МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

ВНИИСТ

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО РАСЧЕТУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПО ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ

Р 417—81

МОСКВА 1982

gost.e-ecolog.ru

УДК 624.011:539.4

Настоящие Рекомендации необходимо использовать при расчете долговечности и конструктивной прочности магистральных трубопроводов под действием эксплуатационного нагружения. В них получила дальнейшее развитие теория предельных процессов нагружения магистральных трубопроводов, сформулированная в "Основных положениях расчета магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов простого нагружения" [I].

Приведена методика определения толщины стенок элементов трубопроводов по заданному режиму эксплуатационного нагружения и полного времени эксплуатации, а также изложен метод оценки конструктивной прочности магистральных трубопроводов.

Рекомендации разработаны лабораторией методов расчета трубопроводов и соединительных деталей (ВНИИСТ) под руководством канд.техн. наук И.Д.Красулина и предназначены для научно-исследовательских и проектных организаций по строительству.

Рекомендации составлены канд.физ.-мат.наук Б.И. Завойчинским.

Замечания и предложения направлять по адресу: Москва, I05058, Окружной проезд, I9, ВНИИСТ.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов, ВНИИСТ, I982

ВНИИСТ	Рекомендации по расчету магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов нагружения	Р 417-81 Разработаны впервые

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие Рекомендации разработаны в развитие разделов СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования" по расчету трубопроводов на прочность и могут быть использованы при расчете долговечности и конструктивной прочности элементов магистральных трубопроводов под действием температурного и механического нагружений.

Излагаемая методика базируется на теории предельных процессов нагружения. Для определенного вида простого нагружения получено конечное соотношение, являющееся точным решением теории.

Выводы теории о прочности при одноосном асимметричном циклическом нагружении, двухчастотном нагружении и комбинированном циклическом нагружении изгибом и кручением подтверждены результатами экспериментов [2], [3]. Так как в элементах трубопроводов реализуется плоское напряженное состояние, такое подтверждение является достаточным.

На основе разработанной теории сформулирована методика определения основных размеров элементов трубопроводов по заданному режиму их эксплуатационного нагружения и значению их долговечности. Более точный механический смысл, приданный коэффициентам запаса прочности, позволяет провести дальнейшую дифференциацию прочностных характеристик элементов трубопровода в зависимости от их категории и характеристик трубных сталей.

I.2. Коэффициент безопасности κ_1 учитывает уменьшение нормативного сопротивления стали, т.е. временного сопротивления стали для образцов из листа соответствующей толщины с обеспеченностью 0,977, обусловленное технологическими и конструктивными особенностями трубопроводов.

Внесены лабораторией методов расчета магистральных трубопроводов и соединительных деталей ВНИИСТа	Утверждены ВНИИСТом 15 декабря 1980 г.	Срок введения 1 декабря 1982 г.

Доверительный уровень коэффициента k_1 рационально принять равным 0,998 для участков III и IУ категорий, 0,9999 – I и II категорий и 0,99999 – категории В. Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что значение коэффициента K_I лежит в интервале I–I,2.

Коэффициент условий работы k зависит от характера механического и температурного нагружения элементов и агрессивности внешней среды. Его значение может быть определено по теории предельных процессов нагружения и спектру предельных режимов нагружения отдельных участков трубопроводов. Доверительный уровень коэффициента k рационально принять таким же, как и уровень коэффициента k_1.

Коэффициент α равен отношению главных напряжений и характеризует вид напряженного состояния элемента трубопровода. Его величина зависит от геометрии элемента и места его расположения в трубопроводе.

Приближенно доверительный уровень этого коэффициента такой же, как и коэффициента k_1.

Коэффициент β_1 равен отношению значений временных сопротивлений стали при одноосном нагружении и сдвиге, соответствующих вышеуказанным доверительным уровням.

Коэффициент β_2 равен отношению значений временных сопротивлений стали при одноосном и двухосном нагружениях, соответствующих этим доверительным уровням.

Итак, эти коэффициенты могут быть определены по экспериментальным данным с заданной обеспеченностью. Этих значений достаточно, чтобы найти толщину стенок основных элементов трубопровода, обеспечивающую заданную долговечность конструкции, и провести оценку конструктивной прочности трубопровода. Проведенный анализ, основанный на известных экспериментальных данных, показывает, что имеются определенные резервы экономии металла труб и соединительных деталей (при условии обеспечения существующего уровня надежности и долговечности трубопроводов).

Расчеты также показывают [I], что толщина стенок труб магистральных трубопроводов практически не зависит от температуры замыкания участков при их строительстве.

I.3. Настоящие Рекомендации содержат метод оценки конструктивной прочности магистральных трубопроводов под действи-

ем технологического и эксплуатационного нагружения. Этот метод базируется на теории предельных процессов нагружения и исследованиях спектра напряжений в наиболее напряженных зонах элементов.

Проверочный расчет на прочность выбранной конструкции по вышеуказанному методу должен обеспечить заданный уровень проектной надежности трубопровода.

I.4. Рассматривается плоское напряженное состояние элемента, компоненты которого пропорционально изменяются в процессе эксплуатации, т.е.

$$\sigma_1^* = \sigma_1 f(t) \qquad \text{и} \qquad \sigma_2^* = \sigma_1 \alpha \cdot f(t), \tag{I}$$

где $\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$;

σ_1 и σ_2 – максимальные значения главных напряжений.

Максимальные значения главных напряжений определяются по формулам

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2) + \frac{1}{2}\sqrt{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + 4\sigma_{12}^2}\,; \tag{2}$$
$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2) - \frac{1}{2}\sqrt{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + 4\sigma_{12}^2}\,,$$

где $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$ – максимальные значения кольцевых и осевых нормальных напряжений соответственно;

σ_{12} – максимальные значения касательных напряжений.

Простое нагружение (I) описывается одной функцией ограниченной вариации $f(t)$.

Амплитуды p_0, p_k и частоты ω_k, определяющие функцию $f(t)$, находят с помощью статистического и гармонического анализов значений внутреннего давления в течение одного года эксплуатации, представленного в таком виде

$$f(t) = \frac{p(t)}{p} = p_0 + \sum_{k=1}^{K} p_k \sin \omega_k t\,, \tag{3}$$

где $p_0 + \sum_{k=1}^{K} p_k = 1$.

Напряженное состояние $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, σ_{12} является истинным напряженным состоянием элемента, найденным методами теории упругости или пластичности, или экспериментальными методами исследования деформированного состояния элементов.

Напряженное состояние элемента может быть задано компонентами напряжений $\hat{\sigma}_1$, $\hat{\sigma}_2$, $\hat{\sigma}_{12}$, определенными по компонентам усилия и момента в его сечении, и коэффициентами K_σ и K_t, учитывающими превышение в отдельных точках элемента истинного напряженного состояния $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, σ_{12} над состоянием $\hat{\sigma}_1$, $\hat{\sigma}_2$, $\hat{\sigma}_{12}$ для различных стадий деформирования.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОСТОГО НАГРУЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.I. При простом нагружении (I)-(3) компоненты главных напряжений σ_i ($i = I, 2$) должны удовлетворять следующему неравенству:

$$\sigma_1 F(\alpha) < R_1 K , \tag{4}$$

где

$$F(\alpha)=\begin{cases} 2\beta_1|\alpha|\left\{\dfrac{1-\beta_1^2}{1+\alpha^2-2\alpha(1-2\beta_1^2)}\right\}^{\frac{1}{2}} & -1\le\alpha\le\dfrac{1}{1-2\beta_1^2} \\ 1 & \text{при } \dfrac{1}{1-2\beta_1^2}\le\alpha\le 0 , \\ 2-\beta_2+(1+\alpha)(\beta_2-1) & 0\le\alpha\le 1 , \end{cases} \tag{5}$$

$$\beta_1=\frac{\sigma_\ell}{\tau_\ell} ; \quad \beta_2=\frac{\sigma_\ell^*}{\sigma_\ell} ;$$

Расчетное сопротивление трубной стали при статическом нагружении R_I определяют согласно п.3.2.

