МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

·ВНИИСТ·

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИБКОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Р 526-84

МОСКВА 1984

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

·ВНИИСТ·

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИБКОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Р 526-84

МОСКВА 1984

УДК 621.643.001.2

В Рекомендациях изложена методика определения коэффициента понижения жесткости и коэффициентов интенсификации напряжений криволинейных элементов трубопроводов, плавно сопряженных с прямолинейными участками трубопроводов и находящихся под действием плоского изгиба и внутреннего давления.

Приведен алгоритм программы и контрольный пример расчета.

Программа на машинных носителях хранится в отделе инженерных и сметных расчетов с применением ЭВМ (ОИР) института ЮжНИИгипрогаза (г.Донецк).

Рекомендации разработаны отделом прочности и надежности конструкций магистральных трубопроводов (ОПН) ВНИИСТа совместно с ОИР ЮжНИИгипрогаза и предназначены для специалистов проектных организаций, занимающихся проектированием и расчетом трубопроводов.

Рекомендации составили: кандидаты техн.наук В.П.Черний, А.А.Никитин (ВНИИСТ), инженеры А.С.Крымова, Л.А.Мещерякова, Л.Н.Олейник, В.С.Шевчук (ЮжНИИгипрогаз).

Замечания и предложения направлять по адресу: 105058, Москва, Окружной проезд, 19, ВНИИСТ; г.Донецк, ул.Артема, 169г, ЮжНИИгипрогаз.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1984

Министерство строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности	Рекомендации по определению гибкости и напряженного состояния криволинейных участков трубопроводов	Р 526-84 Впервые

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие Рекомендации разработаны в развитие главы СНиП II-45-75 "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования".

I.2. В Рекомендациях приведена методика определения гибкости (коэффициента понижения жесткости) и напряженного состояния (коэффициентов интенсификации напряжений) упруго изгибаемых криволинейных элементов трубопроводов с учетом влияния сопряжения их с прямолинейными участками трубопроводов и внутреннего давления.

I.3. На основании разработанной методики составлены алгоритм и программа определения гибкости и напряженного состояния криволинейных участков трубопроводов, реализованные на машинном языке ФОРТРАН-IУ для ЭВМ ЕС.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИБКОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

Постановка задачи

2.I. Рассматривается криволинейный участок трубопровода (кривая труба) кругового сечения с наружным диаметром D_H, толщиной стенки δ_1, длиной L, радиусом кривизны продольной оси ρ и центральным углом φ. Радиус средней линии сечения кривой трубы $r = (D_H - \delta_1)/2$. Кривая труба плавно сопрягается торцами с прямолинейными участками трубопровода (цилиндрическими оболочками) того же наружного диаметра, как указано на рисунке. Толщина стенки прямых труб обозначена через δ_2.

Внесены ВНИИСТом	Утверждены ВНИИСТом 9 декабря 1983 г. ЮжНИИгипрогазом 22 ноября 1983 г.	Срок введения в действие I августа 1984 г.

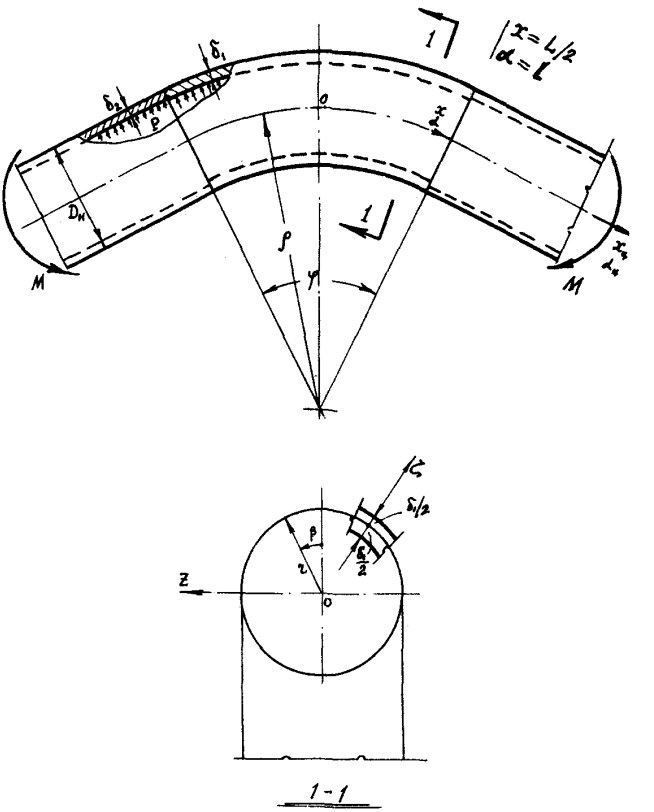


Схема криволинейного участка трубопровода

Плоскости сопряжений труб (торцевые плоскости) ортогональны осям сопрягаемых труб.

2.2. Рассматриваемый участок трубопровода испытывает действие внутреннего давления P и изгибающего момента M в плоскости кривизны трубы.

2.3. Деформация кривой трубы рассматривается в безразмерных продольной и угловой координатах $\alpha = x/r$, β и в натуральной координате ζ, отсчитываемой по нормали от срединной поверхности трубы. Компоненты перемещения произвольной точки срединной поверхности по направлениям координат α, β, ζ обозначаются соответственно через U, V, W.

