

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

**Расчеты на прочность и устойчивость конструкций магистральных
трубопроводов**

Задание на курсовое проектирование по теоретической и прикладной механике

Уфа 2021

Курсовая работа по сопротивлению материалов для специальностей 21.03.01 «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки», 21.03.01 «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного транспорта», 21.05.06 «Магистральные трубопроводы и газонефтехранилища» введена в учебные планы с целью обеспечения связи фундаментальных задач курса сопротивления материалов с основными расчетами на прочность и устойчивость трубопроводов.

Приводятся задания к курсовой работе, план ее выполнения, варианты расчетных схем, а также указания по выполнению расчетов по всем частям работы.

1. Задание на курсовую работу

Выполнить расчеты на прочность и устойчивость конструкций магистральных трубопроводов.

1.1. Рассчитать ориентировочное значение толщины стенки магистрального трубопровода на действие внутреннего давления [1].

1.2. Определить внутренние усилия в сечениях трубопровода в соответствии с расчетной схемой (рисунок 1). Проанализировать напряженное состояние и прочность опасного сечения трубопровода посередине пролета и опасного опорного сечения. Построить кривую изогнутости оси трубопровода, используя уравнения метода начальных параметров [2]. Указать значения прогибов, с шагом равным $h = 0,1l$, где l – длина трубопровода.

1.3. Рассчитать трубопровод на продольную устойчивость при изменении температуры после монтажа на Δt [2,3].

1.4. Определить размеры сечения одной из опор с учетом внецентренности передачи давления и с выполнением условия безотрывности фундаментного блока от грунта. Форму сечения подобрать самостоятельно [2,4].

2. Пояснения к заданию

2.1. Исходные данные принять по таблицам 1 и 2. Номер группы в таблице 1 определяет преподаватель.

2.2. Завершить работу следует краткими выводами и рекомендациями по улучшению технических показателей конструкции в случае невыполнения условий прочности или жесткости.

Варианты рекомендаций:

- изменение длины пролета (уменьшение или увеличение числа опор);
- использование других марок сталей;
- увеличение толщины стенки трубопровода;
- меры по изменению характеристик сечения опоры.

2.3. Работу следует представить в формате MS Word; поля: слева, справа, сверху и внизу – 20 мм; шрифт текста - Times New Roman, 14 пт; межстрочный интервал – 1,5; красная строка (отступ) слева – 1,25 см; необходимо иметь работу в электронном варианте в формате .pdf.

2.4. Структура курсового проекта:

- титульный лист;

- задание;

- графическая часть: расчетная схема балки (трубопровода), эпюры поперечных сил и изгибающих моментов, положение изогнутой оси трубопровода. Показать для одного из опасных сечений эпюры нормальных и главных напряжений. Показать напряженное состояние опасной точки на поверхности опасного сечения трубопровода. Привести универсальные уравнения прогибов и углов поворота для своей расчетной схемы с указанием граничных условий. Показать расчетную схему с эпюрой напряжений для опасного сечения опоры;

- пояснительная записка;

- выводы;

- список использованных источников.

3. Расчетные данные по группам

Таблица 1 – исходные данные

Номер группы*	Внутреннее давление в трубе P, МПа	Изменение температуры Δt , °С	Марка стали	Допускаемый прогиб, f_{\max} ($f_{\max} < nD_H$)
1	4,0	45	09Г2С	$n = 0,5$
2	4,5	55	К60	$n = 0,6$
3	7,0	65	12ГСБ	$n = 0,5$
4	5,5	45	К56	$n = 0,3$
5	6,0	55	10Г2ФБ	$n = 0,4$
6	6,5	65	10Г2СБ	$n = 0,3$
7	5,0	60	09Г2С	$n = 0,5$
8	7,5	50	К60	$n = 0,5$
9	8,0	40	К56	$n = 0,6$
10	5,0	55	10Г2ФБ	$n = 0,4$