Коэффициент условий работы K зависит от характера механического и температурного нагружения элементов и агрессивности внешней среды и находится по следующему соотношению:

$$K = p_0 R^0(t) + \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{K} p_k R^{(1)}(K_N \omega_k^* N), \text{ где } \omega_k^* = \frac{\omega_k}{\omega_1}, \omega_1 t = 2\pi N. \quad (6)$$

Здесь функцию длительной прочности R^0 определяют по следующей зависимости:

$$R^0(t) = \begin{cases} 1 & 0 \le t \le t_1, \\ 1 + \dfrac{(1-\rho^*)(\lg t - \lg t_1)}{2(\lg t_1 - \lg t_0)} & \text{при } t_1 \le t \le t_0, \\ \dfrac{1+\rho^*}{2}. & t_0 < t \end{cases} \quad (7)$$

Функцию циклической прочности $R^{(1)}$ вычисляют по следующим формулам:

$$R^{(1)}(y) = (1-\rho^*)\,\varphi_2(y) + \varphi_3(y), \quad (8)$$

где

$$\varphi_2(y) = \begin{cases} 1 & 0 \le y \le N_2, \\ K_c - (K_c - 1)\dfrac{\lg \frac{y}{N_0}}{\lg \frac{N_2}{N_0}} & \text{при } N_2 \le y \le N_0, \\ K_c & N_0 < y; \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi_3(y) = \begin{cases} \rho^* & 0 \le y \le N_3, \\ \rho^* \dfrac{\lg \frac{y}{N_0}}{\lg \frac{N_3}{N_0}} - \rho^{**} \dfrac{\lg \frac{y}{N_3}}{\lg \frac{N_3}{N_0}} & \text{при } N_3 \le y \le N_0 \\ \rho^{**} & N_0 < y; \end{cases} \quad (10)$$

$$\rho^* = \frac{\sigma_r}{\sigma_b}, \quad \rho^{**} = \frac{\sigma}{\sigma_b}$$

2.2. Если напряженное состояние элемента задано значениями компонент напряжений $\hat{\sigma}_1$, $\hat{\sigma}_2$, $\hat{\sigma}_{12}$ и величинами K_σ и K_t, то теорию прочности записывают в следующем виде:

$$(\hat{\sigma}_1+\hat{\sigma}_2+\sqrt{(\hat{\sigma}_1-\hat{\sigma}_2)^2+4\hat{\sigma}_{12}^2})F(\hat{\mathcal{L}})<2R_1\hat{K}\ , \qquad (11)$$

где

$$\hat{\mathcal{L}}=\frac{\hat{\sigma}_1+\hat{\sigma}_2-\sqrt{(\hat{\sigma}_1-\hat{\sigma}_2)^2+4\hat{\sigma}_{12}^2}}{\hat{\sigma}_1+\hat{\sigma}_2+\sqrt{(\hat{\sigma}_1-\hat{\sigma}_2)^2+4\hat{\sigma}_{12}^2}}\ . \qquad (12)$$

Коэффициент $\hat{K}$ определяется по следующему соотношению:

$$\hat{K}=\rho_0\hat{R}^0(t)+\frac{1}{n}\sum_{K=1}^{K}\rho_K\hat{R}^{(1)}(K_N\omega_K^*N)\ . \qquad (13)$$

Функция длительной прочности $\hat{R}^0$ зависимости (13) находится по следующему соотношению:

$$\hat{R}^0(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{K_\sigma} & 0\le t\le t_1\\ \dfrac{1}{K_\sigma}+\dfrac{\left(\dfrac{1}{K_\sigma}-\dfrac{\rho^*+1}{2K_t}\right)\ln\dfrac{t}{t_1}}{\ln\dfrac{t_1}{t_0}} & \text{при } t_1\le t\le t_0\\ \dfrac{1+\rho^*}{2K_t}\ . & t_0<t\end{cases} \qquad (14)$$

Для условий умеренной коррозии металла элемента соотношение (14) можно преобразовать так:

$$\hat{R}^0(t)=\begin{cases}\dfrac{1+\rho^*}{2K_\sigma} & 0\le t\le t_1\\ \dfrac{1+\rho^*}{2K_\sigma}\left(1+\dfrac{\ln\dfrac{t}{t_1}}{\ln\dfrac{t_1}{t_0}}\right) & \text{при } t_1\le t\le t_0\\ 0 & t_0<t\ .\end{cases} \qquad (15)$$

Функцию циклической прочности $\hat{R}^{(1)}$ зависимости (I3) находят по следующим зависимостям:

$$\hat{R}^{(1)}(y)=(1-\beta^{*})\,\varphi_1(y)\,\varphi_2(y)+\varphi_3(y), \qquad (I6)$$

где

$$\varphi_1(y)=\begin{cases}\dfrac{1}{K_б} & 0\le y\le N_1\\ \varphi_1^{*}(y) & \text{при } N_1\le y\le N_0\\ \dfrac{1}{K_t} & N_0\le y;\end{cases} \qquad (I7)$$

Здесь

$$\varphi_1^{*}(y)=\frac{1}{K_t}-\left(\frac{1}{K_b}-\frac{1}{K_б}\right)\frac{\ell g\frac{y}{N_0}}{\ell g\frac{N_1}{N_0}}\,. \qquad (I8)$$

Функцию φ_2 описывают зависимостью (9), а функцию φ_3 – зависимостью (I0).

2.3. Если в соотношения (I3)-(I8) подставить $K_b=K_б=1$, то они переходят в соотношения (6)-(8). При этом соотношение (II) переходит в соотношение (4), если вместо значений номинальных напряжений в них подставлять значения истинных напряжений. Подходы к оценке прочности по п.2.I и п.2.2 эквивалентны.

Соотношения (4)-(I0) или (4), (5), (II)-(I8) позволяют определить долговечность элементов трубопроводов при заданной их геометрии или размеры элементов при заданной долговечности под действием механического и теплового нагружений в условиях монтажа и эксплуатации.

3. РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ТРУБ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

3.1. При проведении расчетов по формулам (7)-(10), (14)-(18) рекомендуют следующие значения базовых чисел циклов: $N_0 = 2 \cdot 10^6$, $N_1 = 2 \cdot 10$, $N_2 = 2 \cdot 10^4$, $N_3 = 2 \cdot 10^2$ циклов и базовых времен: $t_1 = 10^3$ ч и $t_0 = 10^6$ ч. Коэффициент a равен 400 кгс/см^2 для элемента с поверхностью после прокатки или штамповки. Для элемента, поверхность которого находится в условиях коррозии, следует выбирать $a = 0$, $N_1 = N_3 = 1$.

Коэффициент K_c равен 0,35 для сварных соединений (поперечное или продольное стыковое соединение) и равен 1 для элементов без сварного шва. Коэффициент запаса по долговечности равен 5 ($K_N = 5$).

3.2. Значение расчетного сопротивления металла труб и соединительных деталей R_i определяют по следующей формуле:

$$R_i = \frac{R_i^H}{K_i}. \qquad (19)$$

В качестве примера в табл.1 приводятся значения коэффициента K_i в зависимости от характеристики труб и категории участков трубопроводов.