Прямая труба имеет координаты $\alpha_u = x_u/r$, β, ζ.

2.4. Задача состоит в разработке методики определения коэффициента понижения жесткости и коэффициентов интенсификации напряжений при изгибе подобных криволинейных участков трубопроводов.

Основные допущения

2.5. Материал труб однородный изотропный и подчиняется закону Гука.

2.6. Радиус средней линии сечения прямолинейной трубы принимается равным радиусу средней линии сечения кривой трубы.

2.7. Геометрические параметры кривой и прямой труб удовлетворяют условиям

$$1 \pm \frac{\delta_i}{r} \approx 1; \quad (i = 1,2);$$
$$1 \pm \frac{z}{\rho} \approx 1.$$

Основные принципы решения задачи

2.8. Примыкающие к кривой трубе прямолинейные участки трубопровода ограничивают деформацию контуров торцевых сечений кривой трубы и обусловливают поэтому неравномерное по ее длине сплющивание поперечных сечений при изгибе.

2.9. Компоненты перемещений, деформаций и напряжений по всей длине рассматриваемого криволинейного участка трубопровода, за исключением зон сопряжения труб, определяются только основным медленно изменяющимся напряженным состоянием, к кото-

рому применимы гипотезы полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова [1]. Решение задачи для основного напряженного состояния основывается на теории изгиба криволинейных труб с подкрепленными краями В.П.Ильина [2]. При рассмотрении условий сопряжения труб учитывается также резкое местное возмущение напряженного состояния (краевой эффект) в зонах сопряжения оболочек.

2.10. Из условий равновесия элемента срединной поверхности криволинейной трубы получаем систему уравнений равновесия, которая на основании работ [2] записывается в виде:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial N_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0;\\
&\frac{\partial N_2}{\partial \beta} + \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \frac{r}{\rho} N_1 \sin\beta + r K_2^* Q_2 = 0;\\
&\frac{r}{\rho} N_1 \cos\beta + r K_2^* N_2 - \frac{\partial Q_2}{\partial \beta} = r P;\\
&\frac{1}{r} \frac{\partial M_2}{\partial \beta} + Q_2 = 0,
\end{aligned}\right\} \qquad (I)$$

где $N_1, S, \ldots, Q_2$ – погонные усилия и моменты, действующие на элемент оболочки;

$K_2^* = \frac{1}{r} + \varkappa_2$ – кривизна деформированной средней линии сечения оболочки ($\varkappa_2$ – приращение кривизны в результате деформации элемента оболочки);

P – внутреннее давление.

2.11. При исключении усилий S, N_2, Q_2 система (I) сводится к уравнению, содержащему только N_1 и M_2

$$\frac{\partial^2 N_1}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}\left(1 + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}\right) M_2 + \frac{r}{\rho}\left[\frac{\partial^2 N_1}{\partial \beta^2}\cos\beta - 3\frac{\partial N_1}{\partial \beta}\sin\beta - 2N_1\cos\beta\right] + r^2 P \frac{\partial^2 \varkappa_2}{\partial \beta^2} = 0. \qquad (2)$$

N_1 и M_2 представляются в виде:

$$N_1 = \frac{E\delta_1}{1-\mu^2}\varepsilon_1\,; \qquad M_2 = -D\varkappa_2\,, \tag{3}$$

где E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

ε_1 – продольная деформация срединной поверхности кривой трубы;

$D = \frac{E\delta_1^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость.

2.12. Компоненты деформаций ε_1 и $\varkappa_2$ выражаются через приращения кривизны оси кривой трубы и перемещения в виде

$$\varepsilon_1 = \varkappa_0 r\cos\beta + \varkappa_w r\cos\beta + \tag{4}$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial\alpha} - \frac{1}{\rho}V\sin\beta + \frac{1}{\rho}W\cos\beta\,; \quad \varkappa_2 = -\frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial^2 W}{\partial\beta^2} + W\right),$$

где $\varkappa_0 = M/EJ$ – постоянное по длине трубы приращение кривизны ее оси, определяемое на основании балочной теории сопротивления материалов;

$\varkappa_w$ – переменное по длине трубы приращение кривизны ее оси, обусловленное сплющиванием поперечных сечений кривой трубы (эффектом Кармана).

2.13. Радиальные перемещения представляются в форме тригонометрического ряда

$$W = \varkappa_0 r^2 \sum_{n=2}^{\infty} f_n \cos n\beta, \tag{5}$$

где $f_n = f_n(\alpha)$.

2.14. Используя геометрические соотношения полубезмоментной теории оболочек, остальные перемещения и приращение кривизны $\varkappa_2$ также представляются в виде рядов. Из условия равенства момента внутренних сил относительно оси Z внешнему изгибающему моменту находится зависимость для переменной составляющей приращения кривизны оси трубы

$$\varkappa_w = -\frac{3}{4}\frac{\varkappa_0 r}{\rho} f_2. \tag{6}$$

2.15. При использовании в уравнении (2) зависимостей (3,4) и представлении перемещений в рядах получается бесконечная система дифференциальных уравнений, записанная ниже для удобства в координатах $\bar{\alpha} = (10\psi_1)^{-1/2}\alpha$, где $\psi_1 = \delta_1/r$

$$a_{n,n-2} f_{n-2} + a_{n,n-1} \frac{d^2 f_{n-1}}{d\bar{\alpha}^2} + \frac{d^4 f_n}{d\bar{\alpha}^4} + a_{n,n} f_n + \\ + a_{n,n+1} \frac{d^2 f_{n+1}}{d\bar{\alpha}^2} + a_{n,n+2} f_{n+2} = A \delta_{2n} , \qquad (7)$$

где $a_{n,m} = F(n, \lambda, \psi_1, P)$;

$A = -0{,}12 (\psi_1 \lambda)^{-1}$;

$\lambda = \rho \delta_1^5 / r^2$ – геометрический параметр кривой трубы;

δ_{2n} – символ Кронекера.

