

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

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ
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 ЮжНИИгазпрогаза (г.Донецк).

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

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

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

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

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

1.2. 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.

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

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИБКОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

Постановка задачи

2.1. 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. ЮжНИИгазпрогазом 22 ноября 1983 г.	Срок введения в действие 1 августа 1984 г.
------------------	---	--

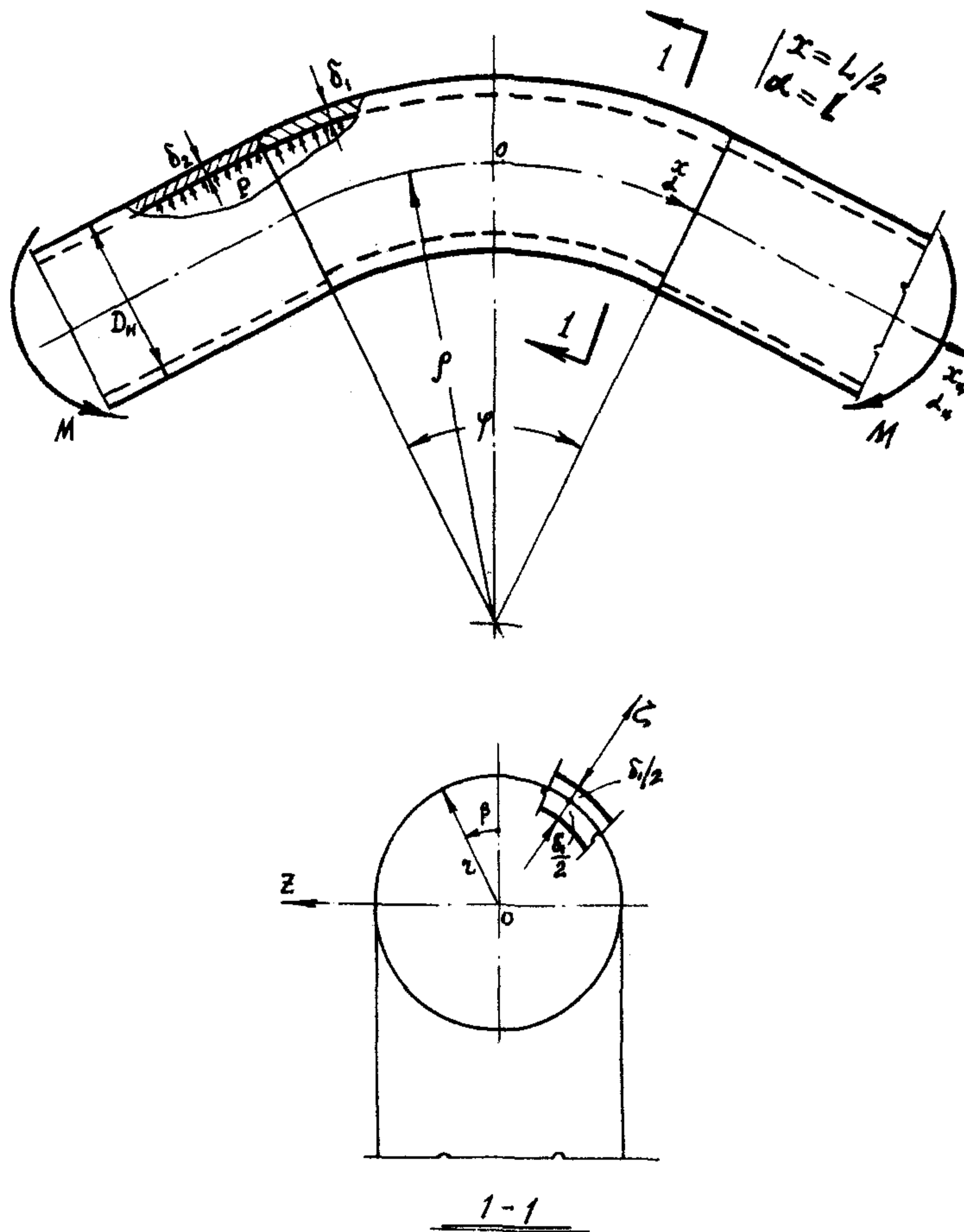


Схема криволинейного участка трубопровода

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 $\alpha = x/z$, β и в натуральной координате ξ , отсчитываемой по нормали от срединной поверхности трубы. Компоненты перемещения произвольной точки срединной поверхности по направлениям координат α , β , ξ обозначаются соответственно через U , V , W .