3.3. Коэффициенты ρ_K и частоты ω_K^* зависимостей (6) и (13) находят согласно п.1.2.

В качестве примера в табл.2 представлены значения ρ_0, ρ_1 ρ_2 и ω_2^*, которые рекомендуют при выборе толщин стенок элементов подземных трубопроводов. При этом $\rho_K = 0$ для $K > 2$. Значение номинального числа циклов за все время эксплуатации N равно $4 \cdot 10^3$ циклов.

3.4. Коэффициент α является случайной величиной, закон распределения которой должен устанавливаться на основе экспериментально-теоретического изучения напряженно-деформированного состояния отдельных элементов трубопроводов [3].

В качестве примера в табл.3 приведены значения α в зависимости от геометрии элемента и категории участка (доверительного уровня этого коэффициента).

Коэффициенты β_1 и β_2 определяют по экспериментальным

Таблица I

Характеристика труб	Значения K_T в соответствии с категорией магистральных трубопроводов и их участков		
	IУ-Ш	П-I	В
Термически упрочненные трубы после отбраковки с гарантированными механическими прочностными свойствами	I	I	I
Термически упрочненные трубы (закаленные и отпущенные в трубе или листе) из низколегированной стали, прокатанной по регулируемому режиму	I,02	I,04	I,06
Горячеправленные (по режиму нормализации), термически упрочненные (закаленные и отпущенные в трубе или листе) из нормализованной улучшенной низколегированной стали, прокатанной по регулируемому режиму	I,04	I,07	I,I0
Спиральношовные из горячекатаной низколегированной стали и прямошовные экспандированные трубы из нормализованной листовой стали	I,06	I,I0	I,I4
Прямошовные экспандированные и спиральношовные из горячекатаной низколегированной и углеродистой стали. Бесшовные трубы	I,08	I,I3	I,I8

Таблица 2

Наименование магистральных трубопроводов и их участков	Значения коэффициентов $p_к$ и $\omega_2^к$			
	p_0	p_1	p_2	$\omega_2^к$
I	2	3	4	5
Магистральный газопровод	0,9	0,05	0,05	$I0^2$
Магистральный нефтепровод	0,80	0,I0	0,I0	I0
Обвязочные трубопроводы КС и НПС с подключенной емкостью	0,70	0,20	0,I0	$I0^2$
Нагнетательные трубопроводы, идущие по территории КС и НПС с подключенной емкостью и примыка-				

Окончание табл.2

I	2	3	4	5
ющие к ним в пределах расстояний, указанных СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования"	0,70	0,20	0,I0	I0
Обвязочные трубопроводы НПС без подключенной емкости	0,60	0,30	0,I0	$I0^2$
Нагнетательные трубопроводы, идущие по территории НПС без подключения емкости	0,60	0,30	0,I0	I0

Таблица 3

Тип элемента	Значения коэффициента α в зависимости от категории участка		
	Ш-IУ	I-II	В
Прямолинейный участок подземной прокладки	-0,6	-0,65	-0,7
Отвод	-0,7	-0,75	-0,8
Тройниковое соединение	-0,9	-0,95	-I

данным статической прочности трубной стали при одноосном и двухосном нагружении и сдвиге.

Если нет необходимых данных, то рекомендуют использовать значения коэффициентов β_1 и β_2 по табл.4.

Таблица 4

Категория магистральных трубопроводов и их участков	Значения коэффициента β_1	Значения коэффициента β_2
Ш-IУ	I,75	0,9
I-II	I,8	0,8
В	I,9	0,7

3.5. При выборе толщин стенок элементов трубопроводов рекомендуют следующие значения коэффициентов $K_б$ и K_t:

для труб и заглушек $K_б = K_t = 1$;

для тройниковых соединений [6]- [8] значения коэффициента $K_б$ определяют по следующим соотношениям:

для сварных тройников без усиливающих накладок

$$K_б = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leqslant \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 0{,}1 \\ 1{,}5\,\dfrac{D_н^0}{D_н^м} + 0{,}85 & 0{,}1 < \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 0{,}45 \\ 0{,}14\,\dfrac{D_н^0}{D_н^м} + 1{,}46 & 0{,}45 < \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 1{,}0\ ; \end{cases} \qquad (20)$$

для тройников с усиливающими накладками

$$K_б = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leqslant \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 0{,}45 \\ 0{,}29\,\dfrac{D_н^0}{D_н^м} + 0{,}87 & 0{,}45 < \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 1{,}0\ ; \end{cases} \qquad (21)$$

для штампованных и штампосварных тройников

$$K_б = \begin{cases} 1 & 0 \leqslant \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 0{,}1 \\ 0{,}5\,\dfrac{D_н^0}{D_н^м} + 0{,}95 & \text{при } 0{,}1 < \dfrac{D_н^0}{D_н^м} \leqslant 1{,}0\ . \end{cases} \qquad (22)$$

Значения коэффициента K_t определяют по следующей зависимости:

$$K_t = \frac{D_н^м}{0{,}5(D_н^м - D_н^0) + 1{,}2\delta_н}\ . \qquad (23)$$

Когда транспортируемые вещества оказывают коррозионное воздействие на металл тройников, то $K_б = K_t$, где K_t определяется зависимостью (23).

Для отводов $K_б$ находят по формуле

$$K_б \begin{cases} -0,3\frac{r_1}{D} + 1,6 & \text{при } \frac{r_1}{D} \le 2 \\ 1 & \text{при } \frac{r_1}{D} > 2, \end{cases} \quad (24)$$

а K_t задается соотношением

$$K_t = 0,5\left(1 + \frac{2r_1}{2r_1 - D}\right). \quad (25)$$

Когда транспортируемые вещества оказывают коррозионное воздействие на металл отвода, то $K_б = K_t$, где K_t определяют соотношением (25).

Для конического перехода $K_б = I$, а K_t определяют по зависимости:

$$K_t = \cos^{-1}\gamma, \quad 0 \le \gamma \le 0,785 \text{ рад}, \quad (26)$$

В условиях коррозионно активной среды $K_б = K_t$, где K_t определяют по зависимости (26).

3.6. При определении коэффициента $\hat{K}$ следует использовать табл.5–I4 прил.2. Эти таблицы содержат значения функций $\hat{R}^{(1)}$ и $\hat{R}^{(0)}$ в зависимости от срока эксплуатации трубопровода или числа циклов за этот срок, статических прочностных свойств сталей, коэффициентов $K_t, K_б$ и K_c. Для определения функций от промежуточных значений параметров рекомендуется применять линейную интерполяцию.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИН СТЕНОК ТРУБ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

4.I. **Расчетную толщину** стенок труб и соединительных деталей находят по следующему соотношению:

$$\delta = \frac{pD_H F(\alpha)}{2(R_1\hat{K} + pF(\alpha))}. \quad (27)$$

Значение R_1 определяют по формуле (I9) и табл.I. Значение $\hat{k}$ находят по соотношениям (I3), (I4), (I5) или (I6)-(I8), (20)-(26) и табл.2 и табл.5-I4 прил.2. Величину $F(\lambda)$ определяют по соотношению (5) и значениям α, β_1, β_2 согласно п.3.4.

4.2. Значения толщин стенок труб и соединительных деталей, определенные по вышеуказанным соотношениям, меньше соответствующих величин по методике СНиП II-45-75 "Магистральные трубопроводы" до I0%.

5. МЕТОД ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

5.I. Определение напряженно-деформированного состояния магистральных трубопроводов целесообразно проводить в два этапа.

