp} = \frac{(10 \cdot 67,5 + 27 \cdot 67,5 + 55 \cdot 225 + 105 \cdot 90) \cdot 10^3}{450 \cdot 10^3} = 54,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Определение среднего значения электрического сопротивления изоляционного покрытия на единице длины трубопровода:

$$R_{из, cp} = \frac{L}{\sum \frac{l_i}{R_{из,i}}}, (Ом\cdot м)$$

$$R_{из, cp} = \frac{450 \cdot 10^3}{\left(\frac{67,5}{2700} + \frac{67,5}{1800} + \frac{225}{1300} + \frac{90}{750} \right) \cdot 10^3} = 1265,55 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Определение электрического сопротивления единицы длины трубопровода

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D \cdot \delta}, (Ом/м)$$

$$R = \frac{0,135}{3,14 \cdot 820 \cdot 10} = 5,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

для стали удельное электросопротивление $\rho=0,135 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$

Определение постоянной распределения защитного потенциала и тока по длине трубопровода:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R}{R_{uz,cp}}}, \left(\frac{1}{\text{м}}\right)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{5,24 \cdot 10^{-6}}{1265,55}} = 6,43 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{м}}$$

Определение длины участка трубопровода, защищаемого одной СКЗ

$$l = \frac{2}{\alpha} \operatorname{arcch} \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, (\text{м})$$

Здесь $\operatorname{ch} \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$ - гиперболический косинус.

Гиперболический косинус рассчитывается по формуле

$$\operatorname{ch}^{\frac{e^x + e^{-x}}{2}}; \operatorname{arcch}^{x = \ln\left(x \pm \sqrt{x^2 + 1}\right)}$$

$$l = \frac{2}{6,43 \cdot 10^{-5}} \operatorname{arcch} \frac{-0,97}{-0,32} = 55676,6 \text{ м}$$

Определение числа катодных станций

$$N = \frac{L}{l}, (\text{компл.})$$

$$N = \frac{450}{55676,6 \cdot 10^{-3}} = 8 \text{ компл.}$$

Определение сопротивления растеканию тока с анодного заземлителя $R_a, \text{ Ом}$

Определение сопротивления растеканию тока с вертикальных стержней анодного заземлителя:

$$R_{\epsilon} = \frac{0,366 \cdot \rho_{zp,cp}}{n \cdot l_{\epsilon} \cdot \eta_{\epsilon}} \left[\lg \frac{2 \cdot l_{\epsilon}}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h - l_{\epsilon}}{4h - 3l_{\epsilon}} \right], (\text{Ом})$$

$$R_{\epsilon} = \frac{0,366 \cdot 54,05}{10 \cdot 3 \cdot 0,74} \left[\lg \frac{2 \cdot 3}{0,075} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3,5 - 3}{4 \cdot 3,5 - 3 \cdot 3} \right] = 1,8 \text{ Ом}$$

η_{ϵ} – коэффициент экранирования вертикальных трубчатых заземлителей, размещённых в ряд, без учёта влияния соединительной полосы.

Определение сопротивления растеканию тока с горизонтальной шины анодного заземления:

$$R_z = \frac{0,366 \cdot \rho_{zp,cp} \cdot \varphi}{l_z \cdot \eta_z} \left[\lg \frac{l_z^2}{d \cdot (h - l_{\epsilon})} \right], (\text{Ом})$$

где φ – коэффициент, $\varphi=2 \div 4$; η_z – коэффициент экранирования для горизонтальной рабочей шины анодного заземлителя, состоящего из расположенных в ряд вертикальных трубчатых электродов, объединённых шиной в земле.

$$R_z = \frac{0,366 \cdot 54,05 \cdot 3}{54 \cdot 0,75} \left[\lg \frac{54^2}{0,075 \cdot (3,5 - 3)} \right] = 7,17 \text{ Ом}$$

Определение общего сопротивления всей системы анодного заземления:

$$R_a = \frac{R_g \cdot R_z}{R_g + R_z}, (Ом)$$

$$R_a = \frac{1,8 \cdot 7,17}{1,8 + 7,17} = 1,44 Ом$$

Определение сопротивления соединительных проводов R_{np}

Выбор сечения соединительных проводов

$$S = \frac{\rho_{np}(l_{cm} + l_{np})}{0,2 \cdot R_a}, (мм^2)$$

где ρ_{np} – удельное сопротивление материала проводов: для алюминия

$$\rho_{np} = 0,029 Ом \cdot мм^2 / м$$

$$S = \frac{0,029 \cdot (10 + 350)}{0,2 \cdot 1,44} = 36,25 мм^2$$

Подбираем сечение провода, округляя значение S в большую сторону до ближайшего стандартного. Для провода марки А-50 $S = 49,48 мм^2$. Число и диаметр проволок $7 \times 3,00 мм$