2.16. При сохранении в ряду (5) трех первых членов бесконечная система (7) сводится к системе трех уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^4 f_2}{d\bar{\alpha}^4} + a_{22} f_2 + a_{23} \frac{d^2 f_3}{d\bar{\alpha}^2} + a_{24} f_4 = A ; \\ &a_{32} \frac{d^2 f_2}{d\bar{\alpha}^2} + \frac{d^4 f_3}{d\bar{\alpha}^4} + a_{33} f_3 + a_{34} \frac{d^2 f_4}{d\bar{\alpha}^2} = 0 ; \\ &a_{42} f_2 + a_{43} \frac{d^2 f_3}{d\bar{\alpha}^2} + \frac{d^4 f_4}{d\bar{\alpha}^4} + a_{44} f_4 = 0 . \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

2.17. Решение системы уравнений (8) представляется в виде:

$$\left.\begin{aligned} f_2 &= \sum_{j=2}^{4} A_{2j} \bar{\varphi}_j + f_2^* ; \\ f_3 &= \sum_{j=2}^{4} A_{3j} \frac{d^2 \bar{\varphi}_j}{d\bar{\alpha}^2} ; \\ f_4 &= \sum_{j=2}^{4} A_{4j} \bar{\varphi}_j + f_4^* , \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

$$\bar{\varphi}_j = C_{0j} K_0(\gamma_j \bar{\alpha}) + C_{2j} K_2(\gamma_j \bar{\alpha}) ; \quad \gamma_i = \sqrt[4]{\frac{1}{4} |\beta_i|} , \qquad (10)$$

где $A_{nj} = F(\beta_j, a_{n,m})$ – коэффициенты влияния функций перемещений $\bar{\varphi}_j$ на параметры f_n;

f_2^*, f_4^* – частные решения системы уравнений (8);

$K_0(\gamma_j \bar{\alpha})$, $K_2(\gamma_j \bar{\alpha})$ – четные функции А.Н.Крылова;

C_{0j}, C_{2j} – произвольные постоянные.

2.I8. Корни β_i находятся из характеристического уравнения

$$\beta^3 + g_1\beta^2 + g_2\beta + g_3 = 0, \qquad (II)$$

в котором коэффициенты $g_i\,(i=1,2,3)$ являются функциями от a_{nm}.

2.I9. Учитывая доминирующее влияние второй гармоники $f_2 \cos 2\beta$ на любой из компонентов напряженно-деформированного состояния при изгибе кривой трубы, в выражениях (9) оставляются только члены с индексом $j = 2$. В этом случае для определения параметра перемещения f_2 применимо уравнение:

$$\frac{d^4 f_2}{d\bar{\alpha}^4} + |\beta_2| f_2 = |\beta_2| \frac{A}{a_{22}^*}, \qquad (I2)$$

где β_2 – наименьший по абсолютной величине корень уравнения (II);

$$a_{22}^* = a_{22}\left(1 - \frac{a_{24}\, a_{42}}{a_{22}\, a_{44}}\right).$$

2.20. Параметр перемещения f_2 записывается в виде

$$f_2 = \left[1 + C_1^* K_0(\gamma_2\bar{\alpha}) + C_2^* K_2(\gamma_2\bar{\alpha})\right] f_2^*, \qquad (I3)$$

где $$C_1^* = \frac{A_{22}}{f_2^*} C_{02};\quad C_2^* = \frac{A_{22}}{f_2^*} C_{22};\quad f_2^* = \frac{A}{a_{22}^*}.$$

2.2I. Остальные параметры перемещения выражаются аналогичным образом:

$$\left.\begin{aligned} f_3 &= A_{32}^* \gamma_2^2 \left[-4C_1^* K_2(\gamma_2\bar{\alpha}) + C_2^* K_0(\gamma_2\bar{\alpha})\right] f_2^*; \\ f_4 &= A_{42}^* \left[C_1^* K_0(\gamma_2\bar{\alpha}) + C_2^* K_2(\gamma_2\bar{\alpha})\right] f_2^* + f_4^*, \end{aligned}\right\} \qquad (I4)$$

где $$A_{j2}^* = \frac{A_{j2}}{A_{22}};\ (j=3,4);\quad f_4^* = \frac{a_{42}}{a_{22}} f_2^*$$

2.22. Вид уравнения (I2) показывает, что расчетная модель изгибаемой и находящейся под внутренним давлением кривой трубы условно может быть представлена в виде цилиндрической оболочки того же сечения и длины, находящейся под действием нормальной изменяющейся по закону $q\cos 2\beta$ нагрузки, внутреннего давления P и нагруженной дополнительным внутренним давлением некоторой интенсивности ΔP, величина которой зависит от геометрического параметра кривой трубы λ. Величина амплитудной нагрузки q соответствует частному решению f_2^* в кривой трубе.