Прямая труба имеет координаты $\alpha_{\xi} = x_{\xi}/z$, β , ξ .

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

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

Основные принципы решения задачи

2.8. Прямые участки к кривой трубе прямолинейные участки трубопровода ограничивают деформацию контуров торцевых сечений кривой трубы и обуславливают 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:

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

где N_1, S, \dots, Q_2 - погонные усилия и моменты, действующие на элемент оболочки;

$K_2^* = \frac{1}{z} + \mathcal{K}_2$ - кривизна деформированной средней линии сечения оболочки (\mathcal{K}_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

$$\frac{\partial^2 N_1}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left(1 + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) M_2 + \frac{z}{\rho} \left[\frac{\partial^2 N_1}{\partial \beta^2} \cos \beta - \right. \quad (2)$$

$$\left. - 3 \frac{\partial N_1}{\partial \beta} \sin \beta - 2 N_1 \cos \beta \right] + z^2 P \frac{\partial^2 \mathcal{K}_2}{\partial \beta^2} = 0.$$

N_1 и M_2 представляются в виде:

$$N_1 = \frac{E \delta_1}{1-\mu^2} \varepsilon_1; \quad M_2 = -D \mathcal{K}_2, \quad (3)$$

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 \mathcal{K}_2 выражаются через приращения кривизны оси кривой трубы и перемещения в виде

$$\varepsilon_1 = \mathcal{K}_0 z \cos \beta + \mathcal{K}_w z \cos \beta + \frac{1}{z} \frac{\partial U}{\partial \alpha} - \frac{1}{\rho} V \sin \beta + \frac{1}{\rho} W \cos \beta; \quad \mathcal{K}_2 = -\frac{1}{z^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} + W \right), \quad (4)$$

где $\mathcal{K}_0 = M/EJ$ - постоянное по длине трубы приращение кривизны ее оси, определяемое на основании балочной теории сопротивления материалов;

\mathcal{K}_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

$$W = \mathcal{K}_0 z^2 \sum_{n=2}^{\infty} f_n \cos n \beta, \quad (5)$$

где $f_n = f_n(\alpha)$.

2.14. Используя геометрические соотношения полубезмоментной теории оболочек, остальные перемещения и приращение кривизны \mathcal{K}_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

$$\mathcal{K}_w = -\frac{3}{4} \frac{\mathcal{K}_0 z}{\rho} f_2. \quad (6)$$

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 $\psi_1 = \delta_1/z$

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

где

$$a_{n,m} = F(n, \lambda, \psi, \rho);$$

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

$\lambda = \rho \delta_1 / z^2$ - 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:

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

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

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

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

где $A_{ni} = F(\beta_i, a_{n,m})$ - 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.

2.18. Корни β_i находятся из характеристического уравнения

$$\beta^3 + g_1 \beta^2 + g_2 \beta + g_3 = 0, \quad (\text{II})$$

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

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

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

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

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

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

2.21. Остальные параметры перемещения выражаются аналогичным образом:

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

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

2.22. Вид уравнения (12) 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 [1] для цилиндрических оболочек, нагруженных нормальной неосесимметричной нагрузкой. Уравнению (12) в координатах α соответствует разрешающее дифференциальное уравнение 8-го порядка, записываемое через функцию перемещений φ_K :

$$\frac{\psi_1^2}{12(1-\mu^3)} \frac{d^8 \varphi_K}{d\alpha^8} + \frac{d^4 \varphi_K}{d\alpha^4} + 100 \psi_1^2 |\beta_2| \varphi_K = 100 \psi_1^2 |\beta_2| \frac{A}{\sigma_{22}^*} \quad (15)$$