На первом этапе допускается рассматривать трубопроводы как статически неопределимые плоские и пространственные стержневые системы переменной жесткости с учетом всех ответвлений и промежуточных опор, находящиеся под действием внутреннего давления, стационарного температурного поля, распределенной и сосредоточенной весовых нагрузок и сил трения на опорах, взаимодействия с грунтом.

Основная цель этапа - определить усилия $\vec{Q}$ и моменты $\vec{M}$, возникающие в отдельных элементах трубопровода, от воздействия расчетных механических и температурных нагрузок (расчетные нагрузки равны нормативным, умноженным на соответствующие коэффициенты перегрузки).

На втором этапе находят напряженно-деформированное состояние отдельных элементов, при этом в граничные условия входят $\vec{Q}$ и $\vec{M}$, значения которых находят на первом этапе.

5.2. Определение $\vec{Q}$ и $\vec{M}$ производят методами строительной механики статически неопределимых нелинейных систем.

При использовании соответствующих алгоритмов расчета трубопроводов, реализованных на ЭВМ [7], [I2], следует добиваться соответствия значений геометрических и механических параметров, содержащихся в применяемой программе, значениям, нор-

мируемых СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования".

Значения геометрических и механических параметров элементов трубопровода целесообразно определять из решения задачи теории упругости для применяемых элементов.

Компоненты напряжений, соответствующие усилию $\vec{Q}$ и моменту $\vec{M}$, находят по следующим зависимостям:

$$\hat{\sigma}_2 = \pm \frac{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}}{W} + \frac{Q_3}{F}, \quad \hat{\sigma}_{13}^{x} = \frac{2Q_1}{F}, \quad \hat{\sigma}_{23}^{x} = \frac{2Q_2}{F}, \quad \hat{\sigma}_{12} = \frac{M_3}{W}.$$

При этом

$$\hat{\sigma}_1 = \frac{p(D_н - 2\delta_к)}{2\delta_к}. \qquad (28)$$

5.3. На втором этапе расчета находят истинное напряженно-деформированное состояние элементов трубопроводов, либо значения коэффициентов K_σ и K_t, характеризующие наиболее напряженные области элементов.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений элементов трубопроводов K_σ следует определять либо в результате решения задачи теории малых упруго-пластических деформаций для этих элементов под действием расчетной системы нагрузок, усилий и моментов, указанных в п.5.2, аналитически или численно, либо в результате экспериментов с натурными деталями или их моделями, подвергнутыми нагружению системой вышеуказанных усилий и моментов вплоть до разрушения. При отсутствии данных допускают выбор значения K_σ по п.3.5.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений для элементов трубопроводов K_t определяют или решением задачи напряженного состояния элемента под действием расчетной системы нагрузок, усилий и моментов п.5.2 методами теории упругости (аналитически или численно), или экспериментальными методами исследования напряженно-деформированного состояния элементов в упругой области.

При использовании соответствующих алгоритмов для определения напряженно-деформированного состояния элементов трубо-

---

x Значения компонент напряжений $\hat{\sigma}_{13}$ и $\hat{\sigma}_{23}$ для элементов трубопроводов в большинстве случаев гораздо меньше величин остальных компонент. При оценке прочности элементов они не учитываются.

проводов, реализованных на ЭВМ, следует проводить оценку точности полученных значений напряжений.

5.4.Изменчивость напряженно-деформированного состояния трубопроводов в процессе эксплуатации должна определяться с помощью гармонического анализа значений внутреннего давления и температуры транспортируемых веществ в течение нескольких лет эксплуатации (в крайнем случае допускается проводить анализ за один год). Основные указания приведены в п.I.4. При отсутствии необходимых данных следует использовать рекомендации п.3.3.

5.5. Напряженное состояние элементов трубопроводов должно удовлетворять критериям прочности, изложенным в п.2.I. или п.2.2.

Если при расчете оказывается, что в некоторых элементах напряженное состояние не удовлетворяет этим критериям прочности, то следует изменить конструктивную схему таким образом, чтобы напряженность данного элемента уменьшилась до требуемого уровня.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ХАРАКТЕРИСТИКА ВНЕШНИХ НАГРУЗОК И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ

p – нормативное давление в трубопроводе, МПа(кгс/см^2);

$p(t)$ – рабочее (эксплуатационное) давление в трубопроводе, МПа (кгс/см^2);

p_k ($k = 0,1,\ldots,K$) – относительные амплитуды рабочего давления, характеризующие спектр нагружения трубопровода;

ω_k ($k=1,\ldots,K$) – частоты, являющиеся характеристикой изменчивости нагружения в период эксплуатации, причем ω_1 – несущая гармоника;

M_1, M_2, M_3 – компоненты момента $\vec{M}$, из которых две первые являются изгибающими, а третья – крутящей, МПа см (кгс.см);

Q_1, Q_2, Q_3 – компоненты силы $\vec{Q}$, из которых две первые являются перерезывающими, а третья – осевой, МПа (кгс);

$\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_{13}, \hat{\sigma}_{23}, \hat{\sigma}_{12}$ – компоненты номинальных напряжений, соответствующие внутреннему давлению p, моменту $\vec{M}$ и силе $\vec{Q}$;

$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_{12}$ – компоненты истинных напряжений, определенных в результате решения задачи теории пластичности, МПа (кгс/см^2);

K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений в элементах трубопроводов при статическом нагружении, характеризующий истинную концентрацию напряжений перед их разрушением;

K_t – теоретический коэффициент концентраций напряжений в элементах трубопроводов при статическом нагружении, характеризующий концентрацию напряжений в упругой области;

K_c – эффективный коэффициент концентрации остаточных напряжений при переменном нагружении.

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА ТРУБ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

R – расчетное сопротивление металла труб и соединительных деталей, МПа (кгс/см^2);

$R_1^н$ – нормативное сопротивление металла труб и соединительных деталей, равное $\sigma_в$, МПа (кгс/см^2);

$\sigma_в, \sigma_т$ – соответственно минимальные значения временного сопротивления и условного предела текучести стали при одноосном нагружении, при этом вероятность появления значений временного сопротивления и предела текучести, меньших этих минимальных значений, не превышает 0,05 ;

$\sigma_в^*$ – минимальное значение временного сопротивления стали при двухосном растяжении с равными компонентами, МПа (кгс/см^2);

ρ^* – коэффициент, равный отношению предела текучести к пределу прочности стали, т.е. $\rho^* = \frac{\sigma_т}{\sigma_в}$;

ρ^{**} – коэффициент, равный отношению нижнего предела выносливости ко временному сопротивлению стали, т.е.

$$\rho^{**} = \frac{a}{\sigma_в} ;$$

β_1 – коэффициент, равный отношению пределов статической прочности стали при одноосном растяжении и сдвиге, т.е.

$$\beta_1 = \frac{\sigma_в}{\tau_в} :$$

β_2 – коэффициент, равный отношению пределов прочности при двуосном и одноосном нагружении, т.е.

$$\beta_2 = \frac{\sigma^*}{\sigma_в} ;$$

n – коэффициент перегрузки, выбираемый согласно СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования";

k_1 – коэффициент безопасности стали по статической прочности;

$k, \hat{k}$ – коэффициенты условий работы, учитывающие режим эксплуатационного нагружения элемента;

k_N – коэффициент безопасности по числу циклов.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

$D_н$ – наружный диаметр труб, мм;

$D_н^м, D_н^в$ – наружные диаметры магистрали и ответвления тройников соответственно, мм;

D – наружный диаметр отвода, мм;

δ – расчетная толщина стенки трубы, мм;

δ_* – толщина стенки трубы, принятая в проекте, мм;

$\delta_м$ – расчетная толщина стенки магистральной части тройника, мм;

γ – угол конусности переходника, равный половине угла конуса при вершине, рад;

$r_ц$ – радиус центральной оси отвода, мм;

r – средний радиус поперечного сечения трубы, мм;

F, W, W_ρ – площадь, момент сопротивления, полярный момент сопротивления поперечного сечения трубы, принятого в проекте, $мм^2$, $мм^3$.

Приложение 2

Таблица 5

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 1$, $K_\sigma = 1$, $K_c = 1$

ρ^*	0.830	0.790	0.790	0.740	0.700	0.680	0.650	0.600
$\lg N$ \ ρ^{**}	0.053	0.067	0.057	0.074	0.068	0.075	0.085	0.100
2.2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2.4	0.981	0.982	0.982	0.984	0.984	0.985	0.986	0.988
2.6	0.942	0.946	0.945	0.950	0.953	0.955	0.958	0.963
2.8	0.903	0.910	0.909	0.917	0.921	0.925	0.930	0.938
3.0	0.864	0.874	0.872	0.884	0.890	0.894	0.901	0.913
3.2	0.825	0.838	0.835	0.850	0.858	0.864	0.873	0.888
3.4	0.787	0.801	0.799	0.817	0.826	0.834	0.845	0.863
3.6	0.748	0.765	0.762	0.784	0.795	0.804	0.817	0.838
3.8	0.709	0.729	0.725	0.750	0.763	0.773	0.788	0.813
4.0	0.670	0.793	0.688	0.717	0.732	0.743	0.760	0.788
4.2	0.631	0.657	0.652	0.684	0.700	0.713	0.732	0.763
4.4	0.592	0.621	0.615	0.651	0.668	0.683	0.704	0.738

Окончание табл.5

4.6	0.555	0.564	0.579	0.617	0.657	0.652	0.675	0.713
4.8	0.515	0.548	0.542	0.564	0.605	0.622	0.647	0.666
5.0	0.476	0.512	0.505	0.551	0.574	0.592	0.619	0.663
5.2	0.457	0.476	0.469	0.517	0.542	0.562	0.591	0.636
5.4	0.398	0.440	0.432	0.484	0.510	0.531	0.562	0.613
5.6	0.359	0.404	0.395	0.451	0.479	0.501	0.534	0.588
5.8	0.320	0.366	0.359	0.417	0.447	0.471	0.506	0.563
6.0	0.281	0.331	0.322	0.384	0.416	0.441	0.478	0.536
6.2	0.245	0.295	0.286	0.351	0.384	0.410	0.449	0.513
6.4	0.223	0.277	0.267	0.334	0.368	0.395	0.435	0.500

Продолжение прил.2

Таблица 6

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = I$, $K_\sigma = I$, $K_c = 0{,}35$

ρ^*	0.000	0.750	0.700	0.740	0.750	0.600	0.650	0,000
$\lg N$ ρ^{**}	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]

Окончание табл.6

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.608	0.621	0.641	0.674
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.557	0.570	0.590	0.625
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.505	[illegible]	0.539	0.572
[illegible]	[illegible]	0.415	0.407	0.441	0.454	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.405	0.417	0.437	0.470	
[illegible]	0.287	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0.362	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	0.260	0.265	0.257	0.291	0.301	0.315	0.335	0.366	
[illegible]	0.188	0.215	0.206	0.241	0.256	0.264	0.284	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	0.166	0.156	0.190	[illegible]	0.213	0.235	0.266	
[illegible]	0.112	0.140	0.150	0.165	0.175	0.187	0.207	0.240	

Таблица 7

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^{*}, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_б = I$ и $K_c = I$

$\lg N$ \ ρ^{*}	0.830	0.790	0.790	0.740	0.700	0.680	0.650	0.600
ρ^{**}	0.053	0.067	0.057	0.074	0.068	0.075	0.065	0.100
I.2	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000
1.4	0.997	0.997	0.997	0.996	0.995	0.995	0.994	0.994
I.6	0.992	0.990	0.990	0.986	0.986	0.985	0.983	0.981
I.8	0.986	0.983	0.983	0.979	0.976	0.974	0.972	0.968
2.0	0.981	0.977	0.977	0.971	0.966	0.964	0.961	0.965
2.2	0.976	0.970	0.970	0.963	0.957	0.954	0.950	0.942
2.4	0.951	0.945	0.945	0.938	0.932	0.929	0.924	0.917
2.6	0.907	0.902	0.902	0.896	0.890	0.886	0.885	0.879
2.8	0.862	0.859	0.858	0.855	0.849	0.848	0.846	0.842
3.0	0.816	0.817	0.815	0.813	0.808	0.807	0.806	0.804
3.2	0.774	0.774	0.771	0.771	0.767	0.767	0.767	0.766
3.4	0.729	0.731	0.726	0.730	0.726	0.726	0.727	0.728
3.6	0.685	0.686	0.685	0.686	0.684	0.686	0.688	0.690

Окончание табл.7

3.8	!	0.641	!	0.645	!	0.641	!	0.646	!	0.643	!	0.645	!	0.648	!	0.653
4.0	!	0.597	!	0.602	!	0.598	!	0.605	!	0.602	!	0.605	!	0.609	!	0.615
4.2	!	0.552	!	0.559	!	0.555	!	0.563	!	0.561	!	0.564	!	0.569	!	0.577
4.4	!	0.506	!	0.516	!	0.511	!	0.522	!	0.520	!	0.524	!	0.530	!	0.539
4.6	!	0.464	!	0.474	!	0.468	!	0.480	!	0.478	!	0.483	!	0.491	!	0.501
4.8	!	0.419	!	0.431	!	0.424	!	0.438	!	0.437	!	0.443	!	0.451	!	0.464
5.0	!	0.375	!	0.388	!	0.381	!	0.397	!	0.396	!	0.402	!	0.412	!	0.426
5.2	!	0.331	!	0.345	!	0.338	!	0.355	!	0.355	!	0.362	!	0.372	!	0.388
5.4	!	0.287	!	0.302	!	0.294	!	0.314	!	0.314	!	0.321	!	0.333	!	0.350
5.6	!	0.242	!	0.259	!	0.251	!	0.272	!	0.272	!	0.281	!	0.293	!	0.312
5.8	!	0.198	!	0.216	!	0.208	!	0.230	!	0.231	!	0.240	!	0.254	!	0.275
6.0	!	0.154	!	0.174	!	0.164	!	0.189	!	0.190	!	0.200	!	0.214	!	0.237
6.2	!	0.109	!	0.131	!	0.121	!	0.147	!	0.149	!	0.159	!	0.175	!	0.199
6.4	!	0.067	!	0.109	!	0.099	!	0.126	!	0.128	!	0.139	!	0.155	!	0.180

Таблица 8

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_\sigma = 1$, $K_\varepsilon = 0{,}35$

ρ^* / $\lg N$ \ ρ^{**}	0.055	0.067	0.057	0.074	0.066	0.075	0.065	0.100
1.2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.4	0.997	0.997	0.997	0.996	0.995	0.995	0.994	0.994
1.6	0.992	0.990	0.990	0.988	0.986	0.985	0.983	0.981
1.8	0.986	0.983	0.983	0.979	0.976	0.974	0.972	0.968
2.0	0.981	0.977	0.977	0.971	0.966	0.964	0.961	0.955
2.2	0.976	0.970	0.970	0.963	0.957	0.954	0.950	0.942
2.4	0.951	0.945	0.945	0.936	0.932	0.929	0.924	0.917
2.6	0.907	0.902	0.902	0.896	0.890	0.886	0.885	0.879
2.8	0.862	0.859	0.856	0.855	0.849	0.848	0.846	0.842
3.0	0.818	0.817	0.815	0.813	0.808	0.807	0.806	0.804
3.2	0.774	0.774	0.771	0.771	0.767	0.767	0.767	0.766
3.4	0.729	0.731	0.728	0.730	0.726	0.726	0.727	0.726