2.23. Указанная аналогия позволяет применить неупрощенные зависимости технической моментной теории тонких оболочек для решения задачи сопряжения кривой и прямой труб. Поэтому далее используются зависимости [I] для цилиндрических оболочек, нагруженных нормальной неосесимметричной нагрузкой. Уравнению (I2) в координатах α соответствует разрешающее дифференциальное уравнение 8-го порядка, записываемое через функцию перемещений $\varphi_к$:

$$\frac{\psi_1^2}{12(1-\mu^2)}\frac{d^8\varphi_к}{d\alpha^8}+\frac{d^4\varphi_к}{d\alpha^4}+100\psi_1^2|\beta_2|\varphi_к=100\psi_1^2|\beta_2|\frac{A}{\sigma_{22}^*}. \quad (I5)$$

2.24. Все компоненты перемещений, усилий и моментов выражаются через функцию $\varphi_к$ на основании дифференциальных зависимостей этих компонентов от разрешающей функции Φ, связанной с $\varphi_к$ соотношением $\Phi=\frac{1}{16}\varkappa_0 r^2\varphi_к\cos 2\beta$

2.25. Решение уравнения (I5) записывается в четных функциях А.Н.Крылова в виде

$$\varphi_к=\left[1+C_1K_0(t_1\alpha)+C_2K_2(t_1\alpha)+C_3K_0(U_1\alpha)+C_4K_2(U_1\alpha)\right]\varphi_к^*, \quad (I6)$$

где C_i – произвольные постоянные;

t_1, U_1 – множители "малых" и "больших" корней характеристического уравнения, соответствующего уравнению (I5),

$\varphi_к^*=f_2^*$.

Множитель t_1 связан с γ_2 отношением

$$t_1=\sqrt{10\psi_1\gamma_2}$$

2.26. Компоненты перемещений, усилий и моментов выражаются на основании выражения (I6) в функциях А.Н.Крылова. Эти выражения содержат четыре неизвестных произвольных постоянных C_i

2.27. Записывается также дифференциальное уравнение 8-го порядка для примыкающих к кривой трубе цилиндрических оболочек через функцию перемещений $\varphi_ц$:

$$\frac{\psi_2^2}{12(1-\mu^3)}\frac{d^8\varphi_ц}{d\alpha_ц^8}+\frac{d^4\varphi_ц}{d\alpha_ц^4}+100\psi_2^2|\beta_{2ц}|\varphi_ц=0, \qquad (I7)$$

где $\psi_2=\delta_2/z$

2.28. Решение уравнения (I7) ищется в затухающих функциях

$$\varphi_ц=C_5e^{-t_2\alpha_ц}\cos t_2\alpha_ц+C_6e^{-t_2\alpha_ц}\sin t_2\alpha_ц+ \\ +C_7e^{-u_2\alpha_ц}\cos u_2\alpha_ц+C_8e^{-u_2\alpha_ц}\sin u_2\alpha_ц, \qquad (I8)$$

где $C_i\,(i=5,6,7,8)$ – произвольные постоянные;

t_2, u_2 – множители соответственно "малого" и "большого" корней характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению (I7).

2.29. Все компоненты перемещений, усилий и моментов в цилиндрической оболочке записываются на основании выражения (I8) через затухающие функции и неизвестные C_i.

2.30. Произвольные постоянные $C_i\,(i=1,2,3,\ldots,8)$ определяются из условий сопряжения торцов криво- и прямолинейных труб для координат $\alpha=\ell$ и $\alpha_ц=0$;

$$U(\ell)=U_ц(0);\\ V(\ell)=V_ц(0);\\ W(\ell)=W_ц(0);\\ \vartheta_1^{\delta}(\ell)=\vartheta_{1ц}^{\delta}(0);\\ N_1(\ell)=N_{1ц}(0);\\ S(\ell)=S_ц(0);\\ M_1(\ell)=M_{1ц}(0);\\ Q_1(\ell)=Q_{1ц}(0). \qquad (I9)$$

2.31. Используя выражения (16) и (18), условия (19) приводятся к системе восьми алгебраических уравнений с восемью неизвестными C_i :

$$\| b_{ij} \| \, \| C_j \| = \| q_i \|. \quad (i = 1, 2, \ldots, 8; \; j = 1, 2, \ldots, 8).$$

2.32. Далее снова используются дифференциальные зависимости 4-го порядка, характеризующие основное напряженное состояние кривой трубы. Неизвестные C_1^* и C_2^* определяются из условия:

$$\varkappa_0 \tau^2 f_2(\alpha) = \frac{1}{2} \left[|W_0(\alpha)| + 2|V_0(\alpha)| \right], \qquad (20)$$

где $W_0(\alpha)$ и $V_0(\alpha)$ – амплитудные величины соответственно нормального и касательного перемещений в сечении.

2.33. Из условия (20) следует:

$$C_1^* = (1 - 0{,}125\, t_1^4)\, C_1 - 0{,}5375\, t_1^2 C_2 ;$$

$$C_2^* = 2{,}150\, t_1^2 C_1 + (1 - 0{,}125 t_1^4)\, C_2 .$$

2.34. Найденные значения неизвестных C_1^* и C_2^* позволяют определять все необходимые параметры, характеризующие изгиб кривой трубы: перемещения, деформации, напряжения, коэффициент понижения жесткости.