2.24. Все компоненты перемещений, усилий и моментов выражаются через функцию φ_K на основании дифференциальных зависимостей этих компонентов от разрешающей функции φ , связанной с φ_K соотношением $\varphi = \frac{1}{16} \alpha_0 z^2 \varphi_K \cos 2\beta$

2.25. Решение уравнения (15) записывается в четных функциях А.Н.Крылова в виде

$$\varphi_K = [1 + C_1 K_0(t_1, \alpha) + C_2 K_2(t_1, \alpha) + C_3 K_0(u_1, \alpha) + C_4 K_2(u_1, \alpha)] \varphi_K^*, \quad (16)$$

где C_i - произвольные постоянные;

t_1, u_1 - множители "малых" и "больших" корней характеристического уравнения, соответствующего уравнению (15),

Множитель t_1 связан с $\varphi_K^* = f_2^*$ отношением

$$t_1 = \sqrt{10 \psi_1} \beta_2$$

2.26. Компоненты перемещений, усилий и моментов выражаются на основании выражения (16) 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 φ_4 :

$$\frac{\psi_2^2}{12(1-\mu^3)} \frac{d^8 \varphi_4}{d\alpha_4^8} + \frac{d^4 \varphi_4}{d\alpha_4^4} + 100 \psi_2^2 / \beta_{24} \varphi_4 = 0, \quad (17)$$

где $\psi_2 = \delta_2 / z$

2.28. Решение уравнения (17) ищется в затухающих функциях

$$\varphi_4 = C_5 e^{-t_2 \alpha_4} \cos t_2 \alpha_4 + C_6 e^{-t_2 \alpha_4} \sin t_2 \alpha_4 + C_7 e^{-u_2 \alpha_4} \cos u_2 \alpha_4 + C_8 e^{-u_2 \alpha_4} \sin u_2 \alpha_4, \quad (18)$$

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 (17).

2.29. Все компоненты перемещений, усилий и моментов в цилиндрической оболочке записываются на основании выражения (18) через затухающие функции и неизвестные C_i .

2.30. Произвольные постоянные $C_i (i=1, 2, 3, \dots, 8)$ определяются из условий сопряжения торцов криво- и прямолинейных труб для координат $\alpha = l$ и $\alpha_4 = 0$:

$$\begin{aligned} u(l) &= u_4(0); \\ v(l) &= v_4(0); \\ w(l) &= w_4(0); \\ v_7(l) &= v_{74}(0); \\ N_7(l) &= N_{74}(0); \\ S(l) &= S_4(0); \\ M_7(l) &= M_{74}(0); \\ Q_7(l) &= Q_{74}(0). \end{aligned} \quad (19)$$

2.31. Используя выражения (I6) и (I8), условия (I9) приводятся к системе восьми алгебраических уравнений с восемью неизвестными C_i :

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

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:

$$x_0 z^2 f_2(\alpha) = \frac{1}{2} [|W_0(\alpha)| + 2|V_0(\alpha)|], \quad (20)$$

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 (I3), (I4). Для продольных деформаций используется формула, следующая из зависимости (4):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^* = \frac{\varepsilon_1}{x_0 z} = & 1 - \frac{3}{4} \frac{z}{\rho} f_2(\alpha) \cos \beta + \\ & + \frac{1}{2} \frac{z}{\rho} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} f_n(\alpha) [(n+1) \cos(n-1)\beta + (n-1) \cos(n+1)\beta] - \\ & - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \frac{d^2 f_n(\alpha)}{d\alpha^2} \cos \beta. \end{aligned} \quad (21)$$

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

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

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

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

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 $t_1^* \geq \frac{\pi}{2}$, труба считается длинной, неизвестные $C_1^* = C_2^* = 0$ и все остальные 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: $\alpha = 0; \beta = \pm \frac{\pi}{2}; \xi = \pm \delta_1/2$:

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

Область применения методики

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

но сопряженных с прямолинейными участками трубопроводов при помощи сварки.

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

$$\lambda \geq 0,05. \quad (24)$$

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА НА ЭВМ

Описание программы

3.1. 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 6.1.

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_H - 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

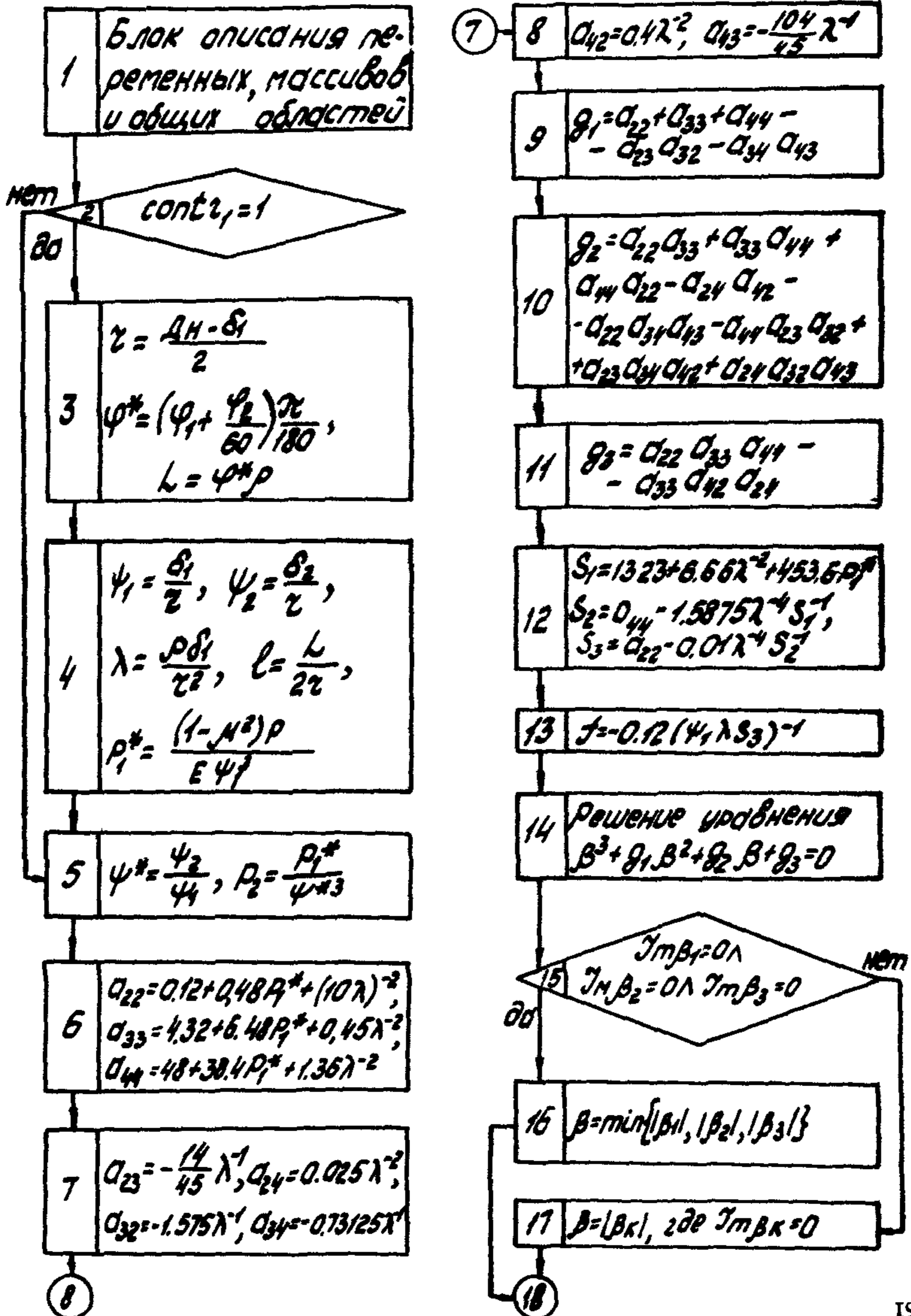
3.11. Для контроля заданных исходных данных и правильности их перфорации распечатывается вся исходная информация по заданному варианту.