*Номер группы определяет преподаватель

4. Расчетные данные по вариантам

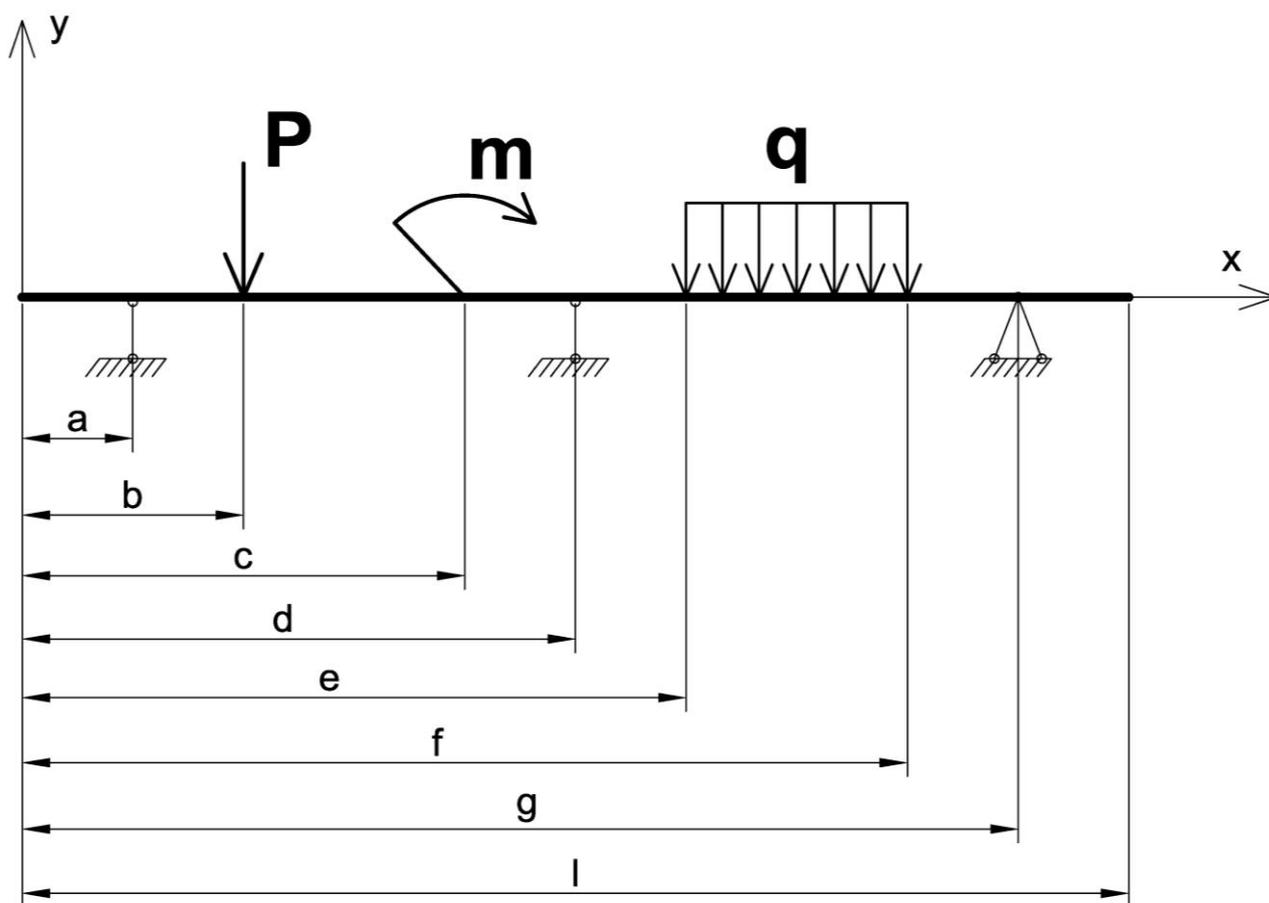


Рисунок 1 – расчетная схема

Таблица 2 – исходные данные к рисунку1

№вар	a, l	b, l	c, l	d, l	e, l	f, l	g, l	$l, м$	$F, қл$	$m, қл^2$	$q, кН$	$Dн, мм$	Сечение опоры	Эксцентриситет опоры $e, м$
1	0,1	0,8	1,0	0,6	0	0,9	0,8	18	1,3	0,10	1	219	Двутавр	0,4
2	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	1,5	0,15	4	325	Труба	0,5
3	0,1	0,2	0,2	0,7	0,5	1,0	0,9	26	1,0	0,12	10	426	Швеллер	0,4
4	0,0	0,3	0,8	0,7	0,0	0,8	0,9	22	1,0	0,10	10	530	Двутавр	0,3
5	0,0	0,1	0,2	0,6	0,1	1,0	0,8	27	0,3	0,05	5	630	Труба	0,4
6	0,2	0,1	0,6	0,6	0,3	1,0	0,9	26	0,6	0,1	15	720	Швеллер	0,25
7	0,1	0,8	1,0	0,7	0,4	1,0	1,0	21	0,5	0,09	10	820	Двутавр	0,3
8	0,0	0,1	0,7	0,4	0,5	1,0	1,0	28	0,5	0,08	15	920	Труба	0,25
9	0,0	1,0	0,8	0,4	0,2	1,0	0,9	30	0,5	0,08	18	1020	Швеллер	0,5
10	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	1,0	25	0,8	0,1	20	1220	Двутавр	0,4
11	0,1	1,0	0,5	0,5	0,1	0,0	0,8	33	0,9	0,1	30	1420	Труба	0,2
12	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,4	0,15	1,5	219	Швеллер	0,25
13	0,2	0,6	0,1	0,5	0,9	1,0	1,0	25	1,8	0,2	6	325	Двутавр	0,4
14	0,0	0,6	0,1	0,7	0,4	1,0	1,0	27	0,8	0,08	9	426	Труба	0,3
15	0,0	0,7	0,5	0,7	0,0	0,6	0,9	28	0,5	0,15	10	530	Швеллер	0,5
16	0,1	1,0	0,7	0,6	0,1	0,6	1,0	29	0,4	0,06	14	630	Двутавр	0,25
17	0,2	0,4	0,3	0,6	0,0	0,5	0,9	29	0,5	0,09	18	720	Труба	0,5
18	0,1	0,8	0,7	0,5	0,2	1,0	0,9	26	0,6	0,1	12	820	Швеллер	0,4
19	0,1	0,7	1,0	0,5	0	0,9	1,0	26	0,7	0,05	26	920	Двутавр	0,3
20	0,2	0,2	1,0	0,6	0	0,6	1,0	31	0,5	0,08	15	1020	Труба	0,2
21	0,1	0,1	1,0	0,4	0,0	0,8	0,9	30	1,0	0,12	22	1220	Швеллер	0,25
22	0,0	0,2	0,4	0,4	0,1	0,7	1,0	27	0,6	0,08	28	1420	Двутавр	0,35
23	0,0	1,0	0,2	0,7	0,0	0,5	1,0	21	1,5	0,12	2	219	Труба	0,45
24	0,0	0,6	0,6	0,3	0,2	1,0	1,0	26	0,4	0,08	5,5	325	Швеллер	0,5
25	0,1	0,4	0,7	0,7	0	0,5	0,8	28	0,9	0,12	8	426	Двутавр	0,4
26	0,2	0,3	0,0	0,4	0,0	0,5	0,8	25	0,4	0,05	1	219	Труба	0,3
27	0,0	0,6	1,0	0,6	0,0	0,8	1,0	23	0,7	0,08	5	325	Швеллер	0,5
28	0,0	1,0	0,3	0,3	0	0,6	0,9	23	0,6	0,05	8	426	Двутавр	0,25
29	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,0	26	0,4	0,10	7	530	Труба	0,5
30	0,2	0,1	0,2	0,6	0,2	1,0	1,0	26	0,5	0,08	13	630	Швеллер	0,4

№вар	a, l	b, l	c, l	d, l	e, l	f, l	g, l	$l, м$	F, ql	m, ql^2	$q, кН$	$Dн, мм$	Сечение опоры	Эксцентриситет опоры $e, м$
31	0,1	0,8	1,0	0,6	0	0,9	0,8	18	-1,3	0,10	1	219	Двутавр	0,5
32	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,5	0,15	4	325	Труба	0,4
33	0,1	0,2	0,2	0,7	0,5	1,0	0,9	26	-1,0	0,12	10	426	Швеллер	0,3
34	0,0	0,3	0,8	0,7	0,0	0,8	0,9	22	-1,0	0,10	10	530	Двутавр	0,4
35	0,0	0,1	0,2	0,6	0,1	1,0	0,8	27	-0,3	0,05	5	630	Труба	0,25
36	0,2	0,1	0,6	0,6	0,3	1,0	0,9	26	-0,6	0,1	15	720	Швеллер	0,3
37	0,1	0,8	1,0	0,7	0,4	1,0	1,0	21	-0,5	0,09	10	820	Двутавр	0,25
38	0,0	0,1	0,7	0,4	0,5	1,0	1,0	28	-0,5	0,08	15	920	Труба	0,5
39	0,0	1,0	0,8	0,4	0,2	1,0	0,9	30	-0,5	0,08	18	1020	Швеллер	0,4
40	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	1,0	25	-0,8	0,1	20	1220	Двутавр	0,2
41	0,1	1,0	0,5	0,5	0,1	0,0	0,8	33	-0,9	0,1	30	1420	Труба	0,25
42	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,4	0,15	1,5	219	Швеллер	0,4
43	0,2	0,6	0,1	0,5	0,9	1,0	1,0	25	-1,8	0,2	6	325	Двутавр	0,3
44	0,0	0,6	0,1	0,7	0,4	1,0	1,0	27	-0,8	0,08	9	426	Труба	0,5
45	0,0	0,7	0,5	0,7	0,0	0,6	0,9	28	-0,5	0,15	10	530	Швеллер	0,25
46	0,1	1,0	0,7	0,6	0,1	0,6	1,0	29	-0,4	0,06	14	630	Двутавр	0,5
47	0,2	0,4	0,3	0,6	0,0	0,5	0,9	29	-0,5	0,09	18	720	Труба	0,4
48	0,1	0,8	0,7	0,5	0,2	1,0	0,9	26	-0,6	0,1	12	820	Швеллер	0,3
49	0,1	0,7	1,0	0,5	0	0,9	1,0	26	-0,7	0,05	26	920	Двутавр	0,2
50	0,2	0,2	1,0	0,6	0	0,6	1,0	31	-0,5	0,08	15	1020	Труба	0,25
51	0,1	0,1	1,0	0,4	0,0	0,8	0,9	30	-1,0	0,12	22	1220	Швеллер	0,2
52	0,0	0,2	0,4	0,4	0,1	0,7	1,0	27	-0,6	0,08	28	1420	Двутавр	0,25
53	0,0	1,0	0,2	0,7	0,0	0,5	1,0	21	-1,5	0,12	2	219	Труба	0,35
54	0,0	0,6	0,6	0,3	0,2	1,0	1,0	26	-0,4	0,08	5,5	325	Швеллер	0,45
55	0,1	0,4	0,7	0,7	0	0,5	0,8	28	-0,9	0,12	8	426	Двутавр	0,5
56	0,2	0,3	0,0	0,4	0,0	0,5	0,8	25	-0,4	0,05	1	219	Труба	0,4
57	0,0	0,6	1,0	0,6	0,0	0,8	1,0	23	-0,7	0,08	5	325	Швеллер	0,3
58	0,0	1,0	0,3	0,3	0	0,6	0,9	23	-0,6	0,05	8	426	Двутавр	0,5
59	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,0	26	-0,4	0,10	7	530	Труба	0,4
60	0,2	0,1	0,2	0,6	0,2	1,0	1,0	26	-0,5	0,08	13	630	Швеллер	0,3