2.35. Перемещения точек срединной поверхности кривой трубы находятся на основании соотношений (13), (14). Для продольных деформаций используется формула, следующая из зависимости (4):

$$\varepsilon_1^* = \frac{\varepsilon_1}{\varkappa_0 \tau} = 1 - \frac{3}{4} \frac{\tau}{\rho} f_2(\alpha) \cos\beta +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{\tau}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} f_n(\alpha) \left[(n+1)\cos(n-1)\beta + (n-1)\cos(n+1)\beta \right] - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \frac{d^2 f_n(\alpha)}{d\alpha^2} \cos\beta . \qquad (21)$$

2.36. Коэффициент интенсификации продольных напряжений равен наибольшему значению параметра продольных деформаций в центральном сечении кривой трубы:

$$m_K = \max\{|\varepsilon_1^*|\} \quad (\text{при } \alpha = 0;\ 0 \le \beta \le \pi).$$

Если по расчету получается $m_K < 1$, следует принимать $m_K = 1$.

2.37. Коэффициент понижения жесткости $K_ж$ кривой трубы, плавно сопряженной с прямыми трубами, определяется по формуле

$$K_ж = \left\langle 1 - \frac{3}{4}\psi_1 \lambda^{-1} f_2^* \left\{ 1 + (t_1^*)^{-1} \left[C_1^* K_1(t_1^*) + C_2^* K_3(t_1^*) \right] \right\}^{-1} \right\rangle, \qquad (22)$$

где $K_i(t_1^*);\ (i = 1, 3)$ – нечетные функции А.Н.Крылова;

$t_1^* = t_1 \ell$ – параметр длины кривой трубы.

2.38. Алгоритмом расчета предусмотрено, что в случае, если параметр длины кривой трубы удовлетворяет условию $t_1^* \ge \frac{\pi}{2}$, труба считается длинной, неизвестные $C_1^* = C_2^* = 0$ и все искомые характеристики гибкости и напряженного состояния трубы определяются по теории Т.Кармана [3] в третьем приближении, т.е. учитывая 2-ю, 4-ю и 6-ю гармоники разложения в ряд.

2.39. Формула для определения коэффициента интенсификации кольцевых напряжений m_{2K} в алгоритме расчета не приводится, хотя при необходимости его можно определить как максимум параметра кольцевых деформаций, имеющих место в точках с координатами: $\alpha = 0;\ \beta = \pm\frac{\pi}{2};\ \zeta = \pm\delta_1/2$:

$$m_{2K} = \frac{1}{2}\psi_1 \sum_{n=2,4,6,\ldots} (-1)^{n/2} (n^2 - 1) f_n(0). \qquad (23)$$

Область применения методики

2.40. Изложенная в настоящих Рекомендациях методика определения гибкости и напряженного состояния криволинейных участков трубопроводов предназначена для расчета кривых труб, плав-

но сопряженных с прямолинейными участками трубопроводов при помощи сварки.

2.4I. Методика пригодна для кривых труб, геометрический параметр которых удовлетворяет условию

$$\lambda \geq 0{,}05. \qquad (24)$$

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА НА ЭВМ

Описание программы

3.I. Блок-схема алгоритма определения гибкости и напряженного состояния криволинейных участков трубопроводов приведена в приложении I.

3.2. Алгоритм реализован в виде процедуры *KPONIN* на алгоритмическом языке *FORTRAN-IV* для ЕС ЭВМ, ОС, версия 6.I.

3.3. Исходные данные и результаты расчета помещены в неименованный блок *COMMON*.

3.4. Корни β кубического уравнения (II) определяются с использованием стандартной подпрограммы *DPOLRT*, реализующей итерационный метод Ньютона-Рафсона.

3.5. Для решения системы линейных алгебраических уравнений (I9) применяется стандартная подпрограмма *DSIMQ*, основанная на методе исключения с выбором главного элемента.

3.6. Описание стандартных подпрограмм *DPOLRT* и *DSIMQ* приведено в [4].

Исходные данные

3.7. Исходные данные для расчета заносятся в специально разработанный бланк (см.контрольный пример расчета – приложение 2).

3.8. В первую строку бланка записывается число рассчитываемых вариантов.

3.9. Во вторую и последующие строки заносятся данные по каждому варианту:

$D_н$ – наружный диаметр трубопровода, мм;
δ_1 – толщина стенки кривой трубы, мм;
δ_2 – толщина стенки прямой трубы, мм;
ρ – радиус кривизны оси кривой трубы, мм;
φ – центральный угол кривой трубы, град., мин;
μ – коэффициент Пуассона;
E – модуль Юнга, МПа;
p – внутреннее давление, МПа.

3.10. Форматы вводимых данных приведены на бланке.