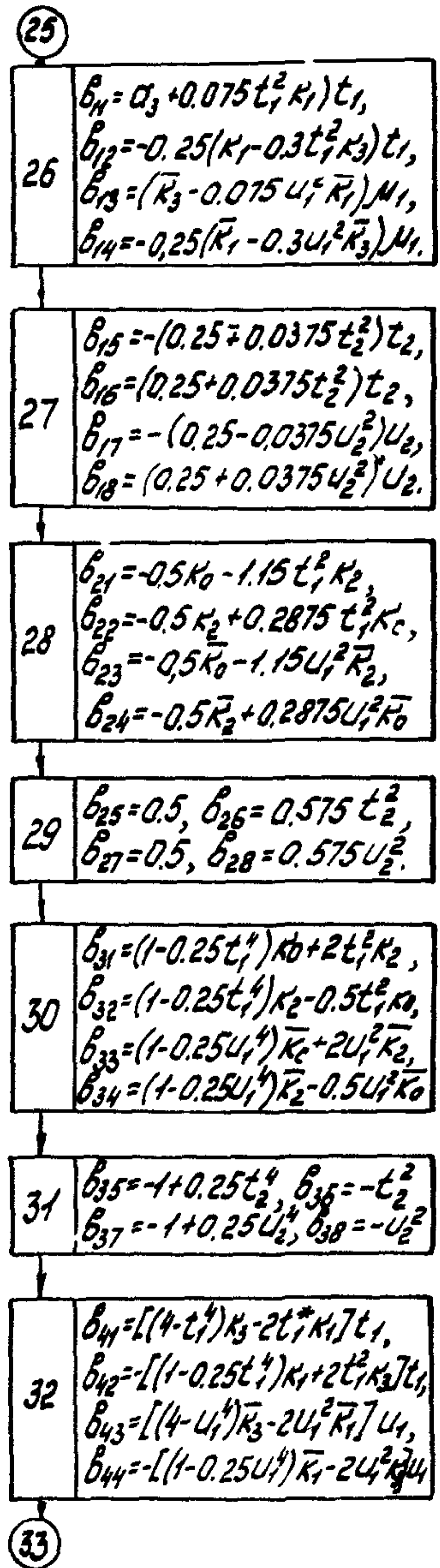
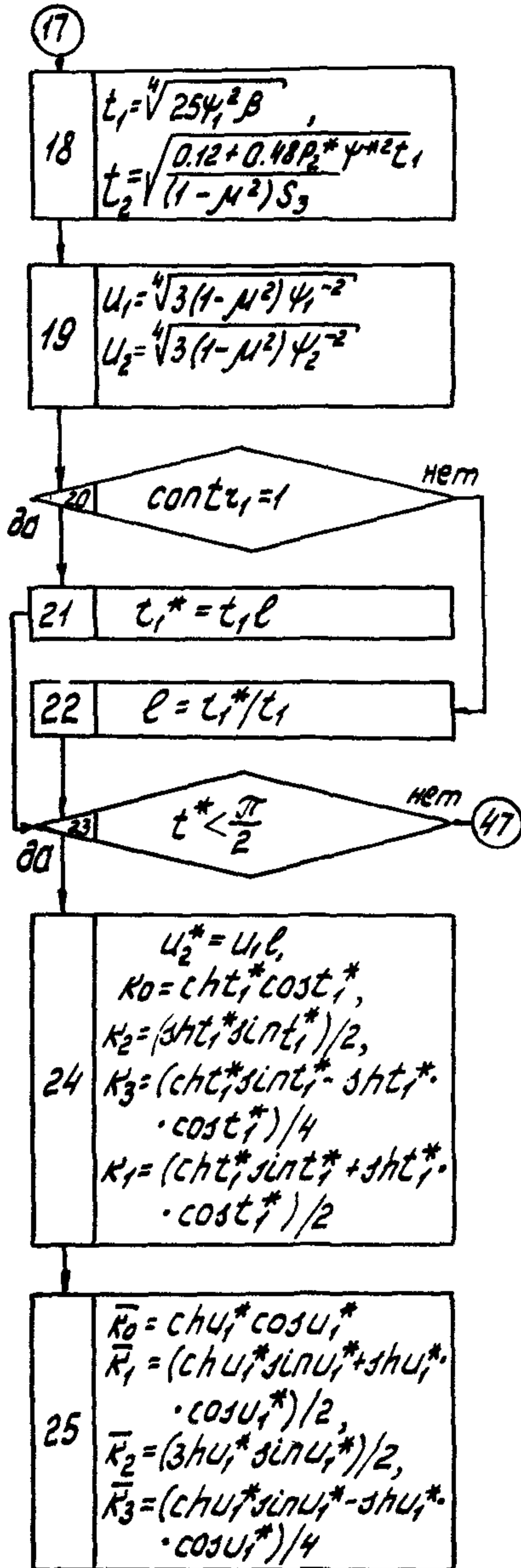
3.12. Далее следуют результаты вычислений: коэффициент понижения жесткости; коэффициент интенсификации продольных напряжений; геометрический параметр кривой трубы; параметр внутреннего давления; параметр радиального перемещения; малый и большой корни t_1 и U_1 (блоки 18, 19 блок-схемы); параметр длины 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 $\beta = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\beta = 180^\circ$.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