№вар	a, l	b, l	c, l	d, l	e, l	f, l	g, l	$l, м$	F, ql	m, ql^2	$q, кН$	$Dн, мм$	Сечение опоры	Эксцентриситет опоры $e, м$
61	0,1	0,8	1,0	0,6	0	0,9	0,8	18	1,3	-0,10	1	219	Двутавр	0,5
62	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	1,5	-0,15	4	325	Труба	0,4
63	0,1	0,2	0,2	0,7	0,5	1,0	0,9	26	1,0	-0,12	10	426	Швеллер	0,3
64	0,0	0,3	0,8	0,7	0,0	0,8	0,9	22	1,0	-0,10	10	530	Двутавр	0,4
65	0,0	0,1	0,2	0,6	0,1	1,0	0,8	27	0,3	-0,05	5	630	Труба	0,25
66	0,2	0,1	0,6	0,6	0,3	1,0	0,9	26	0,6	-0,1	15	720	Швеллер	0,3
67	0,1	0,8	1,0	0,7	0,4	1,0	1,0	21	0,5	-0,09	10	820	Двутавр	0,25
68	0,0	0,1	0,7	0,4	0,5	1,0	1,0	28	0,5	-0,08	15	920	Труба	0,5
69	0,0	1,0	0,8	0,4	0,2	1,0	0,9	30	0,5	-0,08	18	1020	Швеллер	0,4
70	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	1,0	25	0,8	-0,1	20	1220	Двутавр	0,2
71	0,1	1,0	0,5	0,5	0,1	0,0	0,8	33	0,9	-0,1	30	1420	Труба	0,25
72	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,4	-0,15	1,5	219	Швеллер	0,4
73	0,2	0,6	0,1	0,5	0,9	1,0	1,0	25	1,8	-0,2	6	325	Двутавр	0,3
74	0,0	0,6	0,1	0,7	0,4	1,0	1,0	27	0,8	-0,08	9	426	Труба	0,5
75	0,0	0,7	0,5	0,7	0,0	0,6	0,9	28	0,5	-0,15	10	530	Швеллер	0,25
76	0,1	1,0	0,7	0,6	0,1	0,6	1,0	29	0,4	-0,06	14	630	Двутавр	0,5
77	0,2	0,4	0,3	0,6	0,0	0,5	0,9	29	0,5	-0,09	18	720	Труба	0,4
78	0,1	0,8	0,7	0,5	0,2	1,0	0,9	26	0,6	-0,1	12	820	Швеллер	0,3
79	0,1	0,7	1,0	0,5	0	0,9	1,0	26	0,7	-0,05	26	920	Двутавр	0,2
80	0,2	0,2	1,0	0,6	0	0,6	1,0	31	0,5	-0,08	15	1020	Труба	0,25
81	0,1	0,1	1,0	0,4	0,0	0,8	0,9	30	1,0	-0,12	22	1220	Швеллер	0,2
82	0,0	0,2	0,4	0,4	0,1	0,7	1,0	27	0,6	-0,08	28	1420	Двутавр	0,25
83	0,0	1,0	0,2	0,7	0,0	0,5	1,0	21	1,5	-0,12	2	219	Труба	0,35
84	0,0	0,6	0,6	0,3	0,2	1,0	1,0	26	0,4	-0,08	5,5	325	Швеллер	0,45
85	0,1	0,4	0,7	0,7	0	0,5	0,8	28	0,9	-0,12	8	426	Двутавр	0,5
86	0,2	0,3	0,0	0,4	0,0	0,5	0,8	25	0,4	-0,05	1	219	Труба	0,4
87	0,0	0,6	1,0	0,6	0,0	0,8	1,0	23	0,7	-0,08	5	325	Швеллер	0,3
88	0,0	1,0	0,3	0,3	0	0,6	0,9	23	0,6	-0,05	8	426	Двутавр	0,5
89	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,0	26	0,4	-0,10	7	530	Труба	0,4
90	0,2	0,1	0,2	0,6	0,2	1,0	1,0	26	0,5	-0,08	13	630	Швеллер	0,3

№вар	a, l	b, l	c, l	d, l	e, l	f, l	g, l	$l, м$	F, ql	m, ql^2	$q, кН$	$Dн, мм$	Сечение опоры	Эксцентриситет опоры $e, м$
91	0,1	0,8	1,0	0,6	0	0,9	0,8	18	-1,3	-0,10	1	219	Двутавр	0,5
92	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,5	-0,15	4	325	Труба	0,4
93	0,1	0,2	0,2	0,7	0,5	1,0	0,9	26	-1,0	-0,12	10	426	Швеллер	0,3
94	0,0	0,3	0,8	0,7	0,0	0,8	0,9	22	-1,0	-0,10	10	530	Двутавр	0,4
95	0,0	0,1	0,2	0,6	0,1	1,0	0,8	27	-0,3	-0,05	5	630	Труба	0,25
96	0,2	0,1	0,6	0,6	0,3	1,0	0,9	26	-0,6	-0,1	15	720	Швеллер	0,3
97	0,1	0,8	1,0	0,7	0,4	1,0	1,0	21	-0,5	-0,09	10	820	Двутавр	0,25
98	0,0	0,1	0,7	0,4	0,5	1,0	1,0	28	-0,5	-0,08	15	920	Труба	0,5
99	0,0	1,0	0,8	0,4	0,2	1,0	0,9	30	-0,5	-0,08	18	1020	Швеллер	0,4
100	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	1,0	1,0	25	-0,8	-0,1	20	1220	Двутавр	0,2
101	0,1	1,0	0,5	0,5	0,1	0,0	0,8	33	-0,9	-0,1	30	1420	Труба	0,25
102	0,0	0,3	0,6	0,6	0,2	1,0	0,9	22	-1,4	-0,15	1,5	219	Швеллер	0,4
103	0,2	0,6	0,1	0,5	0,9	1,0	1,0	25	-1,8	-0,2	6	325	Двутавр	0,3
104	0,0	0,6	0,1	0,7	0,4	1,0	1,0	27	-0,8	-0,08	9	426	Труба	0,5
105	0,0	0,7	0,5	0,7	0,0	0,6	0,9	28	-0,5	-0,15	10	530	Швеллер	0,25
106	0,1	1,0	0,7	0,6	0,1	0,6	1,0	29	-0,4	-0,06	14	630	Двутавр	0,5
107	0,2	0,4	0,3	0,6	0,0	0,5	0,9	29	-0,5	-0,09	18	720	Труба	0,4
108	0,1	0,8	0,7	0,5	0,2	1,0	0,9	26	-0,6	-0,1	12	820	Швеллер	0,3
109	0,1	0,7	1,0	0,5	0	0,9	1,0	26	-0,7	-0,05	26	920	Двутавр	0,2
110	0,2	0,2	1,0	0,6	0	0,6	1,0	31	-0,5	-0,08	15	1020	Труба	0,25
111	0,1	0,1	1,0	0,4	0,0	0,8	0,9	30	-1,0	-0,12	22	1220	Швеллер	0,2
112	0,0	0,2	0,4	0,4	0,1	0,7	1,0	27	-0,6	-0,08	28	1420	Двутавр	0,25
113	0,0	1,0	0,2	0,7	0,0	0,5	1,0	21	-1,5	-0,12	2	219	Труба	0,35
114	0,0	0,6	0,6	0,3	0,2	1,0	1,0	26	-0,4	-0,08	5,5	325	Швеллер	0,45
115	0,1	0,4	0,7	0,7	0	0,5	0,8	28	-0,9	-0,12	8	426	Двутавр	0,5
116	0,2	0,3	0,0	0,4	0,0	0,5	0,8	25	-0,4	-0,05	1	219	Труба	0,4
117	0,0	0,6	1,0	0,6	0,0	0,8	1,0	23	-0,7	-0,08	5	325	Швеллер	0,3
118	0,0	1,0	0,3	0,3	0	0,6	0,9	23	-0,6	-0,05	8	426	Двутавр	0,5
119	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,0	26	-0,4	-0,10	7	530	Труба	0,4
120	0,2	0,1	0,2	0,6	0,2	1,0	1,0	26	-0,5	-0,08	13	630	Швеллер	0,3

5. Пример и методические указания по выполнению курсовой работы

Исходные данные:

- Давление, $P = 7,0$ МПа;
- Изменение температуры $\Delta t = 65$ °С;
- Марка стали 12ГСБ: $R_1 = 510$ МПа; $R_2 = 350$ МПа;
- $f_{\max} < 0,5 \cdot D_n$;
- $q = 10$ кН/м
- $m = 0,06 \cdot ql^2 = 0,06 \cdot 10 \cdot 21^2 = 264,4$ кН·м;
- $P = 1,2 \cdot ql = 1,2 \cdot 10 \cdot 21 = 252$ кН;
- $D = 1220$ мм;
- $l = 21$ м.

5.1 Графическая часть

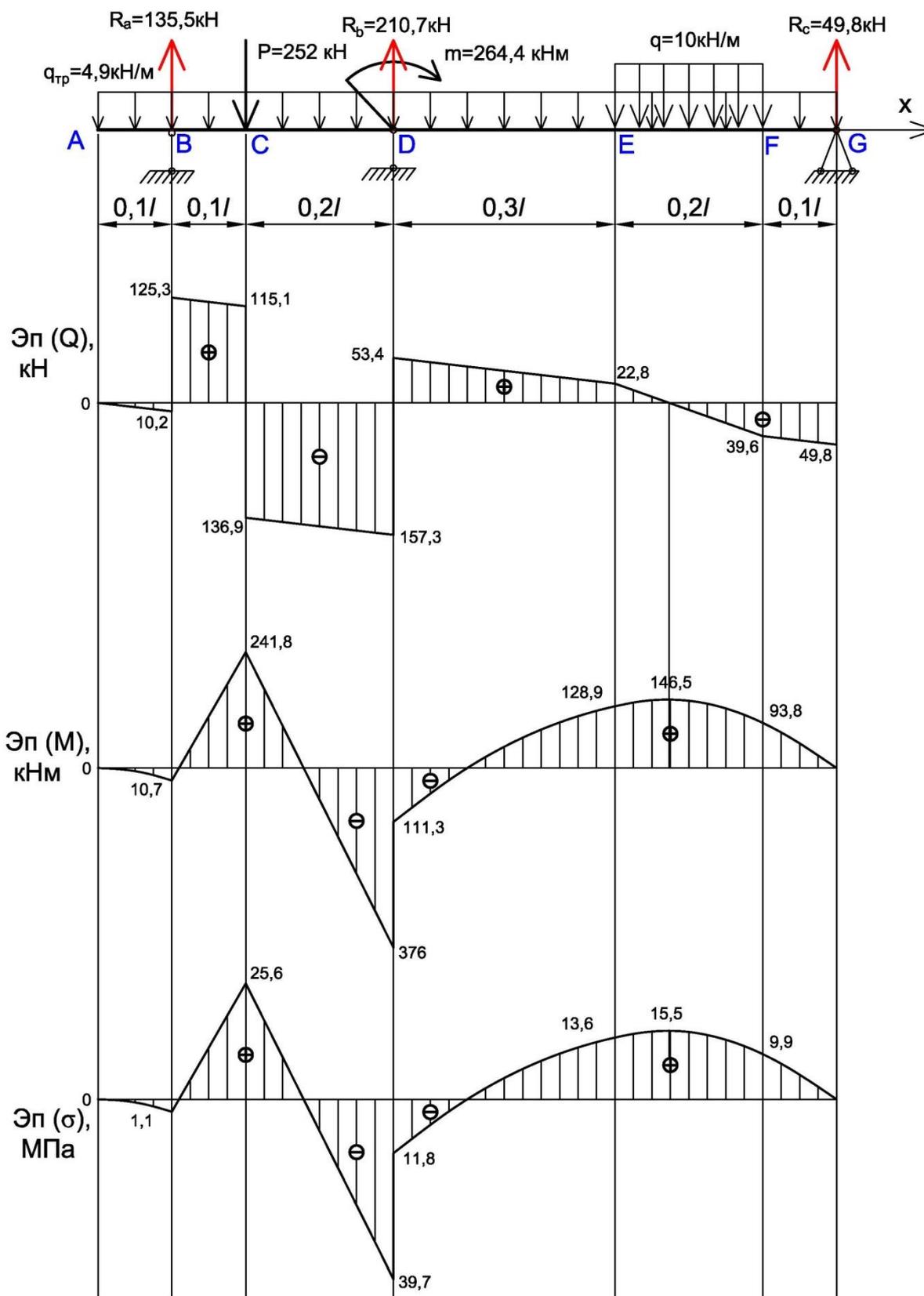


Рисунок 2 – поперечных сил и изгибающих моментов

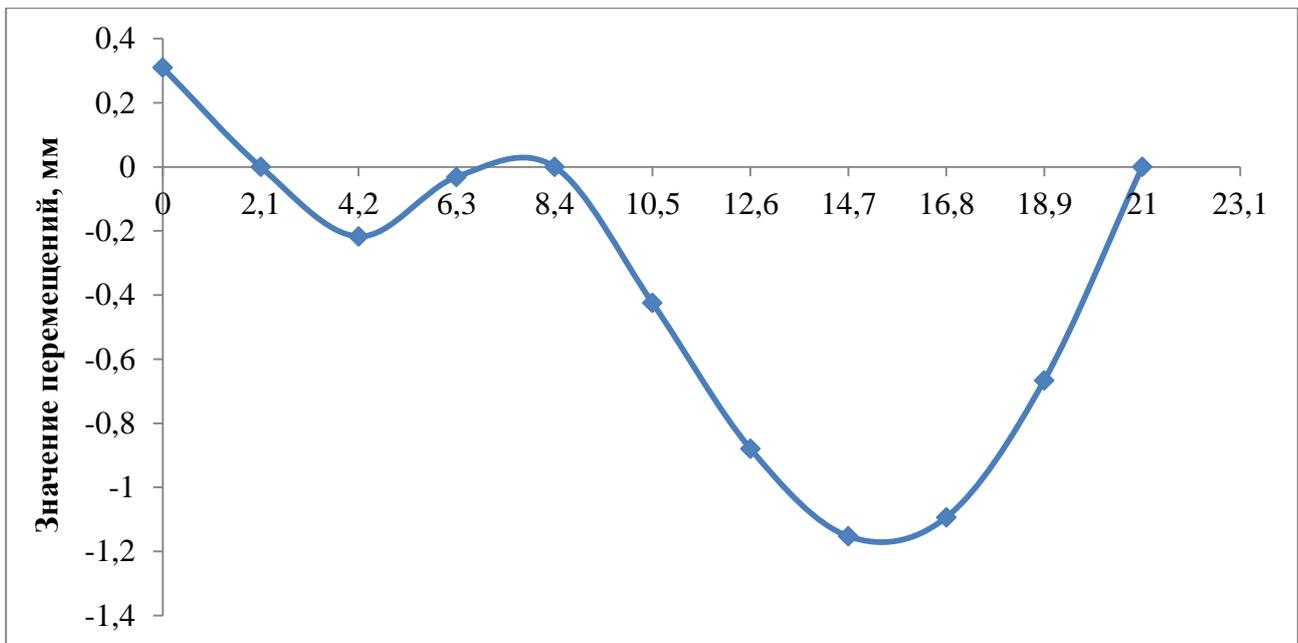


Рисунок 3 – Эпюра перемещений

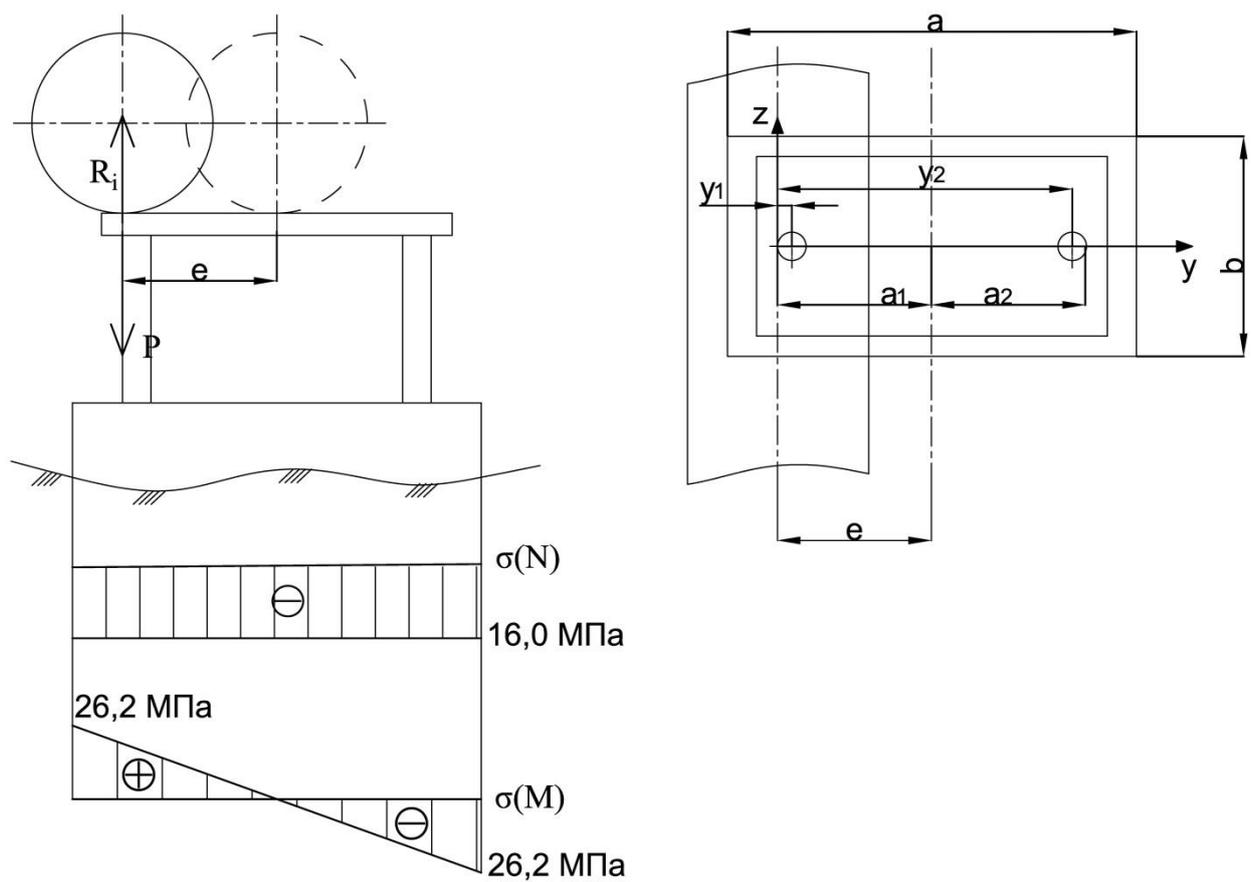


Рисунок 4 – Характеристики опасной опоры

5.2 Расчет толщины стенки трубопровода

Трубы для проектируемого участка трубопровода марки стали 12Г2СБ в исходных данных представлены значения расчетных сопротивлений по пределу прочности $R_1 = 510$ МПа и по пределу текучести $R_2 = 350$ МПа.

1) Толщина стенки продуктопровода определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{n_p \cdot p \cdot D_n}{2 \cdot (R_1 + n_p \cdot p)}, \quad (1)$$

где $n_p = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке от внутреннего давления.

$$\delta = \frac{1,1 \cdot 7,0 \cdot 10^6 \cdot 1,22}{2 \cdot (510 + 1,1 \cdot 7,0) \cdot 10^6} = 0,0091 \text{ м} = 9,1 \text{ мм}.$$

В соответствии с СП 36.13330.2012 полученное значение толщины стенки должно соответствовать следующим условиям:

- для труб диаметром до 219 мм минимальное значение толщины стенки – 3 мм;
- для труб диаметром более 219 мм минимальное значение толщины стенки – 4 мм;
- для учета степени ответственности трубопроводов диаметром 1020 мм и более – минимальное значение 12 мм.

9,1 мм < 12 мм, условие не выполняется.

Принимаем номинальное значение толщины стенки равное 12 мм.

2) Расчетное значение погонного веса трубопровода определяется из суммы веса металла трубы и веса перекачиваемого продукта,

Расчетное значение от веса металла трубы определяется по формуле:

$$q_m = n \cdot \rho_m \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot (D_n^2 - D_{вн}^2)}{4}, \quad (2)$$

где $n = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке от веса металла трубы;

ρ_m – плотность металла трубы, 7850 кг/м³;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, определяемый по формуле:

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{н}} - 2 \cdot \delta_{\text{н}}, \quad (3)$$

$$D_{\text{вн}} = 1220 - 2 \cdot 12 = 1196 \text{ мм}.$$

Тогда:

$$q_{\text{м}} = 1,1 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot \frac{\pi \cdot (1,22^2 - 1,196^2)}{4} = 3855,8 \text{ Н / м}$$

Ориентировочное значение вес перекачиваемого природного газа:

$$q_{\text{нр}} = 10^2 p D_{\text{вн}}^2, \quad (4)$$

$$q_{\text{нр}} = 10^2 \cdot 7,0 \cdot 1,196^2 = 1001,3 \text{ Н / м}.$$

5.3 Раскрытие статической неопределимости и расчет реакций в опорах

Балка является один раз статически неопределимой, так как содержит 4 неизвестные опорные реакции, а количество независимых уравнений равновесия - 3.

Трубопровод разбивается на 10 участков длиной h , таким образом, $h = (1/10)l$.

Запишем уравнение суммы проекций всех сил на ось Y :

$$\sum F(y) = R_A - P + R_B - q \cdot 2h + R_C - q_{\text{мр}} \cdot l = 0, \quad (5)$$

$$R_A + R_B + R_C = P + q \cdot 2h + q_{\text{мр}} \cdot l = 0.$$

Запишем универсальное уравнение оси изогнутой балки:

$$y_x = y_0 + \theta_0 x + \frac{1}{EI} \left[\pm \frac{m_i (x - a_i)^2}{2!} \pm \frac{F_i (x - b_i)^3}{3!} \pm \frac{q(x - c_i)^4}{4!} \right]. \quad (6)$$

$$a_i = 4h; b_i = h; 2h; 4h; 10h; c_i = 6h.$$

Выберем начало координат в начале балки и запишем уравнение 4 для участков II, IV, VI соответственно:

$$\begin{aligned}
y(0, 1l < x < 0, 2l) &= \frac{1}{EI} \left[-\frac{q_{mp}x^4}{24} + \frac{R_A(x-0, 1l)^3}{6} \right] + \theta_0 x + Y_0; \\
y(0, 4l < x < 0, 7l) &= \frac{1}{EI} \left[\begin{aligned} &-\frac{q_{mp}x^4}{24} + \frac{R_A(x-0, 1l)^3}{6} - \frac{P(x-0, 2l)^3}{6} + \\ &\frac{m(x-0, 4l)^2}{2} + \frac{R_B(x-0, 4l)^3}{6} \end{aligned} \right] + \theta_0 x + Y_0; \\
y(0, 9l < x < l) &= \frac{1}{EI} \left[\begin{aligned} &-\frac{q_{mp}x^4}{24} + \frac{R_A(x-0, 1l)^3}{6} - \frac{P(x-0, 2l)^3}{6} + \\ &\frac{m(x-0, 4l)^2}{2} + \frac{R_B(x-0, 4l)^3}{6} - \frac{q(x-0, 7l)^4}{24} + \\ &+ \frac{q(x-0, 9l)^4}{24} + \frac{R_C(x-1 \cdot l)^3}{6} \end{aligned} \right] + \theta_0 x + Y_0.
\end{aligned}$$

Запишем систему уравнений из условия $y = 0$ на опоре:

$$\begin{cases} x = 0, 1l; y = 0, \\ x = 0, 4l; y = 0, \\ x = 1l; y = 0, \\ R_A + R_B + R_C = q_{mp} \cdot l + q(0, 9 - 0, 7)l + P. \end{cases} \quad (7)$$

Обозначим выражение:

$$\frac{m(x-0, 4l)^2}{2} - \frac{P(x-0, 2l)^3}{6} - \frac{q(x-0, 7l)^4}{24} + \frac{q(x-0, 9l)^4}{24} - \frac{q_{mp}x^4}{24},$$

как $C_{(x)}$.

$$\begin{cases} \frac{1}{EI} \cdot \left(C_{(x)} + \frac{R_B (0,1l - 0,4l)^3}{6} + \frac{R_C (0,1l - l)^3}{6} \right) + \theta_0 \cdot 0,1l = 0, \\ \frac{1}{EI} \cdot \left(C_{(x)} + \frac{R_A (0,4l - 0,1l)^3}{6} + \frac{R_C (0,4l - l)^3}{6} \right) + \theta_0 \cdot 0,4l = 0, \\ \frac{1}{EI} \cdot \left(C_{(x)} + \frac{R_A (1l - 0,1l)^3}{6} + \frac{R_B (1l - 0,4l)^3}{6} \right) + \theta_0 \cdot 1l = 0, \\ R_A + R_B + R_C = q_{mp} \cdot l + q \cdot 0,2l + P. \end{cases} \quad (8)$$

Преобразуем систему к следующему виду:

$$\begin{cases} -(0,3l)^3 R_B - 0,81l^3 R_C + 6EI \cdot 0,1l \cdot \theta_0 = -6C_{(0,1l)}, \\ (0,3l)^3 R_A - (0,l)^3 R_C + 6EI \cdot 0,4l \cdot \theta_0 = -6C_{(0,4l)}, \\ (0,9l)^3 R_A + (0,6l)^3 R_B + 6EI \cdot 1l \cdot \theta_0 = -6C_{(1l)}, \\ R_A + R_B + R_C = q_{mp} \cdot l + q \cdot 0,2l + P. \end{cases} \quad (9)$$

Примечание:

$C(0,1l)$ означает что:

$$C = \frac{m(x-0,4l)^2}{2} - \frac{P(x-0,2l)^3}{6} - \frac{q(x-0,7l)^4}{24} + \frac{q(x-0,9l)^4}{24} + \frac{q_{mp}x^4}{24}.$$

Вычисляется при $x = 0,1l$.

Составляется матрица:

$$A: \begin{vmatrix} 0 & -(0,3l)^3 & -(0,9l)^3 & 0,6EI \\ (0,3l)^3 & 0 & -(0,6l)^3 & 2,4EI \\ (0,9l)^3 & (0,6l)^3 & 0 & 6EI \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} B: \begin{vmatrix} -6C_{(0,1l)} \\ -6C_{(0,4l)} \\ -6C_{(1l)} \\ q_{mp}l + 0,2ql + P \end{vmatrix}.$$

Для решения, необходимо составить матрицу обратную матрице А и перемножить полученную матрицу с матрицей В. Такие вычисления удобнее всего делать в MS Excel.

Решая данную систему уравнений получаем:

$$R_A = 135,5 \text{ кН};$$

$$R_B = 210,7 \text{ кН};$$

$$R_C = 49,8 \text{ кН};$$

$$\theta_0 = -0,17 \cdot 10^{-3} \text{ град.}$$

5.4 Эпюры поперечных сил и изгибающих моментов, эпюра перемещений

Для того чтобы построить эпюры сил и моментов (рисунок 2) записываем уравнения поперечных сил и изгибающих моментов на участках балки, используя метод сечений:

На участке АВ: ($0 \leq x_1 \leq 2,1$ м):

$$Q(x_1) = -q_{\text{тр}} \cdot x = -4,8571 \cdot x;$$

$$Q(0) = -0 \text{ кН};$$

$$Q(2,1) = -10,2 \text{ кН};$$

$$M(x_1) = -q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 = -4,8571 \cdot x^2/2;$$

$$M(0) = 0 \text{ кНм};$$

$$M(2,1) = -10,71 \text{ кНм.}$$

На участке ВС: ($2,1 \leq x_2 \leq 4,2$ м):

$$Q(x_2) = +R_B - q_{\text{тр}} \cdot x = +135,5 - 4,8571 \cdot x;$$

$$Q(2,1) = 125,327 \text{ кН};$$

$$Q(4,2) = 115,127 \text{ кН};$$

$$M(x_2) = +R_B \cdot (x - 2,1) - q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 = +135,5 \cdot (x - 2,1) - 4,8571 \cdot x^2/2;$$

$$M(2,1) = -10,71 \text{ кНм};$$

$$M(4,2) = 241,766 \text{ кНм};$$

На участке CD: ($4,2 \leq x_3 \leq 8,4$ м):

$$Q(x_3) = +R_B - q_{\text{тр}} \cdot x - P = +135,5 - 4,8571 \cdot x - 252;$$

$$Q(4,2) = -136,873 \text{ кН};$$

$$Q(8,4) = -157,273 \text{ кН};$$

$$M(x_3) = +R_B \cdot (x - 2,1) - q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 - P \cdot (x - 4,2) = +135,5 \cdot (x - 2,1) - 4,8571 \cdot x^2/2 - 252 \cdot (x - 4,2);$$

$$M(4,2) = 241,766 \text{ кНм};$$

$$M(8,4) = -375,94 \text{ кНм};$$

На участке DE: ($8,4 \leq x_4 \leq 14,7$ м):

$$Q(x_4) = + R_B + R_D - q_{\text{тр}} \cdot x - P = + 135,5 + 210,7 - 4,8571 \cdot x - 252;$$

$$Q(8,4) = 53,436 \text{ кН};$$

$$Q(14,7) = 22,837 \text{ кН};$$

$$M(x_4) = + R_B \cdot (x - 2,1) + R_D \cdot (x - 8,4) - q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 + M - P \cdot (x - 4,2) = + 135,5 \cdot (x - 2,1) + 210,7 \cdot (x - 8,4) - 4,8571 \cdot x^2/2 + 264,6 - 252 \cdot (x - 4,2);$$