Выходная информация

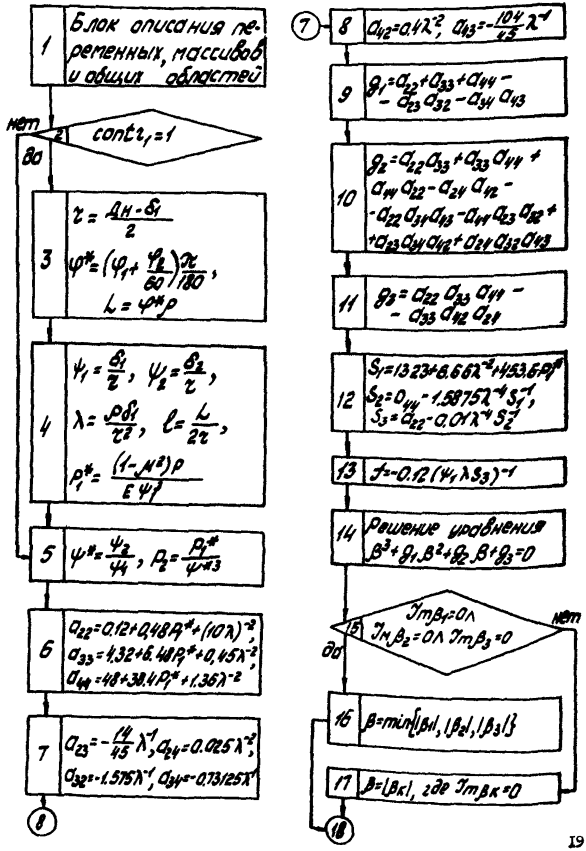
3.11. Для контроля заданных исходных данных и правильности их перфорации распечатывается вся исходная информация по заданному варианту.

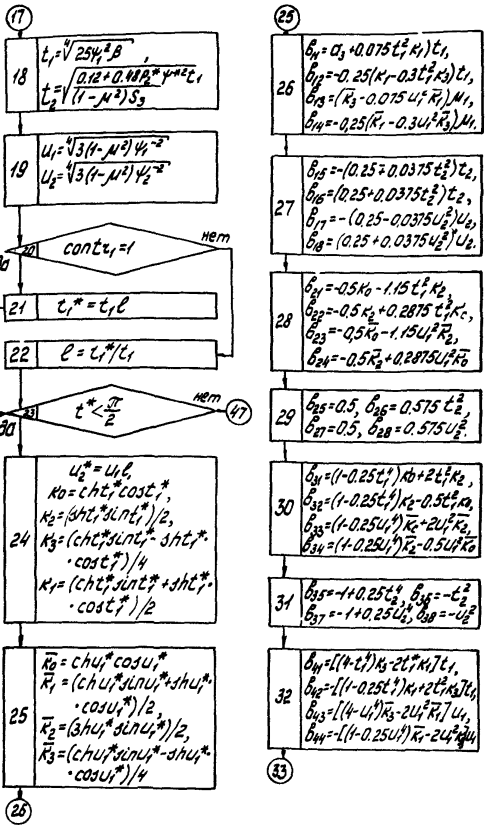
3.12. Далее следуют результаты вычислений: коэффициент понижения жесткости; коэффициент интенсификации продольных напряжений; геометрический параметр кривой трубы; параметр внутреннего давления; параметр радиального перемещения; малый и большой корни t_1 и U_1 (блоки 18, 19 блок-схемы); параметр длины кривой трубы; параметр разностенности; приведенные неизвестные C_1^* и C_2^* (блоки 45, 46 блок-схемы); перемещения в центральном и крайнем сечениях; малый корень для прямой трубы t_2 (блок 18 блок-схемы); параметр продольных деформаций в точках с координатами $\beta = 0^0$, $\beta = 90^0$, $\beta = 180^0$.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

БЛОК –СХЕМА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИБКОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

(процедура KRONIN)




17
18
$t_1=\sqrt[4]{25\psi_1^2\beta}$,
$t_2=\sqrt{\frac{0.12+0.48R_2^*\gamma+\varepsilon t_1}{(1-\mu^2)S_3}}$
19
$u_1=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)\psi_1^{-2}}$
$u_2=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)\psi_2^{-2}}$
20
$cont\,t_1=1$
нет
да
21
$t_1^*=t_1\ell$
22
$\ell=t_1^*/t_1$
23
$t^*<\frac{\pi}{2}$
нет
47
да
24
$u_2^*=u_1\ell$,
$K_0=chu_1^*\cos t_1^*$,
$K_2=(shu_1^*\sin t_1^*)/2$,
$K_3=(chu_1^*\sin t_1^*-shu_1^*\cdot\cos t_1^*)/4$
$K_1=(chu_1^*\sin t_1^*+shu_1^*\cdot\cos t_1^*)/2$
25
$\bar{K}_0=chu_1^*\cos u_1^*$
$\bar{K}_1=(chu_1^*\sin u_1^*+shu_1^*\cdot\cos u_1^*)/2$,
$\bar{K}_2=(shu_1^*\sin u_1^*)/2$,
$\bar{K}_3=(chu_1^*\sin u_1^*-shu_1^*\cdot\cos u_1^*)/4$
26
25
$\delta_{11}=\alpha_3+0.075t_2^2K_1)t_1$,
$\delta_{12}=-0.25(K_1-0.3t_2^2K_3)t_1$,
$\delta_{13}=(\bar{K}_1-0.075u_1^2\bar{K}_1)\mu_1$,
$\delta_{14}=-0.25(\bar{K}_1-0.3u_1^2\bar{K}_3)\mu_1$.
27
$\delta_{15}=-(0.25+0.0375t_2^2)t_2$,
$\delta_{16}=(0.25+0.0375t_2^2)t_2$,
$\delta_{17}=-(0.25-0.0375U_2^2)U_2$,
$\delta_{18}=(0.25+0.0375u_2^2)U_2$.
28
$\delta_{21}=-0.5K_0-1.15t_1^2K_2$,
$\delta_{22}=-0.5K_0+0.2875t_1^2K_0$,
$\delta_{23}=-0.5K_0-1.15U_1^2\bar{K}_2$,
$\delta_{24}=-0.5\bar{K}_0+0.2875U_1^2\bar{K}_0$
29
$\delta_{25}=0.5$, $\delta_{26}=0.575t_2^2$,
$\delta_{27}=0.5$, $\delta_{28}=0.575U_2^2$.
30
$\delta_{31}=(1-0.25t_1^4)K_0+2t_1^2K_2$,
$\delta_{32}=(1-0.25t_1^4)K_2-0.5t_1^2K_0$,
$\delta_{33}=(1-0.25U_1^4)\bar{K}_0+2U_1^2\bar{K}_2$,
$\delta_{34}=(1+0.25U_1^4)\bar{K}_2-0.5U_1^2\bar{K}_0$
31
$\delta_{35}=-1+0.25t_2^4$, $\delta_{36}=-t_2^2$
$\delta_{37}=-1+0.25U_2^4$, $\delta_{38}=-U_2^2$
32
$\delta_{41}=[(4-t_1^4)K_3-2t_1^2K_1]t_1$,
$\delta_{42}=-[(1-0.25t_1^4)K_1+2t_1^2K_3]t_1$,
$\delta_{43}=[(4-U_1^4)\bar{K}_3-2U_1^2\bar{K}_1]U_1$,
$\delta_{44}=-[(1-0.25U_1^4)\bar{K}_1-2U_1^2\bar{K}_3]U_1$
33

32

33 $\delta_{15}=-[1+(1-0.25t_2^2)t_2^2]t_2$,
$\delta_{16}=[1-(1+0.25t_2^2)t_2^2]t_2$,
$\delta_{17}=-[1+(1-0.25U_2^2)U_2^2]U_2$,
$\delta_{18}=[1-(1+0.25U_2^2)U_2^2]U_2$.

34 $\delta_{51}=t_2^2K_2$, $\delta_{52}=-0.25t_2^2K_0$,
$\delta_{53}=U_2^2K_2$, $\delta_{54}=-0.25U_2^2K_0$,
$\delta_{55}=0$, $\delta_{56}=-0.5\psi^{*}t_2^2$,
$\delta_{57}=0$, $\delta_{58}=-0.5\psi^{*}U_2^2$.

35 $\delta_{61}=-0.5t_2^2K_1$, $\delta_{62}=-0.5t_2^2K_3$,
$\delta_{63}=-0.5U_2^2K_1$, $\delta_{64}=-0.5U_2^2K_3$,
$\delta_{65}=0.25\psi^{*}t_2^2$,
$\delta_{66}=0.25\psi^{*}t_2^2$,
$\delta_{67}=0.25\psi^{*}U_2^2$,
$\delta_{68}=-0.25\psi^{*}U_2^2$

36 $\delta_{71}=(-0.9+2.225t_1^4)K_0+$
$+(-5.8t_1^2+t_1^6)K_2$,
$\delta_{72}=(-0.9+2.225t_1^4)K_0+$
$+(1.45t_1^2-0.25t_1^6)K_0$

37 $\delta_{73}=(-0.9+2.225U_1^4)\bar{K}_0+$
$+(-5.8U_1^2+U_1^6)\bar{K}_2$,
$\delta_{74}=(-0.9+2.225U_1^4)\bar{K}_2+$
$+(1.45U_1^2-0.25U_1^6)\bar{K}_0$

38 $\delta_{75}=(0.9-2.225t_2^4)\psi^{*3}$,
$\delta_{76}=(2.9-0.5t_2^2)t_2^2\psi^{*3}$,
$\delta_{77}=(0.9-2.225U_2^4)\psi^{*3}$,
$\delta_{78}=(2.9-0.5U_2^2)U_2^2\psi^{*3}$.

39

39 $\delta_{11}=(-14.8+11.7t_1^4)t_1K_3+$
$+(11.4-t_1^4)t_1^3K_1$,
$\delta_{12}=(3.7-2.925t_1^4)t_1K_1+$
$+(11.4-t_1^4)t_1^3K_3$

40 $\delta_{13}=(-14.8+11.7U_1^4)U_1\bar{K}_3+$
$+(11.4-U_1^4)U_1^3\bar{K}_1$,
$\delta_{14}=(3.7-2.925U_1^4)U_1\bar{K}_1+$
$+(11.4-U_1^4)U_1^3\bar{K}_3$.

41 $\delta_{15}=\{3.7+[5.7-(2.925+0.5t_2^2)$
$\cdot t_2^2]t_2^2\}t_2\psi^{*3}$
$\delta_{16}=-\{3.7-[5.7+(2.925-$
$-0.5t_2^2)t_2^2]t_2^2\}t_2\psi^{*3}$

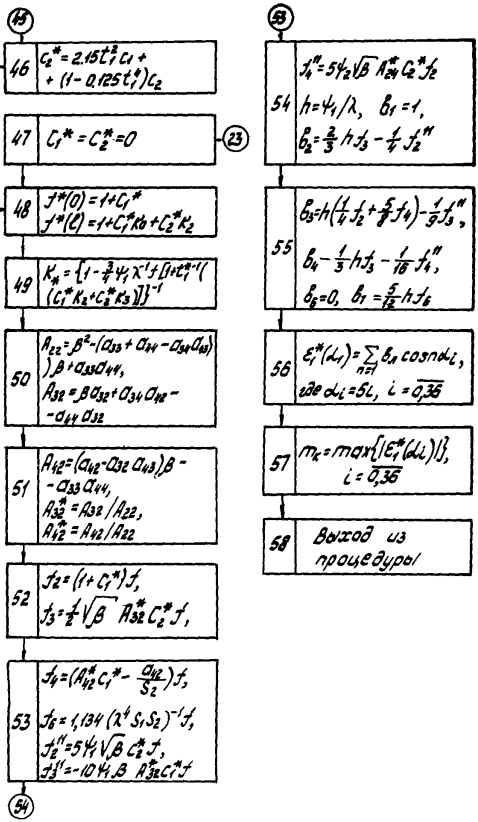
42 $\delta_{17}=\{3.7+[5.7-(2.925+0.5U_2^2)$
$\cdot U_2^2]U_2^2\}U_2\psi^{*3}$
$\delta_{18}=-\{3.7-[5.7+(2.925-$
$-0.5U_2^2)U_2^2]U_2^2\}U_2\psi^{*3}$

43 $q_1=q_4=q_5=q_8=q_9=0$,
$q_2=0.5$, $q_3=-1$, $q_7=0.9$

44 Решение системы уравнений
$\sum_{j=1}^{8}\delta_{ij}c_j=q_i$, $i=\overline{1,8}$

45 $c_1^{*}=(1-0.125t_1^4)c_1-$
$-0.5375t_1^2c_2$

46



45

46	$C_2^* = 2.15 t_1^2 C_1 + (1 - 0.125 t_1^4) C_2$
47	$C_1^* = C_2^* = 0$
48	$f^*(0) = 1 + C_1^*$ $f^*(\ell) = 1 + C_1^* K_0 + C_2^* K_2$
49	$K_* = \{1 - \frac{3}{4}\psi_1 \lambda^{-1} f [1 + t_1^{*-1}((C_1^* K_2 + C_2^* K_3)]\}^{-1}$
50	$A_{22} = \beta^2 - (a_{33} + a_{34} - a_{34} a_{43})\beta + a_{33} a_{44}$, $A_{32} = \beta a_{32} + a_{34} a_{42} - a_{44} a_{32}$
51	$A_{42} = (a_{42} - a_{32} a_{43})\beta - a_{33} a_{44}$, $A_{32}^* = A_{32} / A_{22}$, $A_{42}^* = A_{42} / A_{22}$
52	$f_2 = (1 + C_1^*) f$, $f_3 = \frac{1}{2}\sqrt{\beta}\, A_{32}^* C_2^* f$,
53	$f_4 = (A_{42}^* C_1^* - \frac{a_{42}}{S_2}) f$, $f_6 = 1{,}134 (\lambda^4 S_1 S_2)^{-1} f$, $f_2'' = 5\psi_1 \sqrt{\beta}\, C_2^* f$, $f_3'' = -10\psi_1 \beta\, A_{32}^* C_1^* f$

23

54

53

54	$f_4'' = 5\psi_2 \sqrt{\beta}\, A_{24}^* C_2^* f_2$ $h = \psi_1 / \lambda$, $b_1 = 1$, $b_2 = \frac{2}{3} h f_3 - \frac{1}{4} f_2''$
55	$b_3 = h(\frac{1}{4} f_2 + \frac{5}{8} f_4) - \frac{1}{9} f_3''$, $b_4 - \frac{1}{3} h f_3 - \frac{1}{16} f_4''$, $b_6 = 0$, $b_7 = \frac{5}{12} h f_6$
56	$\varepsilon_1^*(\alpha_i) = \sum_{n=1} b_n \cos n\alpha_i$, где $\alpha_i = 5i$, $i = \overline{0,36}$
57	$m_k = \max\{\lvert\varepsilon_1^*(\alpha_i)\rvert\}$, $i = \overline{0,36}$
58	Выход из процедуры

КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные к программе определения гибкости и напряженного состояния криволинейного участка трубопровода

	D_N	δ_1	δ_2	ρ	φ_1	φ_2	μ	E	P
2	142.0	3.4.0	25.0	21.00	24	30	.3	21.000	7.5

ЛИТЕРАТУРА

I. В л а с о в В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.-Л., Гостехиздат, 1949.

2. И л ь и н В. П. Об изгибе кривых тонкостенных труб. "Механика стержневых систем и сплошных сред". Сб. трудов ЛИСИ, вып. 49, Л., ЛИСИ, 1966.

3. К о с т о в е ц к и й Д. Л. Прочность трубопроводных систем энергетических установок. Л., Энергия, 1973.

4. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ (пакет научных подпрограмм). Минск, изд. АН БССР, 1975.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Методика определения гибкости и напряженного состояния криволинейного участка трубопровода 3

3. Реализация метода на ЭВМ I4

Приложения I7

Литература 24

Рекомендации
по определению гибкости и напряженного
состояния криволинейных участков трубопроводов

Р 526-84
Издание ВНИИСТа

Редактор И.Р.Беляева
Корректор Г.Ф. Меликова
Технический редактор Т.В.Берешева

Л-76812 Подписано в печать 4/IX 1984 г. Формат 60х84/I6
Печ.л. I,5 Уч.-изд.л. I,I Бум.л. 0,75
Тираж 350 экз. Цена II коп. Заказ 78

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru