

УДК
622.692.4.053

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Т.Е. СТЕНИНА, Е.В. ПОЗНЯК, Б.В. МИНАКОВ

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ

Методические указания к курсовому проекту
по дисциплине «Конструкционная прочность»
для магистров, обучающихся по образовательной программе
«Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры»
по направлению 15.04.03 Прикладная механика

УДК
622.692.4.053

Утверждено учебным управлением МЭИ
Подготовлено на кафедре робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин
Рецензент к.т.н., доцент Смирнов А.И.

СТЕНИНА Т.Е., ПОЗНЯК Е.В., Б.В. МИНАКОВ

Конструкционная прочность. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Конструкционная прочность» – М.: Издательство МЭИ, 2024. - 22 с.

Методические указания содержат задание для курсового проекта по дисциплине «Конструкционная прочность». Задание содержит постановку задачи, варианты исходных данных, указания по порядку выполнения расчета и снабжено необходимыми справочными материалами.

Методические указания предназначены для магистров института энергомашиностроения и механики (ЭнМИ), обучающихся по образовательной программе «Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры» по направлению 15.04.03 Прикладная механика.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

Оформление отчета по курсовому проекту

1. В отчете по курсовому проекту излагаются постановка задачи и использованные методы решения, приводится описание полученных численных результатов и их анализ. Все необходимые пояснительные рисунки, схемы, графики и т.п. должны содержаться в тексте отчета. Отчет включает:

- титульный лист (см. Приложение 4);
- содержание с постраничной разметкой (см. Приложение 5);
- основную текстовую часть;
- список использованной литературы.

2. Если в тексте отчета требуется ссылка на использованную литературу, то в этом месте указывается порядковый номер данного литературного источника в библиографическом списке; номер дается в квадратных скобках. Нумерация литературных источников определяется последовательностью их появления в тексте отчета. Приводятся фамилии и инициалы автора (авторов) книги, её название, издательство, год издания, количество страниц.

3. Формулы, на которые имеются ссылки в тексте отчета, снабжаются сквозной нумерацией.

4. Табличный и графический материал, включенный в текст отчета, должен иметь сквозную нумерацию (рис.1, табл.2 и т.п.). Все рисунки и таблицы обязательно упоминаются в тексте отчета.

5. Численные значения всех размерных величин должны сопровождаться указанием их размерностей.

6. Отчет оформляется в виде электронного документа в формате .doc, .pdf, .html с навигацией по содержанию (например, средствами MS WORD при формировании оглавления). Выполненный отчет загружается в ИС БАРС.

7. Отчет, оформленный с нарушением настоящих указаний, к защите не принимается.

8. При защите проекта студент должен:

- четко и лаконично изложить постановку задачи;
- обосновать применение использованных численных методов;
- оценить точность и достоверность полученных результатов;
- сформулировать выводы по работе.

ЗАДАНИЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Оценка напряженно-деформированного состояния подземного участка газопровода-отвода

1 Постановка задачи

Участок подземного газопровода-отвода (ГО) нагружен внутренним давлением и находится под действием неравномерного (в продольном направлении) температурного воздействия. Воздействия со стороны грунта (оползневые явления, сезонные изменения) приводят к изменению кривизны трубопровода. Известны результаты геодезической съемки заданного участка газопровода и минимальная толщина стенки трубы на этом участке.

Требуется оценить параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) участка и сделать выводы, является ли его состояние работоспособным.

2 Исходные данные

2.1 Геометрические размеры труб, материалы ГО и его свойства приведены в Приложении 1 по вариантам.

Модуль упругости стали $E_0 = 206000$ МПа, [1].

Коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, [1].

Коэффициент Пуассона $\mu_0 = 0,3$ [1].

2.2 Данные планово-высотных измерений приведены в Приложении 3 по вариантам.

2.3 Расчетные нагрузки и воздействия

Расчетное (разрешенное) давление $p = 5,4$ МПа.

Расчетный температурный перепад при эксплуатации $\Delta T = -20 \dots 25$ °С.

Рабочая среда – природный газ.

3 Порядок выполнения задания

3.1 По заданным исходным данным определить расчетную толщину стенки ГО в соответствии с СП [1]. Коэффициенты условий работы, коэффициенты надежности принять в соответствии с Приложением 2.

Сравнить полученную толщину с минимально измеренной.

Принять в дальнейший расчет в качестве расчетной толщины минимальную из двух толщин – минимально измеренной и номинальной.

3.2 Для принятой расчетной толщины определить допускаемые напряжения, привести результаты как показано в таблице 1 (в таблице 1 приведены произвольные значения в качестве примера).

Таблица 1 – Допускаемые напряжения (расчетная толщина стенки ___ мм)

Категория участка по прокладке	Коэффициент условий работы m	Допускаемые напряжения, МПа		
		кольцевое	растягивающее продольное	сжимающее продольное
II	0,825	288,1	288,1	-42,3

3.3 Определить минимально допускаемый радиус кривизны ρ_1 ГО от температурного перепада по критерию для допускаемых максимальных продольных растягивающих/сжимающих напряжений в соответствии с СП [1]. Результаты представить как показано в таблице 2 (в таблице 2 приведены произвольные значения в качестве примера).

Таблица 2 – Зависимость допускаемого радиуса кривизны ГО от температурного перепада ΔT

$\Delta T, ^\circ C$	Допускаемый радиус кривизны ρ , м	Примечание
-20	245*	*По критерию для допускаемых максимальных продольных растягивающих напряжений.
25	240**	** По критерию для допускаемых максимальных продольных сжимающих напряжений.

3.4 Рассчитать характеристики НДС при минимально допускаемом радиусе кривизны ρ_1 (кольцевое, максимальное и минимальное продольное напряжения, максимальную интенсивность напряжений, максимальную интенсивность деформаций). Привести результаты как показано в таблице 3 (в таблице 3 приведены произвольные значения в качестве примера).

Таблица 3 - Характеристика НДС при радиусе кривизны ρ^*

ρ_1 , м	ΔT , °C	Кольцевое напряжение, МПа	Максимальное продольное напряжение, МПа	Минимальное продольное напряжение, МПа	Максимальная интенсивность напряжений, МПа	Максимальная интенсивность деформаций, %
245	-20	149	204	- 31	182	0,095

3.5 Рассчитать допускаемые напряжения для предотвращения потери местной устойчивости в ГО.

3.6 Рассчитать минимально допускаемый радиус кривизны ρ_2 , при котором нарушается условие предотвращения местной потери устойчивости.

3.7 Проверить выполнение нормативных условий прочности ГО. Сделать заключение о возможности продолжения эксплуатации участка ГО в соответствии с критериями Приложения 3. Привести график распределения радиуса кривизны ГО на участке с указанием допускаемого нормативного радиуса и допускаемого радиуса по критерию устойчивости.

4 Основные положения и формулы

4.1 Потенциально опасным участком (далее ПОУ) ГО считается участок, на котором нарушаются условия предотвращения недопустимых пластических деформаций, установленные СП [1], вследствие изгибного деформирования трубопровода в процессе его эксплуатации.

Критерием ПОУ в расчете является условие

$$\rho < \rho_1 \quad (1)$$

где ρ – минимальный на участке фактический радиус кривизны трубопровода;

ρ_1 - минимально допускаемый, рассчитанный по СП [1], радиус кривизны трубопровода, соответствующий конструктивному (наружный диаметр, расчетная¹ толщина стенки, способ прокладки) и материальному исполнению (механические характеристики) трубопровода, нагрузкам и воздействиям (разрешенное избыточное давление и возможные максимальные температурные

¹ В качестве расчетной принимается фактическая минимальная толщина стенки трубы (либо номинальная).

перепады² ΔT в металле стенки трубопровода, а также установленным [1] коэффициентам безопасности.

4.2 Места (сечения) трубопровода, имеющие максимальную кривизну, определяются, согласно инструкции [2], путем аппроксимации данных плановых и высотных измерений полиномами 4-го порядка, имеющими вид:

$$\begin{aligned}u(z) &= a_1z^4 + b_1z^3 + c_1z^2 + d_1z + e_1, \\v(z) &= a_2z^4 + b_2z^3 + c_2z^2 + d_2z + e_2.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь u – деформированная форма трубопровода в плане, v – деформированная форма трубопровода в вертикальной плоскости.