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

(процедура КРОМЛН)





32

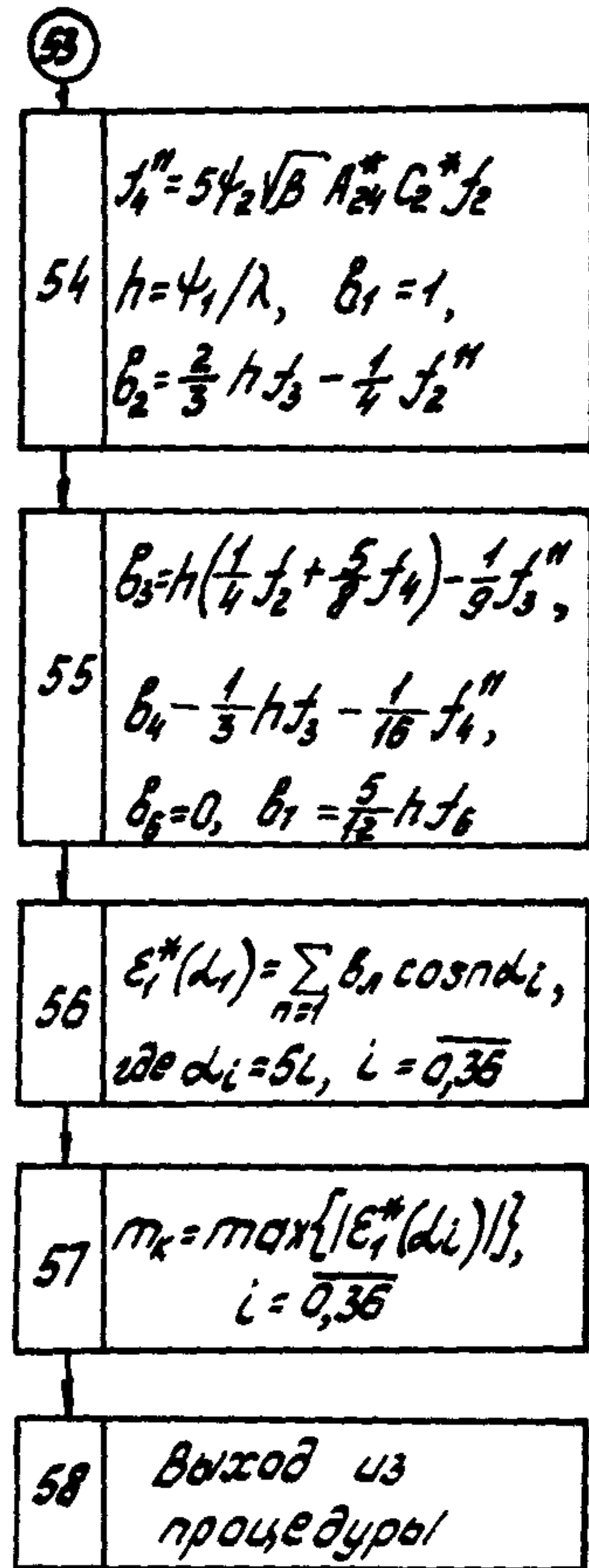
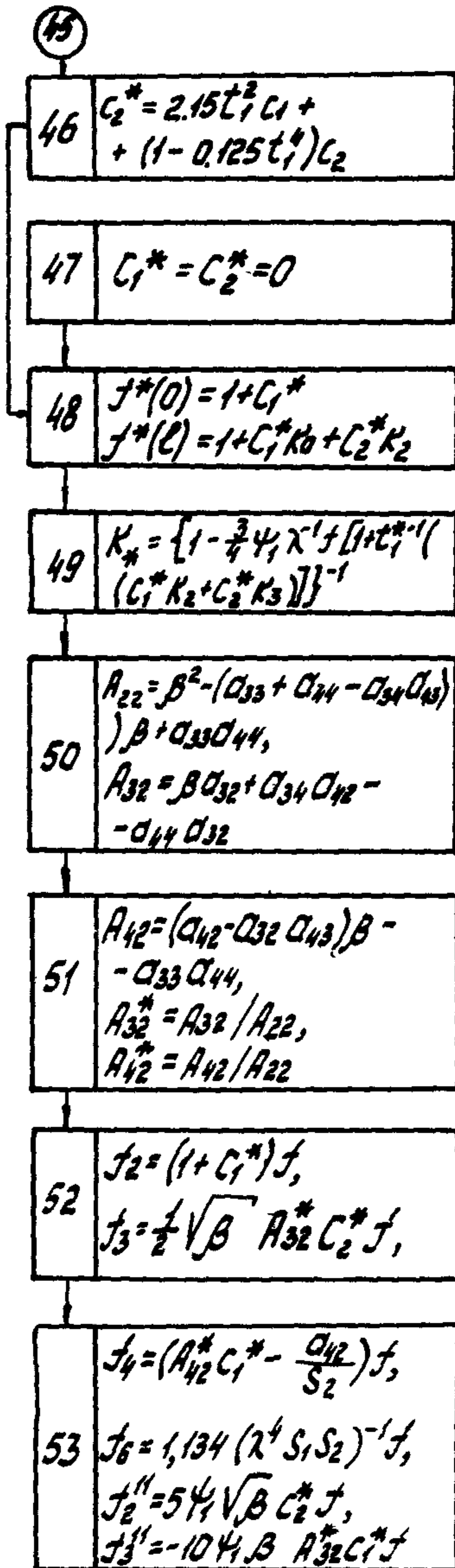
33	$b_{45} = -[1 + (1 - 0.25t_2^2)t_2^2]t_2,$ $b_{46} = [1 - (1 + 0.25t_2^2)t_2^2]t_2,$ $b_{47} = -[1 + (1 - 0.25U_2^2)U_2^2]U_2,$ $b_{48} = [1 - (1 + 0.25U_2^2)U_2^2]U_2.$
34	$b_{51} = t_1^2 K_2, \quad b_{52} = -0.25t_1^2 K_0,$ $b_{53} = U_1^2 K_2, \quad b_{54} = -0.25U_1^2 K_0,$ $b_{55} = 0, \quad b_{56} = -0.5\psi^* t_2^2,$ $b_{57} = 0, \quad b_{58} = -0.5\psi^* U_2^2.$