Определение сопротивления соединительных проводов:

$$R_{np} = \rho \frac{l_{cm} + l_{np}}{S}, (Ом)$$

$$R_{np} = 0,029 \frac{10 + 350}{49,48} = 0,21 Ом$$

Определение величины тока в цепи СКЗ

$$I_{op} = \frac{2\alpha |E_{max}| th\left(\frac{\alpha \cdot l}{2}\right)}{R}, (A)$$

где $th\left(\frac{\alpha \cdot l}{2}\right)$ - гиперболический тангенс, который можно вычислить как:

$$th x = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}$$

$$I_{op} = \frac{2 \cdot 6,43 \cdot 10^{-5} \cdot 0,97 \cdot 0,9468}{5,24 \cdot 10^{-6}} = 23 A$$

$$\text{Или } I_{op} = \frac{2 \cdot E_{max}}{\alpha \cdot R_{uz, cp} + \frac{\rho_{zp, cp}}{\pi \cdot l_{np}}}, (A)$$

$$I_{op} = \frac{2 \cdot 0,97}{6,43 \cdot 10^{-5} \cdot 1265,55 + \frac{54,05}{3,14 \cdot 350}} = 15 A$$

В дальнейших расчётах используем наибольшее значение величины тока в цепи СКЗ. $I_{op} = 23 A$

Определим напряжение на выходе СКЗ

$$U = I_{\partial p} (R_a - R_{np}) + |E_{\max}| - |E_{\min}|, (B)$$

$$U = 23 \cdot (1,44 - 0,21) + 0,97 - 0,32 = 28,94 B$$

Определение необходимой мощности СКЗ:

$$P = I_{\partial p} \cdot U, (Bm)$$

$$P = 23 \cdot 28,94 = 665,62 Bm$$

Выбор типа СКЗ производится с учётом определённых значений мощности P , тока $I_{\partial p}$ и напряжения U в соответствии с таблицей основных электрических параметров катодной станции[3]

1. Тип станции	КЗУ – 1,2А
2. Номинальная выходная мощность, кВт	1,2
3. Номинальное выходное напряжение, В	24/48
4. Номинальный выходной ток, А	50/25
5. Габаритные размеры, мм	820x490x400
6. Масса, не более, кг	65

Определение срока службы анодного заземления

Определение веса анодного заземления:

$$G = \pi \cdot d \cdot \delta_{az} \cdot (n \cdot l_g + l_z) \cdot \gamma, (кг)$$

где $\gamma=850 \text{ кг/м}^3$

$$G = 3,14 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot (10 \cdot 3 + 54) \cdot 850 = 67,29 \text{ кг}$$

Определение площади поверхности анодного заземления:

$$S = \pi \cdot d \cdot (n \cdot l_g + l_z), (см^2)$$

$$S = 3,14 \cdot 7,5 \cdot (10 \cdot 300 + 5400) = 197920 \text{ см}^2$$

Определение плотности защитного тока на поверхности анодного заземления:

$$j = \frac{I_{\partial p} \cdot 1000}{S}, (mA/см^2)$$

$$j = \frac{23 \cdot 10^3}{197920} = 0,116 \text{ mA/см}^2$$

Срок службы анодного заземления:

$$T = 0,1096 \frac{G}{I_{\partial p}} \cdot \kappa_{\text{эф}}, (лет)$$

где $\kappa_{\text{эф}} \left(\frac{A}{кг} \cdot лет \right)$ - коэффициент эффективности анодного растворения заземлителя

$$T = 0,1096 \frac{67,29}{23} \cdot 4 = 1,28 \text{ лет}$$

Срок службы анодного заземления рекомендуется назначать в пределах 10-15 лет. Для обеспечения требуемого срока службы анодного заземления необходимо изменить габаритные размеры анодного заземления путём изменения диаметра труб и их количество.