В качестве оси Z принимается ось, проходящая через сечения трубопровода, расположенные в начале и в конце рассматриваемого участка ГО.

Учитывая, что данные плановых измерений задаются в ортогональной системе OXY , переход от координат x и y к координатам z и u , осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned}z &= (x - x_0)\cos\theta + (y - y_0)\sin\theta, \\u &= (x - x_0)\sin\theta + (y - y_0)\cos\theta, \\ \cos\theta &= (x_1 - x_0)/L, \quad \sin\theta = (y_1 - y_0)/L, \\ L &= ((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2)^{0,5},\end{aligned}\quad (3)$$

где x_0, y_0 – координаты начала рассматриваемого участка,

x_1, y_1 – координаты конца рассматриваемого участка.

Аппроксимации (2) считаются достаточно достоверными, если показатель достоверности не менее 0,995.

4.3 Кривизны трубопровода в сечении z трубопровода в плане и в вертикальной плоскости определяются, используя аппроксимации (2):

$$k_u(z) \approx u''(z), k_v(z) \approx v''(z) \quad (4)$$

где $u''(z), v''(z)$, – вторые производные аппроксимаций (2).

² Разница между максимально или минимально возможной температурой стенки трубы в процессе эксплуатации и наименьшей или наибольшей температурой, при которой фиксируется расчетная схема трубопровода (свариваются захлесты, привариваются компенсаторы, производится засыпка трубопровода и т.п., т.е. когда фиксируется статически неопределимая система на рассматриваемом участке ГО при строительстве или последнем ремонте с вырезкой – врезкой катушки), [1].

Нетрудно показать, что координата z^* сечения трубы с экстремальной (минимальной или максимальной) кривизной в плане или в вертикальной плоскости и значение максимальной кривизны k^* определяются по формулам

$$z^* = -b / (4a); k^* = -3b^2 / (4a) + 2c \quad (5)$$

Кривизна трубопровода определяется по формуле

$$k = \sqrt{(k_u^2 + k_v^2)}. \quad (6)$$

Радиус кривизны

$$\rho = 1 / k. \quad (7)$$

4.4 Проверка выполнения условия прочности трубопроводного участка выполняется из условия

$$|\sigma_{np}^H| \leq \psi_1 \frac{m}{0,9k_H} R_2^H, \quad (8)$$

$$|\sigma_{кц}^H| \leq \frac{m}{0,9k_H} R_2^H, \quad (9)$$

где σ_{np}^H - максимальные продольные напряжения в трубопроводе от расчетных нагрузок и воздействий, МПа;

m - коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность [1];

ψ_1 - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{np}^H \geq 0$) принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{np}^H \leq 0$) - определяемый по формуле

$$\psi_1 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0,9k_H} R_2^H} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0,9k_H} R_2^H}, \quad (10)$$

где R_2^H - нормативное значение сопротивления растяжению (сжатию) металла труб, МПа, равное нормативному значению предела текучести (см. п. 2.1).

$\sigma_{кц}^H$ - кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления, МПа, определяемые по формуле:

$$\sigma_{кц}^H = \frac{pD_{вн}}{2\delta_n} \quad (11)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;

δ_n – минимальная фактическая/номинальная толщина трубы;

p – расчетное давление.

4.5 Максимальные продольные напряжения на рассматриваемом участке трубопровода оцениваются по формуле:

$$\sigma_{np}^H = \mu\sigma_{кц}^H - \alpha E\Delta T \pm ED_n / \rho_{min} / 2 \quad (12)$$

где ρ_{min} – минимальный радиус кривизны трубопровода на участке,

$$E = \frac{\sigma_i / \varepsilon_i}{1 + \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{1/2 - \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}}{1 + \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}} \quad (14)$$

σ_i - интенсивность напряжений, определяемая через главные напряжения; для данного частного случая определяется по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{кц}^H)^2 - \sigma_{np}^H \sigma_{кц}^H + (\sigma_{np}^H)^2} \quad (15)$$

ε_i - интенсивность деформаций, определяемая по интенсивности напряжений в соответствии с диаграммой деформирования (уравнение выбрать в соответствии с номером варианта, см. Приложение 1), рассчитываемой по нормированной диаграмме растяжения $\sigma - \varepsilon$ по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma, \\ \varepsilon_i &= \varepsilon - \frac{1 - 2\mu_0}{3E_0} \sigma \end{aligned} \quad (16)$$

4.6 В качестве предельного состояния принимается потеря местной устойчивости трубопровода.

Местная устойчивость стенки трубопровода обеспечивается при выполнении условия

$$\rho \geq \rho_2, \quad (17)$$

где ρ_2 - минимально допускаемый радиус кривизны, при котором нарушается условие

$$\begin{aligned} \sigma_{np}^- &\leq [\sigma_{np}^-] \\ [\sigma_{np}^-] &= \sigma_{np} m / n_y \end{aligned} \quad (18)$$

σ_{np}^- - максимальное условное (упругое) сжимающее продольное напряжение на ПОУ, определяемое по формуле (12) при $E = E_0$ и $\mu = \mu_0$;

$[\sigma_{np}^-]$ - допускаемое максимальное условное (упругое) сжимающее продольное напряжение на ПОУ;

n_y - коэффициент запаса устойчивости (принимается 1,5).

Значение наибольшего сжимающего условного (упругого) напряжения, при котором происходит потеря местной устойчивости, определяется по приближенной формуле, [2]:

$$\sigma_{np} = 0,45 E_0 \delta_n / D_n. \quad (19)$$

где D_n - наружный диаметр трубопровода.

Список литературы

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция. СНиП 2.05.06-85.

2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. - М.: Наука, 1967. - 984 с.

3. Инструкция по определению фактического напряженно-деформированного состояния по данным геодезической съемки участков

газопроводов, расположенных на территориях с опасными геодинамическими процессами, и оценке их работоспособности, М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2003.

4. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.

Приложение 1. Геометрические размеры труб, материалы ГО и его свойства.
Уравнения, описывающие нелинейную зависимость $\sigma - \varepsilon$

Вар №	Наружный диаметр трубы ГО D_n , мм	Номинальная толщина стенки трубы ГО, мм	Минимальная измеренная толщина стенки трубы ГО, мм	Материал трубы, сталь	Предел текучести, R_{2}^H , МПа	Предел прочности, R_{1}^H , МПа	Категория участка	Уравнение $\sigma - \varepsilon$
1	219	8	7,7	20	245	412	II	Рамберга-Осгуда
2	159	5	5,1	20	245	412	II	Рамберга-Осгуда
3	325	6	5,8	20	245	412	III	Холломона
4	325	6	5,6	20	245	412	I	Рамберга-Осгуда
5	1220	12,6	12,1	17Г1С-У	363	543	I	Холломона
6	1220	12,0	12,0	17Г1С-У	363	543	III	Холломона
7	1220	12,0	12,2	17Г1С-У	363	543	III	Рамберга-Осгуда
8	325	6	5,7	20	245	412	III	Рамберга-Осгуда
9	219	6	5,7	20	245	412	III	Холломона
10	159	5	5,0	20	245	412	II	Рамберга-Осгуда

Приложение 2. Коэффициенты для расчета толщины стенки трубопровода

1 Значения коэффициента условий работы m

Категория трубопровода	Коэффициент условий работы трубопровода при расчете его на прочность, устойчивость и деформативность m
В	0,660
I	0,825
II	0,825
III	0,990
IV	0,990

2 Значение коэффициента надежности по ответственности трубопровода k_n

Номинальный диаметр трубопровода DN	Коэффициент надежности по ответственности трубопровода k_n
500 и менее	1,100
600-1000	1,100
1200	1,155

3 Значение коэффициентов надежности по материалу k_1 и k_2 принять равными

$k_1 = 1,55; k_2 = 1,10$.

4 Значение коэффициента надежности по нагрузке n принять равным $n = 1$.