35	$b_{61} = -0.5t_1^3 K_1, \quad b_{62} = -0.5t_1^3 K_3,$ $b_{63} = -0.5U_1^3 K_1, \quad b_{64} = -0.5U_1^3 K_3,$ $b_{65} = -0.25\psi^* t_2^3,$ $b_{66} = -0.25\psi^* U_2^3,$ $b_{67} = -0.25\psi^* U_2^3,$ $b_{68} = -0.25\psi^* U_2^3.$
36	$b_{71} = (-0.9 + 2.225t_1^4)K_0 +$ $+ (-5.8t_1^2 + t_1^6)K_2,$ $b_{72} = (-0.9 + 2.225t_1^4)K_0 +$ $+ (1.45t_1^2 - 0.25t_1^6)K_0$
37	$b_{73} = (-0.9 + 2.225U_1^4)\bar{K}_0 +$ $+ (-5.8U_1^2 + U_1^6)\bar{K}_2,$ $b_{74} = (-0.9 + 2.225U_1^4)\bar{K}_2 +$ $+ (1.45U_1^2 - 0.25U_1^6)\bar{K}_0$
38	$b_{75} = (0.9 - 2.225t_2^4)\psi^* K_3,$ $b_{76} = (2.9 - 0.5t_2^4)t_2^2 \psi^* K_3,$ $b_{77} = (0.9 - 2.225U_2^4)\psi^* K_3,$ $b_{78} = (2.9 - 0.5U_2^4)U_2^2 \psi^* K_3.$