$$\delta'_{az} = \delta_{az} \left(\frac{10 \div 15}{T} \right), (\text{мм})$$

$$\delta'_{az} = 4 \frac{13}{1,28} = 41 \text{ мм}$$

Подбираем анодный заземлитель [3]

Материал	ферросилид
Диаметр, мм	60
Длина, м	1,2
Масса, кг	26
Плотность, г·см ⁻³	7
Срок службы при нагрузке 1А на заземлитель, лет	80

Задание

Выполнить расчёт задачи 4 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Условный диаметр D_y , мм	820	1020	1220	1420	1020	820	1220	1420	1220	1020
Толщина стенки δ , мм	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
Длина трубопровода L , км	300	500	400	400	300	200	500	300	400	500
l_1 , км	75	70	80	70	80	60	80	75	70	75
$\rho_{гр.1}$, Ом·м	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$R_{из.1}$, Ом·м	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700
l_2 , км	75	80	70	80	70	40	70	75	80	75
$\rho_{гр.2}$, Ом·м	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
$R_{из.2}$, Ом·м	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
l_3 , км	90	300	150	150	90	40	200	80	200	250
$\rho_{гр.3}$, Ом·м	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$R_{из.3}$, Ом·м	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
l_4 , км	60	50	100	100	60	60	150	70	50	100

$\rho_{зр.4}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$R_{из.4}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
$l_{np}, \text{ м}$	300	350	400	400	350	300	400	400	400	350
$n, \text{ шт}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$d, \text{ мм}$	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
$l_6, \text{ м}$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$l_3, \text{ м}$	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
$h, \text{ м}$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$\delta_{аз}, \text{ мм}$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

* недостающие величины в исходных данных допускается использовать из примера задачи

Задача 5

Рассчитать напряжённое состояние трубопровода при изоляционно – укладочных работах совмещённым методом: диаметр трубопровода – $D_n=1,22\text{м}$; толщина стенки – $S=10\text{мм}$; внутренний диаметр трубопровода – $D_{вн}=1,2\text{м}$; площадь сечения – $F=0,038\text{м}^2$; осевой момент сопротивления – $W=11,41\cdot 10^{-3}\text{м}^3$; осевой момент инерции – $I=6,959\cdot 10^{-3}\text{м}^4$; вес трубы – $g_{тр}=g=2923,4\text{Н/м}^2$; расчётное сопротивление материала труб – $k_2=304,3\text{МПа}$; модуль упругости стали – $E=2,1\cdot 10^5\text{МПа}$; глубина траншеи – $h_{тр}=2,2\text{м}$; ширина траншеи по дну – $B=1,72\text{м}$; угол внутреннего трения грунта – $\varphi_{гр}=20^\circ$; вес изоляционной машины – $G_{из}=58\text{кН}$; вес очистной машины – $G_{оч}=69,3\text{кН}$; высота подъёма изоляционной машины – $h_{из}=3\text{м}$; высота подъёма очистной машины – $h_{оч}=1,6\text{м}$.

Решение

Определим значение комплексов:

1 комплекс - $0,164\cdot 1,6/3,0 = 0,087 \approx 0,09$

2 комплекс - $0,164\cdot (1,6 + 2,22)/3,0 = 0,209 \approx 0,21$

Определим значение коэффициентов α и β по диаграмме на пересечении в двух точках:

1 вариант: $\alpha=1,43$; $\beta=1,92$

2 вариант: $\alpha=1,55$; $\beta=2,28$

Дальнейший расчёт производим по первому варианту. Определим расстояния l_1 ; l_2 ; l_3 ; l_4 :

$$l_1 = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{E I h_{из}}{g_{тр}}} = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{2923,4}} = 86,09 \text{ м}$$

$$l_2 = 2,46(\beta - \alpha) \sqrt[4]{\frac{E I h_{из}}{g_{тр}}} = 2,46(1,92 - 1,43) \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{2923,4}} = 42,18 \text{ м}$$

$$l_3 = 2,46(\alpha - 1) \cdot \sqrt[4]{\frac{E I h_{из}}{g_{тр}}} = 2,46(1,43 - 1) \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{2923,4}} = 37,02 \text{ м}$$

$$l_4 = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{E I h_{oc}}{g_{mp}}} = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 1,6}{2923,4}} = 73,57 \text{ м}$$