$$M(8,4) = -111,34 \text{ кНм};$$

$$M(14,7) = 128,919 \text{ кНм};$$

На участке EF: ($14,7 \leq x_5 \leq 18,9$ м):

$$Q(x_5) = + R_B + R_D - q_{\text{тр}} \cdot x - q \cdot (x - 14,7) - P = + 135,5 + 210,7 - 4,8571 \cdot x - 10 \cdot (x - 14,7) - 252;$$

$$Q(14,7) = 22,837 \text{ кН};$$

$$Q(18,9) = -39,563 \text{ кН};$$

$$M(x_5) = + R_B \cdot (x - 2,1) + R_D \cdot (x - 8,4) - q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 - q \cdot (x - 14,7)^2/2 + M - P \cdot (x - 4,2) = + 135,5 \cdot (x - 2,1) + 210,7 \cdot (x - 8,4) - 4,8571 \cdot x^2/2 - 10 \cdot (x - 14,7)^2/2 + 264,6 - 252 \cdot (x - 4,2);$$

$$M(14,7) = 128,919 \text{ кНм};$$

$$M(18,9) = 93,793 \text{ кНм};$$

Поскольку поперечная сила на участке пересекает ноль при $x = 16,2$ м, в этой точке будет экстремум на эюре M

$$M(16,2) = 146 \text{ кНм};$$

На участке FG: ($18,9 \leq x_6 \leq 21$ м):

$$Q(x_6) = + R_B + R_D - q_{\text{тр}} \cdot x - Q_2 - P = + 135,5 + 210,7 - 4,8571 \cdot x - 42 - 252;$$

$$Q(18,9) = -39,563 \text{ кН};$$

$$Q(21) = -49,763 \text{ кН};$$

$$M(x_6) = + R_B \cdot (x - 2,1) + R_D \cdot (x - 8,4) - q_{\text{тр}} \cdot x^2/2 - Q_2 \cdot (x - 16,8) + M - P \cdot (x - 4,2) = + 135,5 \cdot (x - 2,1) + 210,7 \cdot (x - 8,4) - 4,8571 \cdot x^2/2 - 42 \cdot (x - 16,8) + 264,6 - 252 \cdot (x - 4,2)$$

$$M(18,9) = 93,793 \text{ кНм};$$

$$M(21) = 0 \text{ кНм};$$

Максимальный момент в балке составляет $M_{\max} = 376 \text{ кНм}$,

$$\text{Условие прочности при изгибе } \sigma = M_{\max} / W \leq [\sigma]$$

Определяем прогибы и углы поворота сечений с помощью метода начальных параметров

Участок АВ: ($0 \leq x_1 \leq 2,1 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24;$$

Участок ВС: ($2,1 \leq x_2 \leq 4,2 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 + R_B \cdot (x - 2,1)^2/2 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x + R_B \cdot (x - 2,1)^3/6 - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24;$$

Участок CD: ($4,2 \leq x_3 \leq 8,4 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 + R_B \cdot (x - 2,1)^2/2 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6 - P \cdot (x - 4,2)^2/2;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x + R_B \cdot (x - 2,1)^3/6 - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24 - P \cdot (x - 4,2)^3/6;$$

Участок DE: ($8,4 \leq x_4 \leq 14,7 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 + R_B \cdot (x - 2,1)^2/2 + R_D \cdot (x - 8,4)^2/2 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6 + M \cdot (x - 8,4) - P \cdot (x - 4,2)^2/2;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x + R_B \cdot (x - 2,1)^3/6 + R_D \cdot (x - 8,4)^3/6 - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24 + M \cdot (x - 8,4)^2/2 - P \cdot (x - 4,2)^3/6;$$

Участок EF: ($14,7 \leq x_5 \leq 18,9 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 + R_B \cdot (x - 2,1)^2/2 + R_D \cdot (x - 8,4)^2/2 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6 - q \cdot (x - 14,7)^3/6 + M \cdot (x - 8,4) - P \cdot (x - 4,2)^2/2;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x + R_B \cdot (x - 2,1)^3/6 + R_D \cdot (x - 8,4)^3/6 - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24 - q \cdot (x - 14,7)^4/24 + M \cdot (x - 8,4)^2/2 - P \cdot (x - 4,2)^3/6;$$

Участок FG: ($18,9 \leq x_6 \leq 21 \text{ м}$):

$$EJ \times \varphi(x) = EJ \times \varphi_0 + R_B \cdot (x - 2,1)^2/2 + R_D \cdot (x - 8,4)^2/2 - q_{\text{тр}} \cdot x^3/6 - q_2 \cdot (x - 14,7)^3/6 + q_2 \cdot (x - 18,9)^3/6 + M \cdot (x - 8,4) - P \cdot (x - 4,2)^2/2;$$

$$EJ \times y(x) = EJ \times y_0 + EJ \times \varphi_0 \times x + R_B \cdot (x - 2,1)^3/6 + R_D \cdot (x - 8,4)^3/6 - q_{\text{тр}} \cdot x^4/24 - q_2 \cdot (x - 14,7)^4/24 + q_2 \cdot (x - 18,9)^4/24 + M \cdot (x - 8,4)^2/2 - P \cdot (x - 4,2)^3/6;$$

Начальный прогиб и начальный угол поворота определяем по условиям закрепления балки:

$$- \text{начальный угол поворота } EJ \cdot \varphi_0 = -243,3 \text{ кНм}^2$$

$$- \text{начальный прогиб } EJ \cdot y_0 = 514,8 \text{ кНм}^3$$

Подставляя полученные значения в уравнение 5, находим положение оси $y(x)$ (рисунок 3):

Участок АВ:

$$EJ \times \varphi(0) = -243,3 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(0) = 514,8 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(0,7) = -243,6 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(0,7) = 344,5 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(1,4) = -245,5 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(1,4) = 173,5 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(2,1) = -250,8 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(2,1) = 0 \text{ кНм}^3;$$

Участок ВС:

$$EJ \times \varphi(2,1) = -250,8 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(2,1) = 0 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(2,8) = -227,8 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(2,8) = -171,1 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(3,5) = -145,2 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(3,5) = -305 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(4,2) = -4,418 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(4,2) = -360,7 \text{ кНм}^3;$$

Участок CD:

$$EJ \times \varphi(4,2) = -4,418 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(4,2) = -360,7 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(5,6) = 197,7 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(5,6) = -193,4 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(7) = 118,2 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(7) = 61,4 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(8,4) = -256,2 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(8,4) = 0 \text{ кНм}^3;$$

Участок DE:

$$EJ \times \varphi(8,4) = -256,2 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(8,4) = 0 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(10,5) = -379,7 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(10,5) = -705 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(12,6) = -312,5 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(12,6) = -1461 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(14,7) = -99,61 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(14,7) = -1915 \text{ кНм}^3;$$

Участок EF:

$$EJ \times \varphi(14,7) = -99,61 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(14,7) = -1915 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(16,1) = 96,46 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(16,1) = -1921 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(17,5) = 296,5 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(17,5) = -1644 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(18,9) = 459,8 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(18,9) = -1107 \text{ кНм}^3;$$

Участок FG:

$$EJ \times \varphi(18,9) = 459,8 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(18,9) = -1107 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(19,6) = 515,5 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(19,6) = -764,9 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(20,3) = 550,1 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(20,3) = -390,6 \text{ кНм}^3;$$

$$EJ \times \varphi(21) = 562 \text{ кНм}^2;$$

$$EJ \times y(21) = 0 \text{ кНм}^3;$$

5.5 Расчет опоры на внецентренное сжатие

5.5.1 Проверка опор на прочность

Характеристика сечения опоры (рисунок 4):

$$D = 0,219 \text{ м}, \delta = 0,010 \text{ м};$$

$$\text{Площадь поперечного сечения одного сечения опоры } A = 0,00657 \text{ м}^2;$$

$$\text{Момент инерции одного сечения опоры } I = 0,0360 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4;$$

$$\text{Момент сопротивления одного сечения опоры } W = 0,000328 \text{ м}^3;$$

Расчет характеристик составного сечения опоры:

$$W = \frac{I}{R} = \frac{0,00177}{0,250 + 0,219} = 0,00377 \text{ м}^3;$$

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_{c1} + A_2 \cdot y_{c2}}{A_1 + A_2} = 0,469 \text{ м}.$$

$$a_1 = a_2 = \frac{0,500 + 0,219}{2} = 0,3595 \text{ мм};$$

$$I_{xc} = \sum (I_{xi} + a_i^2 \cdot A_i) = (0,0360 \cdot 10^{-3} + 0,3595^2 \cdot 0,00657) \cdot 2 = 0,00177 \text{ м}^4;$$

Где A_1, A_2 – площади сечений труб, из которых состоит опора, U_{c1}, U_{c2} – координаты центров тяжести сечений труб, из которых состоит опора, остальные характеристики приведены на рисунке 3.

Нормальные напряжения в произвольной точке сечения вычисляются как алгебраическая сумма напряжений:

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{M}{W_y} = -\frac{N}{A} \pm \frac{N \cdot e}{W_y}; \quad (11)$$

$$\sigma = -\frac{210,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,00657} - \frac{210,7 \cdot 10^3 \cdot (0,25 + 0,219)}{0,00377} = -42,2 \cdot 10^6 \text{ Па} = -42,2 \text{ МПа}.$$

Запас прочности опор из стали 20, напряжения текучести $R_2 = 245 \text{ МПа}$:

$$1 - \frac{42,2}{245} = 0,83 = 83\%$$

5.5.2 Проверка фундамента на опрокидывание

Фундамент имеет размеры: $a = 1$ м; $b = 0,3$ м. Условие безотрывности фундамента имеет вид:

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{M}{W_y} = -\frac{N}{A} \pm \frac{N \cdot e}{W_y} \leq 0; \quad (12)$$

$$W_y = \frac{a \cdot b^3}{6};$$

$$-\frac{210,7 \cdot 10^3}{1 \cdot 0,3} \pm \frac{210,7 \cdot 10^3 \cdot 0,469}{1^2 \cdot \frac{0,3}{6}} \leq 0.$$

где a и b – размеры сторон фундамента.

Для выполнения условия безотрывности фундамента от грунта, требуется увеличить длину фундаментной плиты.

Условие выполняется при $a = 2,9$ м.

$$-\frac{210,7 \cdot 10^3}{2,9 \cdot 0,3} \pm \frac{210,7 \cdot 10^3 \cdot 0,469}{2,9^2 \cdot \frac{0,3}{6}} \leq 0.$$

При значении эксцентриситета $e = 0,469$ м длина фундамента должна быть не менее 2,9 м.

5.6 Расчет трубопровода на прочность при учете поперечных и продольных сил

5.6.1 Расчет на продольную устойчивость

По известной формуле определяем продольное температурное усилие на участках трубопровода между неподвижными опорами

$$F_{T^0} = E\alpha \Delta t A, \quad (13)$$

где E - параметр упругости (модуль Юнга);

α - коэффициент линейного расширения металла трубы;

Δt - расчетный температурный перепад;

A - площадь поперечного сечения трубы.

Условие устойчивости

$$\sigma_{T^0} = \frac{F_{T^0}}{A} \leq \varphi[\sigma]. \quad (14)$$

Коэффициент продольного изгиба φ принимается в зависимости от гибкости пролета

$$\lambda = \frac{\mu l}{i} \quad (15)$$

Коэффициент приведения длины μ для многопролетных балок определяется по [3].

Для многопролетных балок с шарнирными опорами:

- опасен I пролет;

- опасен I или II пролет, в котором больше прогиб f_0 от поперечной нагрузки и значительные M_0 ;

- опасен I, II и III пролет в зависимости от f_0 и M_0 ;

Коэффициент приведения длины $\mu = 1,0$ [3].

5.5.2 Расчет трубопровода на прочность при учете поперечных и продольных сил

Наиболее напряженные точки опасного пролета просчитываются на прочность по известным формулам продольно-поперечного изгиба

$$\sigma_{m1} = +\sigma_m - \frac{F_T}{A} \pm \frac{1}{W_Z} \left(M_0^{\max np.} + F_T K f_0 \frac{1}{1 - \frac{F_T K}{F_{KP}}} \right) \leq [\sigma], \quad (16)$$

где $A = 2\pi R_0 t$ - площадь поперечного сечения трубы;

$W_Z = \pi R_0^2 t$ - момент сопротивления трубчатого сечения;

$M_0^{\max_{np}}$ - наибольший момент в пролете от поперечной нагрузки;

$$K = 1,5.$$

Опасное опорное сечение (смежное с опасным пролетом) просчитывается по этой формуле, но в отличие от пролетного сечения здесь верхние точки трубы от изгиба будут получать положительные нормальные напряжения, а нижние – отрицательные напряжения, т.е.

$$\sigma_{m1} = +\sigma_m - \frac{F_T}{A} \pm \frac{1}{W_Z} \left(M_0^{\max_{ol}} + F_T K f_0 \frac{1}{1 - \frac{F_T K}{F_{KP}}} \right) \leq [\sigma]. \quad (17)$$

Опасным опорным сечением может быть сечение либо смежное с опасным пролетом, либо сечение с наибольшим опорным моментом. Для опорного сечения значение f_0 принимается как среднее между наибольшими прогибами от поперечных нагрузок в соседних пролетах.

Список рекомендованной литературы

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*
2. Юсупов Ф.Ш., Султанмагомедов С.М. Сопротивление материалов: Учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. – 238 с.
3. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник – в 3 т., т.3 / под ред. И.А. Биргера. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
4. ГОСТ 14911-82 Детали стальных трубопроводов. Опоры подвижные. Типы и основные размеры (с Изм. №1).
5. Дарков А.В. Сопротивление материалов: Учебник для ВУЗов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. - М.: Альянс, 2014. - 624 с.
6. Беляев Н.М. Сопротивление материалов: Учебник для ВУЗов / Н.М. Беляев. - М.: Альянс, 2014. - 608 с.
7. Степин, П.А. Сопротивление материалов: Учебник / П.А. Степин. - СПб.: Лань, 2014. - 320 с.
8. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1965.
9. Миролюбов И.Н. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов. - М.: Высшая школа, 1974.
10. Атаров Н.М. Сопротивление материалов с основами строительной механики: Учебник / Г.С. Варданян, Н.М. Атаров, А.А. Горшков . - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 505 с.
11. Ицкович Г.М. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. - М.: Высшая школа, 1963.
12. Саргаев П.М. Механика конструкций. Теоретическая механика. Сопротивление материалов: Учебное пособие / П.М. Саргаев. - СПб.: Лань П, 2016. - 608 с.
13. Кривошапко С.Н. Сопротивление материалов. практикум.: Учебное пособие для прикладного бакалавриата / С.Н. Кривошапко, В.А. Копнов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 353 с.
14. Коргин, А.В. Сопротивление материалов с примерами решения задач в системе Microsoft Excel: Учебное пособие / А.В. Коргин; Под ред. В.И. Андреев. - М.: ИНФРА-М, 2013. - 389 с.