39

38

39	$b_{81} = (-14.8 + 11.7t_1^4)t_1 K_3 +$ $+ (11.4 - t_1^4)t_1^3 K_1,$ $b_{82} = (3.7 - 2.925t_1^4)t_1 K_1 +$ $+ (11.4 - t_1^4)t_1^3 K_3$
40	$b_{83} = (-14.8 + 11.7U_1^4)U_1 \bar{K}_3 +$ $+ (11.4 - U_1^4)U_1^3 \bar{K}_1,$ $b_{84} = (3.7 - 2.925U_1^4)U_1 \bar{K}_1 +$ $+ (11.4 - U_1^4)U_1^3 \bar{K}_3.$
41	$b_{85} = \{3.7 + [5.7 - (2.925 + 0.5t_2^2)$ $\cdot t_2^2]t_2^2\}t_2 \psi^* K_3$ $b_{86} = -\{3.7 - [5.7 + (2.925 -$ $0.5t_2^2)t_2^2]t_2^2\}t_2 \psi^* K_3$
42	$b_{87} = \{3.7 + [5.7 - (2.925 + 0.5U_2^2)$ $\cdot U_2^2]U_2^2\}U_2 \psi^* K_3$ $b_{88} = -\{3.7 - [5.7 + (2.925 -$ $0.5U_2^2)U_2^2]U_2^2\}U_2 \psi^* K_3$
43	$q_1 = q_4 = q_5 = q_6 = q_8 = 0,$ $q_2 = 0.5, \quad q_3 = -1, \quad q_7 = 0.9$
44	<p style="text-align: center;">Решение системы уравнений</p> $\sum_{j=1}^8 b_{ij} c_j = q_i, \quad i = \bar{1}, 8$
45	$c_1^* = (1 - 0.125t_1^4)c_1 -$ $- 0.5375t_1^2 c_2$

46



54

КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА

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

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
	VAR																																						
1	i																																						
	DN			δ_1			δ_2			P			ψ_1			ψ_2			M			E			P														
2	142			34			25			21			24			3			21			7.5																	
3																																							
4																																							
5																																							
6																																							
7																																							
8																																							
9																																							
10																																							
11																																							
12																																							
13																																							
14																																							
15																																							
16																																							
17																																							
18																																							
19																																							
20																																							
21																																							
22																																							
23																																							
24																																							
25																																							
26																																							
27																																							
28																																							
29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			

ЛИТЕРАТУРА

1. 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

1. Общие положения	3
2. Методика определения гибкости и напряженного состояния криволинейного участка трубопровода	3
3. Реализация метода на ЭВМ	14
Приложения	17
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 60x84/16
Печ.л. 1,5	Уч.-изд.л. 1,1	Бум.л. 0,75
Тираж 350 экз.	Цена 11 коп.	Заказ 78

Ротапринт ВНИИСТА