Определим изгибающий момент

$$M_x = |M_1| = 0,518 \cdot \sqrt{E I h_{uz} g_{mp}} = 0,518 \cdot \sqrt{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 2923,4} = 1,85 \text{ мН} \cdot \text{м}$$

$$M_1 = -1,85 \text{ мН} / \text{м}$$

Проверим выполнение условия прочности:

$$|M| \leq R_2 \cdot W$$

$$M_1 \leq k_2 \cdot W = 304,3 \cdot 11,41 \cdot 10^{-3} = 3,47 \text{ мН} \cdot \text{м} \quad 1,85 \leq 3,47; \quad -1,85 \leq 3,47$$

Моменты M_x и M_1 удовлетворяют условию прочности.

Определим усилие на крюках трубоукладчика

$$K_1 = g_{mp} \cdot \left(1,64 \cdot \sqrt[4]{\frac{E I h_{uz}}{g_{mp}}} + \frac{l_2}{2} \right) + G_{uz} = 2923,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1,64 \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{2923,4}} + \frac{42,18}{2} \right) + 58 = 225,77 \text{ кН}$$

$$K_2 = g_{mp} \cdot \frac{l_2 + l_3}{2} + G_{oc} = 2923,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{42,18 + 37,02}{2} \right) + 69,3 = 185,07 \text{ кН}$$

$$K_3 = g_{mp} \cdot \left(1,2 \cdot \sqrt[4]{\frac{E I h_{uz}}{g_{mp}}} + \frac{l_3}{2} \right) = 2923,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1,2 \cdot \sqrt[4]{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{2923,4}} + \frac{37,02}{2} \right) = 122,75 \text{ кН}$$

Определим реакции R_0 и R_a

$$R_0 = \frac{6 E I h_{uz}}{l_1^3} + \frac{g_{mp} \cdot l_1}{4} = \frac{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 3}{86,09^3} + \frac{2923,4 \cdot 10^{-3} \cdot 86,09}{4} = 41,29 \text{ кН}$$

$$R_a = \frac{6 E I h_{oc}}{l_4^3} + \frac{g_{mp} \cdot l_4}{4} = \frac{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 6,959 \cdot 10^3 \cdot 1,6}{73,57^3} + \frac{2923,4 \cdot 10^{-3} \cdot 73,57}{4} = 35,29 \text{ кН}$$

Вылет стрелы $a_{\min}$ и $a_{\max}$ определим как:

$$a_{\min} = 0,3 + D_n / 2 = 0,3 + 1,22 / 2 = 0,91 \text{ м}$$

$$a_{\max} = B / 2 + h_{mp} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{zp} + D_n / 2 + 0,3 = 1,72 / 2 + 2,2 \cdot \operatorname{tg} 20 + 1,22 / 2 + 0,3 = 2,28 \text{ м}$$

Используя для работы в изоляционно – укладочной колонне краны – трубоукладчики ТГ-321 с моментом устойчивости $M_{уст} = 800 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и номинальной грузоподъемностью 320 кН.

Допускаемое вертикальное усилие

$$K_{дон} \leq k_{н.г.} \cdot \frac{M_{уст}}{a},$$

где $k_{н.г.}$ – коэффициент надёжности по грузоподъемности, учитывающий неровный рельеф местности; $k_{н.г.} = 0,9$; $M_{уст}$ – номинальный момент устойчивости крана-трубоукладчика, указанный в паспорте.

$$K_{don} \leq 0,9 \cdot \frac{800}{2,28} = 315,79 \text{ кН}$$

Сопоставив величину K_{don} со значениями K_1 ; K_2 ; K_3 можно сделать вывод, что одного крана – трубоукладчика ТГ-321 хватает на выполнение объема работ, а их общее число в колонне составит 3 ед. [3]