Окончание табл.8

3.6	0.685	0.688	0.685	0.688	0.684	0.686	0.688	0.690
3.8	0.641	0.645	0.641	0.646	0.643	0.645	0.648	0.653
4.0	0.597	0.602	0.598	0.605	0.602	0.605	0.609	0.615
4.2	0.552	0.559	0.555	0.563	0.561	0.564	0.569	0.577
4.4	0.505	0.513	0.508	0.517	0.515	0.519	0.524	0.533
4.6	0.456	0.464	0.458	0.468	0.465	0.469	0.474	0.483
4.8	0.407	0.416	0.410	0.420	0.416	0.420	0.426	0.435
5.0	0.359	0.368	0.362	0.373	0.368	0.373	0.379	0.389
5.2	0.312	0.322	0.315	0.327	0.322	0.327	0.334	0.344
5.4	0.266	0.276	0.269	0.282	0.277	0.282	0.290	0.301
5.6	0.220	0.232	0.223	0.238	0.233	0.239	0.247	0.260
5.8	0.175	0.188	0.179	0.195	0.190	0.197	0.206	0.220
6.0	0.130	0.145	0.136	0.153	0.149	0.156	0.166	0.182
6.2	0.087	0.103	0.093	0.112	0.109	0.117	0.128	0.146
6.4	0.065	0.082	0.072	0.092	0.089	0.097	0.109	0.128

Таблица 9

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^{*}, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_\sigma = 1{,}5$, $K_\varepsilon = 0{,}35$

$\lg N$ \ ρ^{**}	ρ^{*} = 0.830	0.790	0.790	0.740	0.700	0.660	0.650	0.600
	0.053	0.067	0.057	0.074	0.068	0.075	0.085	0.100
1.2	0.943	0.930	0.930	0.913	0.900	0.893	0.883	0.867
1.4	0.942	0.928	0.928	0.911	0.897	0.890	0.880	0.863
1.6	0.939	0.924	0.924	0.906	0.892	0.884	0.874	0.856
1.8	0.935	0.920	0.920	0.901	0.886	0.878	0.867	0.848
2.0	0.932	0.916	0.916	0.896	0.880	0.872	0.861	0.841
2.2	0.929	0.912	0.912	0.892	0.875	0.866	0.854	0.833
2.4	0.907	0.891	0.890	0.870	0.854	0.846	0.833	0.813
2.6	0.865	0.851	0.850	0.832	0.816	0.809	0.799	0.781
2.8	0.823	0.810	0.809	0.794	0.779	0.773	0.764	0.748
3.0	0.781	0.770	0.769	0.756	0.742	0.737	0.729	0.716
3.2	0.739	0.730	0.728	0.718	0.705	0.701	0.694	0.683
3.4	0.697	0.690	0.687	0.679	0.668	0.664	0.660	0.651
3.6	0.655	0.650	0.647	0.641	0.630	0.626	0.625	0.618

Окончание табл.9

3.8	0.615	0.618	0.606	0.605	0.593	0.592	0.590	0.586
4.0	0.570	0.570	0.566	0.565	0.556	0.556	0.555	0.554
4.2	0.526	0.530	0.526	0.527	0.519	0.520	0.520	0.521
4.4	0.484	0.487	0.482	0.486	0.478	0.479	0.481	0.484
4.6	0.450	0.442	0.457	0.441	0.434	0.436	0.439	0.442
4.8	0.395	0.398	0.392	0.398	0.391	0.393	0.397	0.402
5.0	0.348	0.364	0.348	0.355	0.348	0.351	0.356	0.362
5.2	0.303	0.311	0.304	0.313	0.306	0.310	0.316	0.323
5.4	0.259	0.268	0.260	0.272	0.265	0.270	0.276	0.286
5.6	0.215	0.226	0.218	0.231	0.255	0.250	0.256	0.249
5.8	0.172	0.184	0.175	0.190	0.185	0.191	0.200	0.213
6.0	0.129	0.145	0.134	0.151	0.146	0.153	0.163	0.178
6.2	0.086	0.104	0.092	0.112	0.106	0.116	0.127	0.145
6.4	0.043	0.062	0.072	0.092	0.069	0.097	0.109	0.126

Таблица I0

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_G = 2$, $K_\ell = 0{,}35$

$\lg N$ \ ρ^* / ρ^{**}	Ø.ØЗØ	Ø.79Ø	Ø.79Ø	Ø.74Ø	Ø.7ØØ	Ø.66Ø	Ø.65Ø	Ø.6ØØ
	Ø.ØЗЗ	Ø.Ø67	Ø.ØЗ7	Ø.Ø74	Ø.Ø6Ь	Ø.Ø75	Ø.Ø85	Ø.IØØ
1.2	Ø.9I5	Ø.895	Ø.895	Ø.87Ø	Ø.85Ø	Ø.84Ø	Ø.825	Ø.6ØØ
1.4	Ø.9I4	Ø.894	Ø.894	Ø.866	Ø.646	Ø.83Ь	Ø.823	Ø.796
1.6	Ø.9I2	Ø.89I	Ø.89I	Ø.865	Ø.845	Ø.834	Ø.8I9	Ø.793
I.8	Ø.9IØ	Ø.889	Ø.889	Ø.862	Ø.84I	Ø.83Ø	Ø.8I5	Ø.788
2.Ø	Ø.9Ø6	Ø.886	Ø.886	Ø.859	Ø.837	Ø.827	Ø.8IØ	Ø.783
2.2	Ø.9Ø6	Ø.884	Ø.884	Ø.856	Ø.834	Ø.823	Ø.8Ø6	Ø.76I
2.4	Ø.885	Ø.865	Ø.863	Ø.856	Ø.8I5	Ø.8Ø4	Ø.788	Ø.76I
2.6	Ø.844	Ø.825	Ø.824	Ø.8ØØ	Ø.779	Ø.77Ø	Ø.755	Ø.73I
2.8	Ø.8Ø5	Ø.786	Ø.785	Ø.764	Ø.744	Ø.736	Ø.723	Ø.7Ø2
3.Ø	Ø.762	Ø.747	Ø.746	Ø.727	Ø.7Ø9	Ø.7Ø2	Ø.69I	Ø.672
3.2	Ø.72I	Ø.7Ø9	Ø.7Ø6	Ø.69I	Ø.674	Ø.668	Ø.658	Ø.642
3.4	Ø.68Ø	Ø.67Ø	Ø.667	Ø.654	Ø.639	Ø.633	Ø.626	Ø.6I2