Приложение 3. Данные плановых и высотных отметок

Вариант 1

№	X, м	Y, м	Н оси, м
1	94,975	50,169	138,22
2	94,554	53,06	138,1
3	94,069	56,458	137,96
4	93,68	59,143	137,85
5	93,234	62,073	137,73
6	92,615	66,54	137,55
7	92,225	69,458	137,44
8	91,845	72,496	137,34
9	91,734	73,196	137,31
10	91,254	76,594	137,22
11	90,846	79,446	137,19
12	90,348	82,871	137,17
13	90,059	86,668	137,17
14	90,089	91,553	137,22
15	89,994	95,883	137,38
16	89,959	96,848	137,44
17	89,926	97,891	137,52
18	89,896	98,955	137,62
19	89,853	100,281	137,74
20	89,721	103,004	137,98
21	89,418	106,174	138,27
22	88,999	110,171	138,65
23	88,746	113,432	138,94
24	88,446	116,598	139,22
25	88,147	119,713	139,48
26	87,843	122,879	139,66
27	87,484	126,128	139,77
28	87,115	129,247	139,83
29	86,736	132,889	139,9
30	86,423	135,657	139,95
31	86,078	138,737	139,95
32	85,73	141,997	139,94
33	85,406	144,649	139,92

Вариант 2

№	X, м	Y, м	Н оси, м
1	96,854	98,242	4,36
2	97,163	97,992	4,38
3	97,629	97,603	4,41
4	98,078	97,234	4,43
5	98,482	96,889	4,46
6	100,43	95,31	4,57
7	101,83	94,21	4,63
8	103,34	92,88	4,69
9	104,58	91,95	4,74
10	106,32	90,46	4,8
11	107,85	89,3	4,85
12	108,95	88,41	4,87
13	109,92	87,68	4,88
14	115,22	83,36	4,93
15	117,11	81,7	4,92
16	119,16	79,98	4,92
17	121,27	78,01	4,92
18	123,49	76,25	4,94
19	125,3	74,87	4,98
20	126,67	73,66	5,01
21	129,12	71,46	5
22	129,61	71,05	5
23	129,91	70,77	4,99
24	130,41	70,46	4,99
25	130,8	70,09	4,98
26	131,94	69,08	4,98
27	133,63	67,61	4,97
28	135,69	65,72	4,98
29	137,2	64,39	4,99
30	138,57	63,16	5

Вариант 3

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	102,85	113,47	278,97
2	102,65	110,82	278,96
3	102,44	108,14	278,96
4	102,29	106,09	278,95
5	101,96	102,67	278,93
6	101,51	97,92	278,9
7	101,49	97,61	278,9
8	101,47	97,24	278,9
9	101,45	96,94	278,9
10	101,44	96,8	278,9
11	101,43	96,67	278,9
12	101,43	96,56	278,9
13	101,42	96,42	278,9
14	101,41	96,26	278,91
15	101,4	96,07	278,91
16	101,38	95,83	278,91
17	101,37	95,58	278,92
18	101,35	95,33	278,92
19	101,33	95,02	278,93
20	101,01	90,77	278,99
21	100,74	87,14	279,06
22	100,3	81,34	279,17
23	99,81	77,75	279,23
24	99,37	74,22	279,29
25	98,89	71,09	279,35

Вариант 4

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	131,78	152,24	388,97
2	129,02	147,75	388,08
3	126,5	143,66	387,26
4	123,75	139,71	386,55
5	121,21	136,07	385,99
6	118,24	132,29	385,5
7	115,5	128,82	385,2
8	112,83	125,66	385,04
9	110,54	123,03	384,92
10	107,73	119,92	384,86
11	105,13	117,21	384,84
12	100,64	112,36	385,04
13	98,31	110,15	385,27
14	97,4	109,2	385,37
15	96,49	108,25	385,47
16	94,71	106,33	385,86
17	93,21	104,85	385,98
18	92,19	103,78	386,01
19	91,95	103,54	386,16
20	90,72	102,32	386,28
21	89,65	101,26	386,38
22	88,87	100,48	386,49
23	87,87	99,48	386,61
24	86,92	98,54	386,72
25	85,93	97,57	386,84
26	84,92	96,56	386,88
27	84,58	96,2	386,93
28	84,18	95,82	387,14
29	82,45	94,06	387,32
30	80,88	92,56	387,37
31	80,43	92,14	387,42
32	79,98	91,72	387,42
33	78,05	89,89	387,71
34	75,93	87,87	388,13
35	73,49	85,55	388,73
36	70,54	82,75	389,54
37	67,42	80,24	390,33
38	64,22	77,49	391,17
39	60,92	74,92	392,1

Вариант 5

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	80,71	125,07	88,37
2	81,52	124,35	88,36
3	83,13	122,91	88,35
4	84,83	121,4	88,34
5	85,97	120,38	88,34
6	88,12	118,46	88,32
7	88,91	117,75	88,32
8	97,61	110	88,30
9	98,19	109,48	88,30
10	100,48	107,44	88,29
11	100,72	107,23	88,29
12	101,23	106,77	88,29
13	103,18	105,03	88,29
14	105,87	102,64	88,28
15	106,46	102,11	88,28
16	109,05	99,8	88,27
17	109,21	99,66	88,27
18	112,21	96,99	88,27
19	112,32	96,89	88,27
20	114,9	94,59	88,26
21	115,99	93,61	88,26
22	118,14	91,7	88,25
23	119,68	90,33	88,23
24	121,1	89,06	88,22
25	123,37	87,03	88,20
26	124,47	86,06	88,19
27	127,13	83,69	88,16
28	127,48	83,37	88,16

Вариант 6

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	89,99	108,45	97,61
2	91,15	108,17	97,65
3	94,17	107,49	97,87
4	97,11	106,62	98,11
5	99,56	105,92	98,36
6	103,29	104,87	98,82
7	106,23	104,02	99,26
8	109,46	103,04	99,88
9	112,39	102,24	100,45
10	114,84	101,52	100,93
11	117,45	100,75	101,39
12	120,83	99,8	101,96
13	124,13	98,84	102,53
14	127,38	97,85	103,06
15	130,53	96,91	103,58
16	133,62	96,05	104,07
17	136,27	95,26	104,42
18	138,76	94,58	104,72
19	141,83	93,72	105,04
20	145,32	92,73	105,38

Вариант 7

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	128,85	57,32	3,95
2	130,6	53,69	4,06
3	130,91	53,07	4,08
4	132,4	50,09	4,19
5	134,22	46,48	4,35
6	135,98	42,91	4,55
7	137,81	39,3	4,76
8	139,6	35,69	4,99
9	141,06	32,7	5,18
10	141,38	32,09	5,21
11	143,48	27,82	5,49
12	144,52	25,62	5,64
13	145,67	23,26	5,80
14	146,97	20,5	6,00
15	148,28	17,84	6,29
16	150,04	14,71	6,80
17	151,37	12,05	7,30
18	152,81	9,3	7,82
19	154,16	6,43	8,33
20	155,63	3,68	8,82
21	157,13	0,9	9,28
22	158,52	-2,1	9,77
23	159,78	-4,6	10,19
24	160,89	-6,92	10,58
25	162,33	-9,58	11,03

Вариант 8

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	118,24	132,29	385,5
2	115,5	128,82	385,2
3	112,83	125,66	385,04
4	110,54	123,03	384,92
5	107,73	119,92	384,86
6	105,13	117,21	384,84
7	100,64	112,36	385,04
8	98,31	110,15	385,27
9	97,4	109,2	385,37
10	96,49	108,25	385,47
11	94,71	106,33	385,86
12	93,21	104,85	385,98
13	92,19	103,78	386,01
14	91,95	103,54	386,16
15	90,72	102,32	386,28
16	89,65	101,26	386,38
17	88,87	100,48	386,49
18	87,87	99,48	386,61
19	86,92	98,54	386,72
20	85,93	97,57	386,84
21	84,92	96,56	386,88
22	84,58	96,2	386,93
23	84,18	95,82	387,14
24	82,45	94,06	387,32
25	80,88	92,56	387,37
26	80,43	92,14	387,42
27	79,98	91,72	387,42
28	78,05	89,89	387,71
29	75,93	87,87	388,13
30	73,49	85,55	388,73
31	70,54	82,75	389,54
32	67,42	80,24	390,33
33	64,22	77,49	391,17
34	60,92	74,92	392,1
35	57,51	72,33	393,04
36	53,2	69,43	393,96
37	49,67	67,2	394,52
38	45,59	64,68	394,98
39	41,3	62,6	395,41

Вариант 9

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	137	139	376,33
2	134,81	137,14	376,26
3	132,68	135,45	376,17
4	130,36	133,56	375,89
5	127,86	131,67	375,46
6	125,18	129,61	374,92
7	122,98	127,86	374,41
8	120,8	126,09	373,81
9	118,54	124,38	373,21
10	115,93	122,39	372,51
11	113,79	120,77	371,94
12	111,79	119,25	371,4
13	109,87	117,79	370,94
14	106,75	115,43	370,41
15	104,83	113,97	370,1
16	103,06	112,63	369,87
17	101,24	111,24	369,63
18	99,36	109,82	369,39
19	98,3	109,01	369,34
20	97,05	108,28	369,31
21	95,32	107,2	369,25
22	93,71	106,14	369,2
23	92,75	105,57	369,17
24	86,18	101,45	368,97
25	84,83	100,56	368,93
26	83,34	99,63	368,88
27	81,49	98,46	368,82
28	80,01	97,55	368,78
29	78,15	96,25	368,72
30	75,1	94,38	368,66
31	72,67	92,8	368,68
32	69,56	90,72	368,75
33	66,53	88,85	369,01
34	64,03	87,24	369,36
35	61,73	85,78	369,68
36	59,12	84,24	369,98

Вариант 10

№	X, м	У, м	Н оси, м
1	63,73	270,43	362,38
2	65,53	265,91	362,42
3	67,06	261,73	362,46
4	68,14	258,46	362,5
5	68,56	257,48	362,51
6	70,31	252,31	362,6
7	72,02	247,3	362,72
8	73,48	242,99	362,82
9	75,18	238,03	362,94
10	77,05	232,49	363,08
11	78,47	228,34	363,19
12	79,76	224,53	363,28
13	81,21	220,27	363,39
14	82,05	217,82	363,45
15	82,78	215,7	363,51
16	83,19	214,5	363,54
17	83,88	212,44	363,59
18	85,73	207,09	363,72
19	87,18	202,49	363,84
20	88,81	197,55	363,96
21	90,99	190,92	364,13
22	92,45	186,42	364,24
23	93,34	183,24	364,32
24	94,19	180,57	364,39
25	95,04	177,91	364,48
26	96,39	173,53	364,67
27	97,62	169,42	364,93
28	98,9	164,98	365,25
29	99,84	161,43	365,46
30	101,11	156,65	365,65

Приложение 4
Критерии оценки работоспособности участка ГО

$\rho \geq \rho_1$	$\rho_1 > \rho \geq \rho_2$	$\rho < \rho_2$
Участок находится в работоспособном состоянии.	ПОУ. Требуется мониторинг участка. Плановый ремонт.	Аварийный участок. Необходимо выполнить ремонт, направленный на снижение уровня НДС трубопровода (уменьшение кривизны).

**ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

ОТЧЕТ
ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ
по дисциплине
«КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ»

Выполнил _____
Группа _____
Преподаватель _____

МОСКВА 2024

**ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

СОДЕРЖАНИЕ

Задача 1 Анализ НДС трубопровода

 1.1 Постановка задачи (условие, исходные данные)

 1.2 Решение (привести ход решения, расчетные формулы с пояснениями,
графики)

 1.3 Анализ результатов, выводы

Список литературы

Учебное издание

Стенина Татьяна Евгеньевна
Позняк Елена Викторовна
Минаков Борис Владимирович

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ

Методические указания к курсовому проектированию
по дисциплине «Конструкционная прочность»
для магистров, обучающихся по образовательной программе
«Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры»
по направлению 15.04.03 Прикладная механика