Задание

Выполнить расчёт задачи 5 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$D_n, \text{ м}$	0,82	1,02	1,22	1,42	1,02	0,82	1,22	1,42	1,22	1,02
$S, \text{ мм}$	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
$D_{вн}, \text{ м}$	0,800	0,996	1,190	1,383	0,996	0,800	1,190	1,383	1,190	0,996
$F, \text{ м}^2$	0,028	0,041	0,056	0,082	0,041	0,028	0,056	0,082	0,056	0,041
$W, \text{ м}^3$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$17,5 \cdot 10^{-3}$	$29,6 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$17,5 \cdot 10^{-3}$	$29,6 \cdot 10^{-3}$	$17,5 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
$I, \text{ м}^4$	$2,164 \cdot 10^{-3}$	$4,998 \cdot 10^{-3}$	$10,69 \cdot 10^{-3}$	$21,02 \cdot 10^{-3}$	$4,998 \cdot 10^{-3}$	$2,164 \cdot 10^{-3}$	$10,69 \cdot 10^{-3}$	$21,02 \cdot 10^{-3}$	$10,69 \cdot 10^{-3}$	$4,998 \cdot 10^{-3}$
$g_{mp}, \text{ Н/м}^2$	1957,6	2923,4	4655,8	6433,0	2923,4	1957,6	4655,8	6433,0	4655,8	2923,4
$\kappa_2, \text{ МПа}$	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3	304,3
$E, \text{ МПа}$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$
$h_{mp}, \text{ м}$	1,6	2,0	2,2	2,4	2,0	1,6	2,2	2,4	2,2	2,0
$B, \text{ м}$	1,23	1,53	1,83	2,13	1,53	1,23	1,83	2,13	1,83	1,53
$\varphi_{zp}, ^\circ$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$G_{из}, \text{ кН}$	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
$G_{оч}, \text{ кН}$	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3	69,3
$h_{из}, \text{ м}$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$h_{оч}, \text{ м}$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

* недостающие величины в исходных данных допускается использовать из примера задачи

Задача 6

Определить изменение давления во время испытаний в трубопроводе, вызванное падением температуры: диаметр трубопровода – $D_n=1220 \text{ мм}$; толщина стенки трубопровода – $\delta=10 \text{ мм}$; внутренний диаметр трубопровода – $D_{вн}=1200 \text{ мм}$; длина трубопровода – $L=12000 \text{ м}$; объем воздуха в начале испытания – $V_{г1}=0 \text{ м}^3$; давление в конце испытаний – $p_2=8,81 \text{ МПа}$; абсолютная температура в начале – $T_1=228^\circ \text{C}$; время повышения давления – $\Delta t=4 \text{ К}$.

Решение

Объём воды в испытуемом трубопроводе в начале испытаний:

$$V_{bi} = \frac{\pi \cdot D_{вн}^2}{2} \cdot L,$$

V_{bi} – объём воздуха в испытываемом секторе трубопровода в начале испытаний, $м^3$, при запуске скребка $V_{ri}=0$

$$V_{bi} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 12000 = 13564,8 м^3$$

Изменение давления в трубопроводе из-за падения температуры

$$\Delta p = \frac{V_{bi} \cdot \beta + \frac{V_{ri}}{T_i} - \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot D_{вн}^2 \cdot L_i \cdot a_i \cdot (1 + \mu)}{2}}{V_{bi} \cdot k + \frac{V_{ri}}{p_2} + \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot D_{вн}^2 \cdot L_i}{4} \cdot \left[\frac{(1 - \mu^2) \cdot D_{вн}}{\delta_i \cdot E} \right]} \cdot \Delta t,$$

где p_2 – давление в конце испытаний, $МПа$; T_i – абсолютная температура в начале испытаний, $^{\circ}C$; Δt – температурные изменения за период испытаний; $\mu=0,1$ – коэффициент Пуассона; $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода; L_i – длина трубопровода; $a_i=1,25 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ – температурный коэффициент расширения стали трубопровода; $\beta_i=2,1 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ – температурный коэффициент расширения воды; δ_i – толщина стенки трубопровода; $E=2,1 \cdot 10^{11} Па$ – модуль упругости стали; $k=46563 \cdot 10^{-14}$ – индекс сжатия воды.

$$\Delta p = \frac{13564,8 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} + \frac{0}{288} - \frac{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 12000 \cdot 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0,1)}{2}}{13564,8 \cdot 46563 \cdot 10^{-14} + \frac{0}{8,81 \cdot 10^5} + \frac{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 12000}{4} \cdot \left[\frac{(1 - 0,1^2) \cdot 1,2}{0,001 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} \right]} \cdot 4 = 0,12 МПа [3]$$

Задание

Выполнить расчёт задачи 6 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$D_n, м$	0,82	1,02	1,22	1,42	1,02	0,82	1,22	1,42	1,22	1,02
$\delta, мм$	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
$D_{вн}, м$	0,800	0,996	1,190	1,383	0,996	0,800	1,190	1,383	1,190	0,996
$L, м$	10000	15000	12000	20000	15000	10000	12000	20000	12000	15000
$V_{ri}, м^3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$p_2, МПа$	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81	8,81
$T_1, ^{\circ}C$	228	228	228	228	228	228	228	228	228	228
$\Delta t, K$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$E, МПа$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$

* недостающие величины в исходных данных допускается использовать из примера задачи

Задача 7

Рассчитать параметры продувки трубопровода $D_y=1200$ ($D_n=1220$ мм, $D_{вн}=1200$ мм) не очищенного протягиванием очистных устройств. Трубопровод проложен в суглинках с $\rho_{гп}=1600$ кг/м³; $f=0,4$; $\eta=0,5$; $c_{гп}=0,003$ МПа

Принимаем $P=0,5$ кг/м; коэффициент, зависящий от вида загрязнений $k_1=4$

Решение

Определим объём загрязнений:

$$V = P / \rho_{гп},$$

где P – масса загрязнений в расчёте на 1 м продуваемого трубопровода, кг; $\rho_{гп}$ – плотность грунта, кг/м³.

При расчёте параметров продувки трубопроводов, прокладываемых в сложных условиях, значение P увеличивают в 1,5÷2 раза. Следует иметь в виду, что каждое очистное устройство имеет своё ограничение «пробега» по износоустойчивости. Так очистной поршень типа ОП применяется на участках протяжённостью не более 40 км.

$$V = 0,5 / 1600 = 0,0003125 \approx 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}$$

Предельная длина участка, продуваемая в режиме механического перемещения загрязнений непосредственно перед поршнем:

$$L_{\max} = k_1 \cdot D_y / V,$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от вида загрязнений. При очистке от глинистых грунтов $k_1=2,5\div3,0$; от других загрязнений $k_1=4\div5$; D_y – условный диаметр трубопровода, м; V – объём загрязнений в расчёте на 1 м продуваемого трубопровода:

$$L_{\max} = 4 \cdot 1,2 / 3,1 \cdot 10^{-4} = 15500 \text{ м}$$

Распределение сопротивлений по длине участка трубопровода при его очистке:

$$\sigma = \frac{1}{10^4} \left(\frac{D_y \cdot \rho_{гп}}{4\eta} - \frac{10^4 \cdot c_{гп}}{\eta \cdot f} \right) \cdot \left(\exp \frac{5,09 \cdot \eta \cdot f \cdot V \cdot x}{D_y^3} - 1 \right),$$

где $c_{гп}$ – сцепление грунта; f – коэффициент трения при перемещении загрязнений по внутренней поверхности трубопровода; x – текущая координата по продуваемого участка. При расчётах используется усреднённые параметры грунтовых загрязнений и принимаются равным длине продуваемого участка L .

При $x=4000$ м

$$\sigma = \frac{1}{10^4} \left(\frac{1,2 \cdot 1600}{4 \cdot 0,5} - \frac{10^4 \cdot 0,003}{0,5 \cdot 0,4} \right) \cdot \left(\exp \frac{5,09 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 4000}{1,2^3} - 1 \right) = 0,087 \text{ МПа}$$

Определим сопротивление по длине участка трубопровода для $L_{\max}$

$$\sigma = \frac{1}{10^4} \left(\frac{1,2 \cdot 1600}{4 \cdot 0,5} - \frac{10^4 \cdot 0,003}{0,5 \cdot 0,4} \right) \cdot \left(\exp \frac{5,09 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 15500}{1,2^3} - 1 \right) = 1,29 \text{ МПа}$$

Определим сопротивление воздушному потоку:

$$\sigma_1 = \frac{1}{10^4} \left(\frac{D_y \cdot \rho_{гп}}{4\eta} - \frac{10^4 \cdot c_{гп}}{\eta \cdot f} \right) \cdot \left[\left(\exp \frac{5,09 \cdot \eta \cdot f \cdot V \cdot x}{D_y^3} + 1 \right) \cdot \left(\exp \frac{5,09 \cdot \eta \cdot f \cdot V \cdot x}{D_y^3} - 1 \right) \right]$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{10^4} \left(\frac{1,2 \cdot 1600}{4 \cdot 0,5} - \frac{10^4 \cdot 0,003}{0,5 \cdot 0,4} \right) \cdot \left[\left(\exp \frac{5,09 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 15500}{1,2^3} + 1 \right) \cdot \left(\exp \frac{5,09 \cdot 0,5 \cdot 0,4 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 15500}{1,2^3} - 1 \right) \right] = 23,21 \text{ МПа}$$

Определим значения A_1 и A_2 :

$$A_1 = \Delta p + \sigma + p_a$$

$$A_2 = \Delta p + \sigma_1 + p_a,$$

где Δp – сопротивление перемещению очистного поршня по трубопроводу, $\Delta p = 0,05 \div 0,1 \text{ МПа}$; p_a – атмосферное давление, принимаемое $p_a = 0,1 \text{ МПа}$; σ_1 – сопротивление воздушному потоку; σ – сопротивление по длине участка трубопровода.

$$A_1 = 0,05 + 1,29 + 0,1 = 1,44 \text{ МПа}$$

$$A_2 = 0,05 + 23,21 + 0,1 = 23,36 \text{ МПа}$$

Определим начальное давление в ресивере:

$$P_p = \left(n + \frac{L}{L_p} \right) \cdot A_1,$$

где n – коэффициент запаса, $n = 1,5 \div 2,0$; L – длина продуваемого участка, $L = L_{\max}$; L_p – длина ресивера, которую рекомендуется принимать равной длине продуваемого участка.

$$P_p = \left(2 + \frac{15500}{15500} \right) \cdot 1,44 = 4,32 \text{ МПа}$$

Тогда площадь внутренней полости трубопровода:

$$S = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ м}^2$$

Определим значение κ_3 для воздуха

$$\kappa_3 = 0,69 \cdot \sqrt{RT\mu},$$

где R – универсальная газовая постоянная, для воздуха $R = 287,04 \text{ Н/м}$; T – абсолютная температура газа; μ – коэффициент расхода крана обводной линии, ориентировочно можно принять $\mu = 0,6$.

$$\kappa_3 = 0,69 \cdot \sqrt{287,04 \cdot 293 \cdot 0,6} = 155$$

Площадь проходного сечения крана обводной линии можно определить:

$$S_k = \frac{S \cdot v}{\kappa_3 \cdot \left(\frac{P_p}{A_2} - \frac{L \cdot A_1}{L_p \cdot A_2} \right)},$$

где v – скорость движения поршня (например, для продувки сжатым воздухом или природным газом) подземных трубопроводов диаметром $250 \div 1420 \text{ мм}$ с использованием очистного поршня типа ОП, оптимальная скорость при этом $v = 8,5 \text{ м/с}$ и обеспечивается давлением в ресивере.

$$S_k = \frac{1,13 \cdot 8,5}{155 \cdot \left(\frac{4,32}{23,36} - \frac{15500 \cdot 1,44}{15500 \cdot 23,36} \right)} = \frac{1,13 \cdot 8,5}{155 \cdot \left(\frac{4,32}{23,36} - \frac{1 \cdot 1,44}{23,36} \right)} = 0,503 \text{ м}^2$$

Диаметр обводной линии и условный диаметр арматуры определим, как:

$$d_y = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{c_1}},$$

где c_1 – коэффициент, характеризующий сужение потока в запорной арматуре, ориентировочно $c_1=0,6 \div 0,9$. Примем $c_1=0,7$

$$d_y = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,503}{0,7}} = 0,96 \text{ м}$$

Окончательно принимаем диаметр $d_y=1020 \text{ мм}$ [3]

Задание

Выполнить расчёт задачи 7 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$D_n, \text{ м}$	0,82	1,02	1,22	1,42	1,02	0,82	1,22	1,42	1,22	1,02
$\delta, \text{ мм}$	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
$D_{вн}, \text{ м}$	0,800	0,996	1,190	1,383	0,996	0,800	1,190	1,383	1,190	0,996
$\rho_{зр}, \text{ кг/м}^3$	1600	1800	1700	1900	1800	1600	1700	1900	1700	1800
f	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
η	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$c_{зр}, \text{ МПа}$	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003

* недостающие величины в исходных данных допускается использовать из примера задачи

Задача 8

Определить время подъёма давления до испытательного в данном участке магистрального трубопровода, диаметром $D_n=1220 \text{ мм}$; внутренний диаметр трубопровода $D_{вн}=1200 \text{ мм}$; толщина стенки трубопровода $\delta=10 \text{ мм}$; протяжённость испытываемого участка $L=15500 \text{ м}$; испытательное давление $p_{исп}=8,25 \text{ МПа}$; начальное давление $p_0=1 \text{ МПа}$; производительность одного опрессовочного агрегата $Q=30 \text{ м}^3/\text{ч}$; число опрессовочных агрегатов $n=3$; модуль Юнга $E=206 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона $\nu=0,3$; часть испытываемого трубопровода занята воздухом $\kappa_0=0,05$; температура испытательной среды $T_0=288^\circ\text{K}$; критическая температура воздуха $T_{кр}=132,3^\circ\text{K}$; критическое давление воздуха $p_{кр}=3,77 \text{ МПа}$.

Решение

По уравнению Бергто определим коэффициент сжимаемости воздуха:

$$z_0 = 1 + 0,07 \frac{p_0 \cdot T_{кр}}{T_0 \cdot p_{кр}} \left[1 - 6 \cdot \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right)^2 \right]$$

$$z_0 = 1 + 0,07 \cdot \frac{1 \cdot 132,3}{288 \cdot 3,77} \left[1 - 6 \cdot \left(\frac{132,3}{288} \right)^2 \right] = 0,998$$

Время повышения давления до испытательного при наличии в трубопроводе воздушной пробки:

$$\Delta t = \frac{\pi \cdot D_{вн}^2 \cdot L}{4 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i} (p_{исп} - p_0) \cdot \left[\frac{(1 - \nu^2) \cdot D_{вн}}{\delta \cdot E} + \frac{k_0}{z_0 \cdot p_{исп}} \right],$$

где Q_i – производительность i -го опрессовочного агрегата; ν – коэффициент Пуассона; δ – толщина стенки трубопровода; E – модуль Юнга; z_0 – коэффициент сжимаемости воздуха; k_0 – часть испытательного трубопровода, занятая воздухом, для расчёта $k_0 = 0,05$ [3].

$$\Delta t = \frac{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 15500}{4 \cdot (3 \cdot 30)} \cdot (8,25 - 1) \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{(1 - 0,3^2) \cdot 1,2}{0,01 \cdot 206 \cdot 10^9} + \frac{0,05}{0,998 \cdot 8,25 \cdot 10^6} \right] = 9,32 \text{ ч}$$

Задание

Выполнить расчёт задачи 8 в соответствии с вариантом задания. Вариант задания выбирается по последней цифре зачётной книжки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$D_{н}, \text{м}$	0,82	1,02	1,22	1,42	1,02	0,82	1,22	1,42	1,22	1,02
$\delta, \text{мм}$	10,0	12,0	15,0	18,7	12,0	10,0	15,0	18,7	15,0	12,0
$D_{вн}, \text{м}$	0,800	0,996	1,190	1,383	0,996	0,800	1,190	1,383	1,190	0,996
$L, \text{м}$	По результатам расчётов задачи 7									
$p_{исп}, \text{МПа}$	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
$p_0, \text{МПа}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
k_0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$T_0, ^\circ\text{K}$	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
$T_{кр}, ^\circ\text{K}$	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3	132,3
$p_{кр}, \text{МПа}$	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77

* недостающие величины в исходных данных допускается использовать из примера задачи

Требования к оформлению работ

Работу оформлять в соответствии с общими требованиями к оформлению работ, при этом руководствуясь Методическими указаниями [2].

Список использованных источников

1. Вишневская Н.С. Решение типовых задач при сооружении магистральных трубопроводов[Текст]: метод. указания: в 2ч. ч.2/ Н.С. Вишневская, М.М. Бердник – Ухта: УГТУ, 2012. – 39с.
2. Миловзоров Г.В. Методические указания по оформлению контрольной работы, курсовой работы (проекта), выпускной квалификационной работы для всех форм обучения специальности 090800 – Бурение нефтяных и газовых скважин, профиля 131010 – Бурение нефтяных и газовых скважин. Направления «Нефтегазовое дело» [Текст] / Миловзоров Г.В., Иванова Т.Н. – Ижевск: УдГУ, 2012. – 37с.
3. Типовые расчёты при сооружении и ремонте газонефтепроводов[Текст]/ Л.И. Быков, Ф.М. Мустафин, С.К. Рафиков и др. – С-Пб.: Недра, 2006. – 824с.