Окончание табл.IO

3.6	Ø.659	Ø.651	Ø.626	Ø.618	Ø.6Ø3	Ø.599	Ø.593	Ø.582
4.Ø	Ø.557	Ø.554	Ø.55Ø	Ø.545	Ø.533	Ø.531	Ø.526	Ø.523
4.2	Ø.517	Ø.515	Ø.51Ø	Ø.5Ø9	Ø.498	Ø.497	Ø.496	Ø.493
4.4	Ø.474	Ø.474	Ø.469	Ø.47Ø	Ø.46Ø	Ø.46Ø	Ø.46Ø	Ø.459
4.6	Ø.43Ø	Ø.432	Ø.426	Ø.428	Ø.419	Ø.42Ø	Ø.421	Ø.422
4.8	Ø.386	Ø.389	Ø.383	Ø.387	Ø.378	Ø.38Ø	Ø.382	Ø.385
5.Ø	Ø.342	Ø.347	Ø.341	Ø.346	Ø.338	Ø.341	Ø.344	Ø.349
5.2	Ø.299	Ø.3Ø6	Ø.298	Ø.3Ø6	Ø.298	Ø.3Ø2	Ø.3Ø6	Ø.313
5.4	Ø.266	Ø.264	Ø.256	Ø.266	Ø.259	Ø.264	Ø.269	Ø.278
5,6	Ø.213	Ø.223	Ø.215	Ø.227	Ø.221	Ø.226	Ø.233	Ø.244
5.8	Ø.17Ø	Ø.182	Ø.174	Ø.186	Ø.183	Ø.189	Ø.197	Ø.21Ø
6.Ø	Ø.128	Ø.142	Ø.133	Ø.15Ø	Ø.145	Ø.152	Ø.162	Ø.177
6.2	Ø.186	Ø.1Ø2	Ø.Ø92	Ø.111	Ø.1Ø8	Ø.116	Ø.127	Ø.144
6.4	0.Ø65	Ø.Ø82	Ø.Ø72	Ø.Ø92	Ø.Ø89	Ø.Ø97	Ø.1Ø9	Ø.126

Продолжение прил.2

Таблица II

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_б = 2,5$ и $K_c = 0,35$

ρ^*	0.830	0.790	0.790	0.740	0.700	0.680	0.650	0.600
$\lg N$ \ ρ^{**}	0.053	0.067	0.057	0.074	0.068	0.075	0.085	0.100
1.2	0.898	0.874	0.874	0.844	0.820	0.808	0.790	0.760
1.4	0.897	0.873	0.873	0.843	0.819	0.807	0.789	0.758
1.6	0.896	0.871	0.871	0.841	0.816	0.804	0.786	0.755
1.8	0.895	0.870	0.870	0.839	0.814	0.802	0.783	0.752
2.0	0.893	0.868	0.868	0.837	0.812	0.799	0.780	0.749
2.2	0.892	0.866	0.866	0.835	0.809	0.796	0.777	0.746
2.4	0.871	0.847	0.847	0.816	0.791	0.779	0.761	0.730
2.6	0.831	0.809	0.808	0.781	0.757	0.746	0.730	0.702
2.8	0.791	0.771	0.770	0.745	0.723	0.713	0.699	0.674
3.0	0.751	0.733	0.732	0.710	0.689	0.681	0.667	0.645
3.2	0.710	0.696	0.695	0.675	0.655	0.648	0.636	0.617
3.4	0.670	0.658	0.655	0.630	0.621	0.615	0.605	0.589

Окончание табл.II

3.6	Ø.63Ø	Ø.62Ø	Ø.6I7	Ø.6Ø4	Ø.587	Ø.582	Ø.574	Ø.56I
3.8	Ø.59Ø	Ø.582	Ø.57Ø	Ø.566	Ø.553	Ø.549	Ø.543	Ø,533
4.Ø	Ø.55Ø	Ø.544	Ø.54Ø	Ø.533	Ø.5I9	Ø.5I6	Ø.5I2	Ø.5Ø4
4.2	Ø.5Ø9	Ø.5Ø6	Ø.5Ø2	Ø.496	Ø.485	Ø.484	Ø.48I	Ø.476
4.4	Ø.466	Ø.467	Ø.46I	Ø.46Ø	Ø.449	Ø.448	Ø.447	Ø.444
4.6	Ø.425	Ø.425	Ø.42Ø	Ø.42Ø	Ø.4Ø9	Ø.4IØ	Ø.4IØ	Ø.4Ø9
4.8	Ø.382	Ø.384	Ø.378	Ø.36I	Ø.37I	Ø.372	Ø.373	Ø.375
5.Ø	Ø.339	Ø.343	Ø.336	Ø.34I	Ø.332	Ø.334	Ø.337	Ø.34I
5.2	Ø.296	Ø.3Ø2	Ø.295	Ø.3Ø2	Ø.294	Ø.297	Ø.3ØI	Ø.3Ø7
5.4	Ø.254	Ø.262	Ø.254	Ø.263	Ø.256	Ø.26Ø	Ø.265	Ø.273
5.6	Ø.2I2	Ø.22I	Ø.2I3	Ø.225	Ø.2I6	Ø.223	Ø.23Ø	Ø.24Ø
5.8	Ø.17Ø	Ø.I8I	Ø.I73	Ø.I87	Ø.I8I	Ø.I87	Ø.I95	Ø.2Ø8
6.Ø	Ø.I26	Ø.I4I	Ø.I3[illegible]	Ø.I49	Ø.I44	Ø.I5I	Ø.I6I	Ø.I76
6.2	Ø.Ø86	Ø.I[illegible]	Ø.Ø92	Ø.III	Ø.IØ7	Ø.II5	Ø.I27	Ø.I44
6.4	Ø.Ø65	Ø.Ø82	Ø.Ø72	Ø.Ø92	Ø.Ø69	Ø.Ø87	Ø.IØ9	Ø.I28

Таблица I2

Значения коэффициента $\hat{R}^{(1)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от числа циклов N и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_\sigma = 3$, $K_\varepsilon = 0{,}35$

$\lg N$	ρ^* / ρ^{**}																							
		0,05		0,10		0,15		0,20		0,25		0,30		0,35		0,40		0,45		0,50		0,55		0,60
	0,05																							
	0,10																							
	0,15																							
	0,20																							
	0,25																							
	0,30																							
	0,35																							
	0,40																							
	0,45																							
	0,50																							
	0,55																							
	0,60																							
	0,65																							
	0,70																							
	0,75																							
	0,80																							
	0,85																							
	0,90																							
	0,95																							
	1,00																							
	1,05																							
	1,10																							
	1,15																							
	1,20																							
	1,25																							
	1,30																							
	1,35																							
	1,40																							
	1,45																							
	1,50																							
	1,55																							
	1,60																							
	1,65																							
	1,70																							
	1,75																							
	1,80																							
	1,85																							
	1,90																							
	1,95																							
	2,00																							

Окончание табл. I2

3.8	Ø.584	Ø.579	Ø.571	Ø.560	Ø.540	Ø.539	Ø.532	Ø.5I0
4.Ø	Ø.544	Ø.538	Ø.534	Ø.525	Ø.5IØ	Ø.5Ø7	Ø.5ØI	Ø.492
4.2	Ø.5Ø5	Ø.5ØI	Ø.496	Ø.49Ø	Ø.477	Ø.475	Ø.47I	Ø.465
4.4	Ø.464	Ø.462	Ø.456	Ø.454	Ø.44I	Ø.44Ø	Ø.438	Ø.435
4.6	Ø.42I	Ø.42I	Ø.4I5	Ø.4I5	Ø.4Ø3	Ø.4Ø3	Ø.4Ø3	Ø.4ØI
4.8	Ø.379	Ø.38I	Ø.374	Ø.376	Ø.365	Ø.366	Ø.367	Ø.368
5.Ø	Ø.337	Ø.34Ø	Ø.334	Ø.338	Ø.328	Ø.33Ø	Ø.332	Ø.335
5.2	Ø.294	Ø.3ØØ	Ø.293	Ø.3ØØ	Ø.29I	Ø.293	Ø.297	Ø.3Ø3
5.4	Ø.253	Ø.26Ø	Ø.252	Ø.26I	Ø.254	Ø.257	Ø.263	Ø.27Ø
5.6	Ø.2II	Ø.22Ø	Ø.2I2	Ø.224	Ø.2I7	Ø.22I	Ø.228	Ø.238
5.8	Ø.I69	Ø.I8I	Ø.I72	Ø.I86	Ø.I8Ø	Ø.I86	Ø.I94	Ø.2Ø6
6.Ø	Ø.I27	Ø.I4I	Ø.I32	Ø.I48	Ø.I44	Ø.I5Ø	Ø.I6Ø	Ø.I75
6.2	Ø.Ø86	Ø.IØ2	Ø.Ø92	Ø.III	Ø.IØ7	Ø.II5	Ø.I26	Ø.I44
6.4	Ø.Ø65	Ø.Ø82	Ø.Ø72	Ø.Ø92	Ø.Ø89	Ø.Ø97	Ø.IØ9	Ø.I28

Продолжение прил.2

Таблица I3

Значения коэффициента $\hat{R}^{(0)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от срока службы трубопровода t [час] и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = I$, $K_б = I$

ρ^*	0.830	0.790	0.790	0.740	0.700	0.680	0.650	0.600
$\lg t$ \ ρ^{**}	0.053	0.067	0.057	0.074	0.068	0.075	0.085	0.I00
3.0	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000	I.000
3.2	0.995	0.994	0.994	0.992	0.99I	0.990	0.989	0.988
3.4	0.990	0.987	0.987	0.984	0.982	0.98I	0.979	0.976
3.6	0.985	0.98I	0.98I	0.976	0.973	0.97I	0.968	0.964
3.8	0.979	0.975	0.975	0.968	0.964	0.96I	0.958	0.952
4.0	0.974	0.968	0.968	0.96I	0.955	0.952	0.947	0.939
4.2	0.969	0.962	0.962	0.953	0.945	0.942	0.936	0.927
4.4	0.964	0.955	0.955	0.945	0.936	0.932	0.926	0.9I5
4.6	0.959	0.949	0.949	0.937	0.927	0.922	0.9I5	0.903
4.8	0.954	0.943	0.943	0.829	0.9I8	0.9I3	0.905	0.89I
5.0	0.949	0.936	0.936	0.92I	0.909	0.903	0.894	0.879
5.2	0.943	0.930	0.930	0.9I3	0.900	0.893	0.883	0.867
5.4	0.938	0.924	0.924	0.905	0.89I	0.884	0.873	0.855

Окончание табл. I3

5.6	0.933	0.917	0.917	0.896	0.882	0.874	0.862	0.842
5.8	0.920	0.911	0.911	0.890	0.873	0.864	**0.852**	0.830
6.0	0.925	0.905	0.905	0.882	0.864	0.855	0.841	0.818
6.2	0.916	0.896	0.896	0.874	0.855	0.845	0.830	0.806
6.4	0.915	0.895	0.895	0,870	0.850	0.840	0.825	0.800

Продолжение прил.2

Таблица I4

Значения коэффициента $\hat{R}^{(0)}$ для труб и соединительных деталей в зависимости от срока службы трубопровода t (час) и параметров ρ^*, ρ^{**} при $K_t = 5$, $K_\sigma = 3$

ρ^* / ρ^{**} / $\lg t$	[illegible]	0.790	0.790	0.740	0.700	0.680	0.650	0.600
	[illegible]	0.067	0.067	0.074	0.068	0.075	0.085	0.100
3.0	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
3.2	0.324	0.324	0.324	0.324	0.323	0.323	0.323	0.323
3.4	0.315	0.315	0.315	0.314	0.314	0.313	0.313	0.312
3.6	0.306	0.305	0.305	0.304	0.304	0.303	0.302	0.302
3.8	0.297	0.296	0.296	0.295	0.294	0.293	0.293	0.291
4.0	0.288	0.287	0.287	0.285	0.284	0.283	0.282	0.281
4.2	0.279	0.277	0.277	0.275	0.274	0.273	0.272	0.270
4.4	0.270	0.268	0.268	0.266	0.264	0.263	0.262	0.260
4.6	0.260	0.259	0.259	0.256	0.254	0.253	0.252	0.249
4.8	0.251	0.249	0.249	0.246	0.244	0.243	0.242	0.239
5.0	0.242	0.240	0.240	0.237	0.234	0.233	0.231	0.228
5.2	0.233	0.230	0.230	0.227	0.224	0.223	0.221	0.218
5.4	0.224	0.221	0.221	0.217	0.215	0.213	0.211	0.207

Окончание табл. I4

5.6	0.2I5	0.2I2	0.2I2	0.206	0,205	0.203	0.20I	0.I97
5.8	0.206	0.202	0.202	0.I96	0.I95	0.I93	0.I9I	0.I86
6.0	0.I97	0.I9[illegible]	0.I95	0.I89	0.I85	0.I83	0.I80	0.I76
6.2	0.I8[illegible]	0.I84	0.I84	0.I79	0.I75	0.I73	0.I70	0.I65
6.4	0.I83	0.I79	0.I79	0.I74	0.I70	0.I66	0.I65	0.I60

ЛИТЕРАТУРА

I. Основные положения расчета магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов простого нагружения. Р 359-79. М., ВНИИСТ, 1980.

2. Завойчинский Б.И. Об одной линейной теории предельных процессов нагружения магистральных трубопроводов. М., Труды ВНИИСТа, 1980.

3. Завойчинский Б.И. Стохастическая теория предельных процессов нагружения магистральных трубопроводов. М., Труды ВНИИСТа, 1981.

4. Завойчинский Б.И. Основные положения теорий предельных процессов нагружения. М., Изд-во АН СССР, Механика твердого тела, 1980, № I.

5. Завойчинский Б.И. К обоснованию теории предельных процессов нагружения. М., Изд-во АН СССР, Механика твердого тела, 1981, № I.

6. Красулин И.Д. Напряженное состояние и несущая способность тройниковых соединений. М., Строительство трубопроводов, 1964, № 10.

7. Красулин И.Д. О напряженном состоянии тройниковых соединений после пластического деформирования. М., Труды ВНИИСТа, 1971.

8. Красулин И.Д., Кочмарева И.А. Напряженно-деформированное состояние и несущая способность сварных тройниковых соединений. М., Труды ВНИИСТа, 1974.

9. Инструкция по эксплуатации вычислительного комплекса "Супер-76" для прочностного расчета строительных конструкций на ЭВМ "Минск-32", 1978; на ЭВМ "ЕС". Киев, Госстрой УССР, НИИАСС, 1980.

10. Руководство по расчету с применением ЭВМ подземных трубопроводов с произвольным очертанием оси в горизонтальной плоскости Р 319-78. М., ВНИИСТ, 1979.

11. Руководство по расчету с применением ЭВМ подземных трубопроводов с произвольным очертанием оси в вертикальной плоскости. М., ВНИИСТ, 1979, 1980.

I2. Руководство по расчету с применением ЭВМ многопролетных бескомпенсаторных переходов трубопроводов. М., ВНИИСТ, I979.

I3. Расчеты трубопроводов на прочность по программе "Астра" (указание по подготовке исходных данных и проведению расчетов). М., ЦКТИ, I98I.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Основные соотношения теории предельных процессов простого нагружения магистральных трубопроводов 6

3. Расчетные характеристики для труб и соединительных деталей 10

4. Определение толщин стенок труб и соединительных деталей 14

5. Метод оценки конструктивной прочности магистральных трубопроводов 15

Приложения 19

Литература 45

Рекомендации по расчету магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов нагружения

Р 417-81

Издание ВНИИСТа

Редактор Ф.Д.Остаева

Корректор Г.Ф. Мелихова

Технический редактор Т.В.Березнева

Д-76441 Подписано в печать 18/I 1982 г. Формат 60х84/16

Печ.л. 3,0 Уч.-изд.л. 2,3 Бум.л. 1,5

Тираж 650 экз. Цена 23 коп. Заказ 6

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru