МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНИИСПТнефть

УКАЗАНИЯ ПО МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПЕРЕСЕЧЕННОМ РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ

РД 39-30-168-79

Уфа 1979

gost.e-ecolog.ru

Министерство нефтяной промышленности

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ,
ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ
"ВНИИСПТнефть"

УТВЕРЖДЕНЫ

первым заместителем Министра
В.И.Кременным
17 апреля 1979г.

У К А З А Н И Я
ПО МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПЕРЕСЕЧЕННОМ РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ

РД 39-30-168-79

1978

Указания разработаны лабораторией прочности отдела технической эксплуатации магистральных трубопроводов института ВНИИСПТнефть.

В настоящей редакции Указаний учтены замечания и предложения институтов ВНИИСТ, Гипротрубопровод, Гипротюменнефтегаз и др. отраслевых институтов, а также ведущих предприятий Главтранснефти Миннефтепрома.

Указания являются руководящим документом для организаций, осуществляющих проектирование, строительство и эксплуатацию линейной части магистральных трубопроводов.

Указания разработаны кандидатами технических наук Х.А. Азметовым (отв. исполнитель), А.Г. Гумеровым, Н.Ш. Тимербаевым при участии конструктора Г.И. Лошадкиной и инженера Р.А. Фаткуллиной.

Замечания и предложения просим направлять по адресу: 450055, г. Уфа-55, проспект Октября, 144/3, ВНИИСПТнефть, ОТЭИТ.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Указания по методике расчета и выбору конструкции подземных трубопроводов на пересеченном рельефе местности РД 39-30-168-79

Приказом Министерства нефтяной промышленности № 287 от 29 мая 1979 года

Срок введения с I.IO.79г.
Срок действия до I.IO.84г.
Вводятся впервые

Настоящие указания распространяются на подземные трубопроводы и устанавливают порядок расчета на прочность, устойчивость стенки трубы и общую устойчивость в продольном направлении криволинейных участков трубопроводов, конструктивно выполненных сварными, крутогнутыми и холодногнутыми коленами, прямыми вставками и свободным изгибом. Кроме расчетной части даны оптимальные по уровню напряжений конструкции подземных трубопроводов на пересеченном рельефе местности.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие Указания распространяются на линейную часть подземных магистральных трубопроводов для транспортирования нефти, нефтепродуктов и газов.

I.2. Указания разработаны в развитие главы СНиП II-45-75

"Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования".

1.3. Указания позволяют выполнить расчёт на прочность, устойчивость стенки трубы и общую устойчивость подземных трубопроводов в продольном направлении на поворотах в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности.

В Указаниях даны оптимальные по уровню напряжений конструкции поворотов трубопроводов.

1.4. Указания составлены для подземных трубопроводов, проложенных в глинистых, песчаных и т. п. грунтах и не распространяются на трубопроводы, прокладываемые на болотах, в торфяных и вечномёрзлых грунтах.

1.5. При расчёте и конструировании подземных трубопроводов, сооружаемых на участках, где возможны просадки и пучения грунта, необходимо учитывать связанные с этим дополнительные воздействия.

1.6. Подземные трубопроводы укладываются в траншею с учётом обеспечения равномерного прилегания трубопроводов к грунтовому основанию.

1.7. Повороты подземных трубопроводов конструктивно выполняются сварными, крутозагнутыми и холодногнутыми коленами, прямыми вставками и свободным изгибом трубопровода (рис.П.5.1).

1.8. Радиус кривизны сварных и крутозагнутых колен на линейной части магистральных трубопроводов назначается с учётом обеспечения возможности пропуска очистных и разделительных устройств и для сварных и крутозагнутых колен составляет $R > 5D_н$, где $D_н$ – наружный диаметр трубопровода.

1.9. Радиус кривизны холодногнутых колен составляет $R = (30 \div 35)D_н$. В табл. 1 приведены значения радиусов кривизны холодногнутых колен для некоторых диаметров трубопроводов.

1.10. Радиус кривизны упругонскривлённых участков трубопроводов должен быть таким, чтобы продольное усилие и суммарные напря-

Таблица I

Радиусы кривизны холодногнутых колен

Наружный диаметр трубопровода, мм	529	720	820	1020	1220	1420
Средний радиус кривизны, м	20	25	30	40	60	60

жения в стенке труб отизгиба, внутреннего давления и температурного перепада не превышали заданного предела, определяемого в соответствии с п.3.I и п.3.5.

I.II.В действующих магистральных трубопроводах на поворотах трассы от действий продольных сжимающих усилий происходят продольные и поперечные перемещения, в ряде случаев вызывающие разрушение грунтовой засыпки и представляющие опасность с точки зрения прочности трубопровода.

Высокими значениями продольных сжимающих усилий характеризуются трубопроводы для "горячей" перекачки и трубопроводы, сооружаемые в условиях отрицательных температур.

I.I2.Наибольшие перемещения трубопровода происходят на поворотах в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности.

2. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.I. Основными нагрузками и воздействиями для линейной части действующих магистральных трубопроводов являются - внутреннее давление, давление грунта, собственный вес трубы и продукта, изменение температуры стенки трубы, упругий изгиб трубы, просадки и пучения грунта, давление оползающих грунтов.

2.2. Определение нагрузок и воздействий производится в соответствии с главами СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования" и "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования",

2.3. В стенке трубы от внутреннего давления возникают растягивающие кольцевые напряжения

$$\sigma^{н}_{кц} = \frac{pD_{вн}}{2\delta}, \qquad (1)$$

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

$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, см ;

δ – толщина стенки трубы, см ;

2.4. Внутреннее давление в трубопроводе на прямолинейных участках трассы, не имеющих линейной арматуры, вызывает в стенке трубы в продольном направлении растягивающие напряжения, равные

$$\sigma_{пр} = 0{,}15\ \frac{pD_{вн}}{\delta} \qquad (2)$$

При наличии заглушек, задвижек и поворотов продольные растягивающие напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{пр} = 0{,}25\ \frac{pD_{вн}}{\delta}. \qquad (3)$$

2.5. При изгибе трубопровода внутреннее давление вызывает появление поперечного распределенного усилия. Таким образом, влияние внутреннего давления на изгиб эквивалентно сжатию в осевом направлении усилием, равным

$$N_{др} = (1 - 2\mu)\,pF_{св}, \qquad (4)$$

где $F_{св}$ – площадь сечения трубы в свету, см^2, определяемой по формуле

$$F_{св} = \frac{\pi D^2_{вн}}{4} \qquad (5)$$

2.6. Изменение температуры стенки трубы при отсутствии перемещений трубопровода вызывает появление продольного усилия, равного

$$N_{\Delta t} = \alpha E F \Delta t, \qquad (6)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала труб (для стали $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$), 1/град;

E – модуль упругости материала труб (для стали

$E = 2{,}1 \cdot 10^6$), кгс/см^2;

F – площадь стенки поперечного сечения трубы, см^2;

Δt – расчетный температурный перепад, т.е. разность между температурой металла труб при укладке и в процессе эксплуатации, °С.

2.7. Изгиб действующего подземного трубопровода производится фиктивным усилием

$$N_\phi = \alpha E F \Delta t + (1 - 2\mu) P F_{св} . \qquad (7)$$

2.8. При упругом (свободном) изгибе трубопровода в процессе укладки его в проектное положение возникают продольные напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma^{н}_{пр.р} = \pm \frac{E D_н}{2\rho} , \qquad (8)$$

где ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см;

$D_н$ – наружный диаметр трубопровода, см.

2.9. Вес транспортируемой нефти или нефтепродукта в 1 см трубопровода $q_{прод}$, кгс/см, следует определять по формуле

$$q_{прод} = \gamma_н \frac{\pi D^2_{вн}}{4} , \qquad (9)$$

где $\gamma_н$ – объёмный вес транспортируемой нефти или нефтепродукта, кгс/см^3.

2.10. При поперечных перемещениях подземный трубопровод оказывает силовое воздействие на грунт и испытывает с его стороны реактивное сопротивление.

Сопротивление поперечным вертикальным перемещениям трубопровода определяется по формуле

$$q = q_{тр} + q_{доп} + 0{,}8 \left[\gamma_{ср} D_н (h + 0{,}11 D_н) + \gamma_{ср} (h + 0{,}5 D_н)^2 \operatorname{tg}(0{,}7\varphi_{ср}) + \frac{C_{ср}(h + 0{,}5 D_н)}{\cos(0{,}7\varphi_{ср})} \right], \qquad (10)$$

где $q_{тр}$ – вес 1 см трубопровода с продуктом, кгс/см;

$q_{доп}$ – вес грузов или удерживающей способность анкерных устройств, отнесённая к одному погонному сантиметру трубопровода, кгс/см;

$\gamma_{гр}$ – расчётный объёмный вес грунта засыпки над трубопроводом, кгс/см^3;

$\varphi_{гр}$ – расчётный угол внутреннего трения грунта, град. ;

C – расчётное сцепление грунта, кгс/см^2;

h – глубина заложения трубопровода до верха трубы, см.

2.II.Сопротивление продольным перемещениям трубопровода определяется по формуле

$$P=0,8[(q_{тр}+q_{доп})tg\varphi_{гр}+2\gamma_{гр}C_н\pi D_н^2 tg\varphi_{гр}+0,6\pi D_н C_{гр}], \qquad (II)$$

где $C_н$ – коэффициент, учитывающий образование свода естественного равновесия, определяемый в зависимости от относительной глубины заложения трубопровода по графику на рис.П.5.2.

В табл. 2 даны характеристики грунтов.

Таблица 2

Некоторые характеристики грунтов

Виды грунтов	$\gamma_{гр}$, кгс/см^3	$\varphi_{гр}$, град.	$C_{гр}$, кгс/см^2
Песчаные	0,0012 ÷ 0,0019	20 ÷ 38	0 ÷ 0,14
Глинистые	0,0012 ÷ 0,0019	15 ÷ 22	0,02 ÷ 0,40

3. ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАЦИЙ, УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНКИ ТРУБЫ И ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБОПРОВОДА В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

3.I. В качестве предельного состояния подземного трубопровода на углах поворота принимается условие

$$\sigma^{н}_{пр} \leq \psi_3 \frac{C}{K_н} R^{н}_{2}, \qquad (I2)$$

где $\sigma^{н}_{пр}$ - максимальные суммарные продольные напряжения, определяемые в соответствии с п.4.I и п.6.I ;

ψ_3 - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях $(\sigma^{н}_{пр} \geq 0)$, принимаемый равным единице, при сжимающих $(\sigma^{н}_{пр} < 0)$, определяемый по формуле

$$\psi_3 = \sqrt{1-0,75 \cdot \left(\frac{\sigma^{н}_{кц}}{\frac{C}{K_н} R^{н}_{2}}\right)^2} - 0,5 \frac{\sigma^{н}_{кц}}{\frac{C}{K_н} \cdot R^{н}_{2}}, \qquad (I3)$$

$R^{н}_{2}$ - нормативное сопротивление металла труб, кгс/см^2, принимаемое равным минимальному значению предела текучести $\sigma_т$ по государственным стандартам и техническим условиям на трубы;,

C - коэффициент, принимаемый равным I для трубопроводов III и IУ категорий, 0,85 для I и II категорий и 0,65 для категории В. Категории магистральных трубопроводов принимаются по табл. 3 ;

$K_н$ - коэффициент надежности, принимаемый по табл. 4.

3.2. Практика эксплуатации магистральных трубопроводов показывает, что тонкостенные трубы теряют устойчивость при изгибе образованием вмятин в сжатой зоне. По этому, в зоне, где $\sigma^{н}_{пр} < 0$ следует производить проверку устойчивости трубы.

3.3. Проверка устойчивости стенки трубы производится на условия

$$\sigma^{н}_{пр} \leq m \sigma_{кр}, \qquad (I4)$$

где $\sigma_{кр}$ - критическое напряжение, кгс/см^2, при котором происходит выпучивание стенки трубы, определяемое по формуле

Таблица 3

Категории магистральных трубопроводов

Назначение магистрального трубопровода	Категория магистрального трубопровода при подземной прокладке
Для транспортирования природного газа:	
а) диаметром менее 1200 мм ;	IУ
б) диаметром 1200 мм и более	Ш
Для транспортирования нефти или нефтепродуктов :	
а) диаметром менее 700 мм ;	IУ
б) диаметром 700 мм и более	Ш

Таблица 4

Значения коэффициента надёжности

Условный диаметр трубопровода, мм	Значение коэффициента надёжности, $K_н$			
	Для газопроводов в зависимости от внутреннего давления P, кгс/см^2			Для нефтепроводов и нефтепродуктопроводов
	$P \leq 55$	$55 \leq P \leq 75$	$75 \leq P \leq 100$	
500 и менее	1,0	1,0	1,0	1,0
600 ÷ 1000	1,05	1,05	1,05	1,0
1200	1,05	1,05	1,1	1,05
1400	1,05	1,1	1,15	1,1

$$\sigma_{кр} = \left(\frac{8{,}26\delta}{D_н - \delta} + 0{,}85\right) R_2^н , \qquad (15)$$

m – коэффициент условия работы трубопровода, принимаемый равным 0,9 для трубопроводов Ш и IУ категорий, 0,75 для I и П категорий и 0,6 для категорий В.

5.4. Проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении производится на условия

$$N_0 \leq m N_{0кр} , \qquad (16)$$

где $N_{кр}$ – продольное критическое усилие, кгс , при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода, определяемое согласно п.4.16 и п.6.14.

3.5. На криволинейных участках трубопроводов и при значениях продольного сжимающего усилия меньше критических происходят продольные и поперечные перемещения трубопровода. Толщина слоя грунта над трубопроводом после перемещений должна быть не менее предусмотренной СНиП II-45-75. Исходя из этого, при указанных условиях глубина заложения трубопровода до верха трубы на изогнутом участке определяется по формуле

$$h = h'' + V, \qquad (17)$$

где V – наибольшие вертикальные поперечные перемещения трубопровода, м , определяемые в соответствии с п.4.6 и п.6.5 ;

h'' – глубина заложения трубопровода по СНиП II-45-75, принимаемая не менее :

при диаметре менее 1000 мм – 0,8 м ;

при диаметре 1000 мм и более – 1 м ;

в песчаных барханах, считая от нижних отметок межбарханных оснований – 1 м ;

в скальных грунтах при отсутствии проезда автотранспорта и сельскохозяйственных машин – 0,6 м.

Изогнутый участок трубопровода – участок , где происходят поперечные перемещения трубопровода под действием продольных сжимающих усилий. Длина изогнутого участка трубопровода определяется в соответствии с п.4.7 и п.6.6.

3.6. Проверка поперечного перемещения трубопровода в вертикальной плоскости производится из условия

$$V \leq [V], \qquad (18)$$

где $[V]$ – предельно-допускаемое, по эксплуатационным и техноло-

гическим условиям, поперечное перемещение трубопровода, см.

Величина $[V]$ при заданном значении h определяется по формуле

$$[V] = m\,(h - h^{н}). \qquad (19)$$

3.7. В качестве предельного состояния для прямолинейных участков подземных трубопроводов принимается условие

$$\sigma_{пр.н} \leq \psi_2 \frac{R_1^{н} m}{K_1 K_н}, \qquad (20)$$

где $\sigma_{пр.н}$ – продольное осевое напряжение от расчётных нагрузок и воздействий, кгс/см^2, определяемое согласно п.3.8 ;

$R_1^{н}$ – нормативное сопротивление металла труб, кгс/см^2, принимаемое равным минимальному значению временного сопротивления $\sigma_{вр}$ по государственным стандартам и техническим условиям на трубы ;

K_1 – коэффициент безопасности по материалу, определяемый в соответствии со СНиП II-45-75 и принимаемый значения на интервале I,34 ÷ I,55 ;

ψ_2 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб, при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{пр.н} \geq 0$) принимается равным единице, при сжимающих ($\sigma_{пр.н} < 0$) определяется по формуле

$$\psi_2 = \sqrt{1 - 0{,}75 \left(\sigma_{кц} \frac{K_1 K_н}{R_1^{н} m}\right)^2} - 0{,}5\,\sigma_{кц} \frac{K_1 K_н}{R_1^{н} m}, \qquad (21)$$

где $\sigma_{кц}$ – кольцевые напряжения от расчётного внутреннего давления, кгс/см^2, определяемые по формуле

$$\sigma_{кц} = \frac{n P D_{вн}}{2\delta}, \qquad (22)$$

где n – коэффициент перегрузки рабочего (нормативного) давления, принимаемый в соответствии со СНиП II-45-75.

3.8. Продольные осевые напряжения $\sigma_{пр.N}$ от воздействия температуры и внутреннего давления определяются по формуле

$$\sigma_{пр.N} = -\alpha E \Delta t + 0{,}15 \frac{nD_{вн}}{\delta}. \qquad (23)$$

4. РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДА НА ПОВОРОТАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРНЫМИ, КРУТОЗАГНУТЫМИ КОЛЕНАМИ И ПРЯМЫМИ ВСТАВКАМИ

4.1. На "выпуклом" рельефе местности под действием продольных сжимающих усилий происходят вертикальные поперечные и продольные перемещения трубопровода в сторону угла поворота (рис. П.5.1).

4.2. Максимальные поперечные перемещения и продольные напряжения при выполнении поворота сварными или гнутыми коленами (рис. П.5.1.а, рис. П.5.1.б) возникают в середине изогнутого участка. Если поворот выполнен двумя коленами с прямой вставкой между ними (рис. П.5.1.в, рис. П.5.1.г), наибольшие перемещения будут в середине прямой вставки и в сечениях сопряжения прямой вставки с коленами.

4.3. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе при выполнении поворота двумя коленами с прямой вставкой между ними определяются по формуле

$$\sigma^{N}_{пр.0(1)} = \frac{N}{F} \pm \frac{M_{0(1)}}{W}, \qquad (24)$$

где $\sigma^{N}_{пр.0}$ – продольные напряжения в середине прямой вставки, кгс/см^2;

$\sigma^{N}_{пр.1}$ – продольные напряжения в сечениях сопряжения прямой вставки с коленами, кгс/см^2;

N – продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, кгс , определяемое в соответствии с п.4.5.

M_0 – изгибающий момент в середине прямой вставки, кгс·см, определяемый в соответствии с п.4.4 ;

M_1 – изгибающий момент в сечениях сопряжения прямой вставки с коленами, кгс·см, определяемый в соответствии с п.4.4;

W – момент сопротивления поперечного сечения трубопровода, $см^3$.

4.4. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле

$$M_{q1} = \omega_{q1} \cdot \sqrt[3]{q(EJtg\varphi)^2}, \qquad (25)$$

где J – момент инерции сечения трубопровода, $см^4$;

φ – половина угла поворота трубопровода, град. ;

ω_{q1} – безразмерный параметр изгибающего момента, определяемый в соответствии с п.4.9 и п.4.10.

4.5. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется по формуле

$$N = \frac{p\pi D_{вн}^2}{4} - \sqrt[3]{EJ\left(\frac{\kappa q}{tg\varphi}\right)^2}, \qquad (26)$$

где κ – безразмерный параметр сжимающего усилия, определяемый в соответствии с п.4.11 и п.4.14.

4.6. Максимальные поперечные перемещения (прогиб) трубопровода определяются по формуле

$$v_{q1} = \tilde{v}_{q1} \sqrt[3]{\frac{EJ}{q} \cdot tg^4\varphi}, \qquad (27)$$

где $\tilde{v}_{q1}$ – безразмерный параметр прогиба, определяемый в соответствии с п.4.12 и п.4.13.

4.7. Длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота определяется по формуле

$$l = a \sqrt[3]{\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{EJ}{q} tg\varphi}, \qquad (28)$$

где a – безразмерный параметр изгиба, определяемый в соответствии с п.4.8.

Параметр a может иметь значения в интервале $0 < a < 4{,}49$.

4.8. Безразмерный параметр изгиба a определяется по графикам на рис.П.5.8 ÷ рис.П.5.20 или решением уравнения

$$\beta = 0{,}18515 + 0{,}79952a - 0{,}21052c_0 - 0{,}14653a^2 + 0{,}42639c_0a + 0{,}23451c_0^2 + z(0{,}53221 - 1{,}40940a + 2{,}93494c_0 + 0{,}58275a^2 - 1{,}20971c_0a - 0{,}38304c_0^2) \qquad (29)$$

где β – безразмерный параметр начального сжимающего усилия, определяемый по формуле

$$\beta = N_0 \sqrt[3]{\frac{1}{EJ}\left(\frac{tg\varphi}{q}\right)^2}\,; \qquad (30)$$

$$z = \sqrt{\frac{2\rho}{q}\cdot\frac{F}{J}tg^3\varphi}\,\sqrt[3]{\frac{EJ}{q}tg\varphi}\,. \qquad (31)$$

В тех случаях, когда отсутствует график с найденным по формуле (31) значением z, необходимо прибегать к линейной интерполяции. Если найденное значение z лежит между значениями z_1 и z_2, для которых имеются графики и которым соответствуют значения a_1 и a_2 (при известных β и c_0), то принимают

$$a = a_1 + \frac{z - z_1}{z_1 - z_2}\cdot(a_1 - a_2). \qquad (32)$$

Так, например, имеем: $\beta = 1{,}0$, $c_0 = 0{,}2$, $z = 0{,}4$. График для определения a при $z = 0{,}4$ отсутствует. Имеются графики при $z_1 = 0{,}3$ (рис.П.5.13) и при $z_2 = 0{,}5$ (рис.П.5.14). По графикам рис.П.5.13 и рис.П.5.14 находим: при $z_1 = 0{,}3$ имеем $a_1 = 1{,}10$ а при $z_2 = 0{,}5$ имеем $a_2 = 1{,}04$. Тогда

$$a = 1{,}10 + \frac{0{,}4 - 0{,}3}{0{,}3 - 0{,}5}(1{,}10 - 1{,}04) = 1{,}07.$$

4.9. Безразмерный параметр изгибающего момента для сечения прямой вставки определяется по графику на рис. П.5.4 или по формуле

$$\omega_0 = 0{,}01267 + 0{,}10933a - 0{,}34841C_0 + 0{,}09517a^2 - 0{,}15055C_0a + 0{,}14766C_0^2, \quad (33)$$

где C_0 – безразмерный параметр длины прямой вставки, определяемый по формуле

$$C_0 = \frac{C_6}{2}\sqrt[3]{\frac{\kappa q}{EJ\,tg\varphi}}, \quad (34)$$

где C_6 – длина прямой вставки, см ;

κ – безразмерный параметр сжимающего усилия, определяемый в соответствии с п.4.11.

4.10.Безразмерный параметр изгибающего момента для сечений сопряжения прямой вставки с коленами определяется по графику на рис. П.5.5 или по формуле

$$\omega_1 = -0{,}00023 + 0{,}10829a - 0{,}09544C_0 + 0{,}10165a^2 - 0{,}32446C_0a + 0{,}47446C_0^2. \quad (35)$$

4.11. Безразмерный параметр сжимающего усилия κ определяется по графику на рис. П.5.3 или по формуле

$$\kappa = 0{,}01795 + 0{,}61641a + 0{,}85487C_0 + 0{,}00923a^2 - 0{,}02872C_0a + 0{,}44409C_0^2. \quad (36)$$

4.12.Безразмерный параметр прогиба для середины прямой вставки определяется по графику на рис. П.5.6 или по формуле

$$\tilde{V}_0 = 0{,}03507 - 0{,}11145a + 0{,}03114C_0 + 0{,}0892a^2 + 0{,}11283C_0a + 0{,}23934C_0^2. \quad (37)$$

4.13.Безразмерный параметр прогиба для сечений сопряжения прямой вставки с коленами определяется по графику на рис.П.5.7 или по формуле

$$\tilde{V}_1 = 0{,}02388 - 0{,}09878a + 0{,}05633C_0 + 0{,}09359a^2 + 0{,}00369C_0a - 0{,}12849C_0^2. \quad (38)$$

4.14.При выполнении поворота сварными или крутозагнутыми коленами продольное напряжение, изгибающий момент, продольное

усилие и прогиб определяются по формулам (24), (25), (26), и (27), а безразмерные параметры a , ω , κ и $\tilde{V}$ определяются по графикам на рис.П.5.3÷рис.П.5.20 или по формулам

$$\beta = 0,11613 + 0,52966a - 0,11459a^2 + Z(0,06318 - 0,10954a + 0,15377a^2) ; \quad (39)$$

$$\omega = -0,00703 + 0,14682a + 0,08390a^2; \quad (40)$$

$$\kappa = -0,01219 + 0,71493a - 0,04621a^2; \quad (41)$$

$$\tilde{V} = 0,01979 - 0,07887a + 0,08173a^2. \quad (42)$$

Параметры β и Z определяются по формулам (30) и (31).

4.15.Характер перемещений подземного трубопровода на углах поворота, под действием продольных сжимающих усилий зависит от конструкции угла поворота, геометрических характеристик трубы и характеристик грунта.

Оценка характера перемещений трубопровода производится через безразмерный параметр Z , определяемый по формуле (31).

4.16.Потеря общей устойчивости трубопровода в продольном направлении на углах поворота, выполненных коленами и прямыми вставками происходит только при значениях $Z \leq 0,1$.
В этой области Z необходима проверка общей устойчивости трубопровода согласно п.3.4.

4.17.Начальное сжимающее усилие, приводящее к потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении, определяется по формуле

$$N_{0кр} = \beta_{кр} \sqrt[3]{EJ\left(\frac{q}{tg\varphi}\right)^2}, \quad (43)$$

где $\beta_{кр}$ - безразмерный параметр, определяемый в соответствии с п. 4.18.

4.18.Параметр $\beta_{кр}$ определяется по графикам на рис. П.5.8 + рис.П.5.11. Он равен максимуму кривых зависимостей параметра изгиба от параметра начального сжимающего усилия на указанных рисунках. Здесь C_0 определяется по формуле (34), κ по формулам (36) и (41) для a берётся то значение, где кривые по графикам на рис. П.5.8+рис. П.5.11 имеют максимум.

Параметр $\beta_{кр}$ можно также определять по формуле

$$\beta_{кр} = 2{,}9285z^2 + 1{,}0270z + 1{,}3505. \qquad (44)$$

4.19.В области $z > 0{,}1$ потери общей устойчивости трубопровода в продольном направлении не происходит. Перемещения трубопровода монотонно увеличиваются с ростом сжимающего усилия. В этом случае достаточно выполнить проверку поперечного перемещения трубопровода в вертикальной плоскости согласно п. 3.6. Проверка общей устойчивости трубопровода не производится.

4.20.Расчётные формулы, приведённые в данной главе, могут быть использованы для расчёта трубопровода на поворотах, выполненных несколькими прямыми вставками, сварными и крутозагнутыми коленами, если на изогнутом участке один или два угла поворота. При этом, если $l \leq 0{,}6C_\beta$, то на изогнутом участке имеется один угол поворота. Здесь расчёт и проверка условия $l \leq 0{,}6C_\beta$ выполняются по формулам для углов поворота, выполненных только сварными или крутозагнутыми коленами. Если $0{,}6C_\beta < l \leq 1{,}2C_\beta$, то и при выполнении поворота несколькими прямыми вставками на изогнутом участке будет два угла поворота и одна прямая вставка. Здесь проверка условия $0{,}6C_\beta < l \leq 1{,}2C_\beta$ и расчёт выполняются по формулам для углов поворота, выполненных двумя коленами с прямой вставкой между ними.

4.21.При невыполнении условий (12), (14), (16), (18)

следует вместо сварных или крутозагнутых колен использовать холодногнутые колена, уменьшить величину угла поворота путём его разбивки с использованием прямых вставок и увеличить глубину заложения трубопровода.

5. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА НА ПОВОРОТАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫМИ КОЛЕНАМИ И ПРЯМЫМИ ВСТАВКАМИ

5.1. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе при выполнении поворота двумя коленами холодного гнутья с прямой вставкой между ними (рис. П.5.12) определяются в соответствии с п. 4.2 и п. 4.3.

5.2. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле (25), где $\omega_{q/}$ определяется в соответствии с п. 5.7 и п. 5.8.

5.3. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется по формуле (26), где K определяется в соответствии с п. 5.9.

5.4. Максимальные поперечные перемещения трубопровода определяются по формуле (27), где $\tilde{V}_{q/}$ определяется в соответствии с п. 5.10 и п. 5.11.

5.5. Длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота определяется по формуле (28), где α определяется в соответствии с п. 5.6.

5.6. Безразмерный параметр изгиба α определяется по графикам на рис. П.5.26÷рис.П.5.38 или решением уравнения

$$\beta = 0,59813 + 0,17207\alpha + 1,05654 c_0 + 0,07348 a_0 + \\ + 2(1,19061\alpha - 0,74538 c_0 - 0,48605 a_0 - \\ - 1,33728), \qquad (45)$$

где параметр β определяется по формуле (30) и параметр

определяется по формуле (31).

Если отсутствует график с найденным по формуле (31) значением z, необходимо прибегать к линейной интерполяции.

5.7. Безразмерный параметр изгибающего момента для середины прямой вставки определяется по графику на рис.П.5.22 или по формуле

$$\omega_0 = -0{,}10073 + 0{,}34442a - 0{,}52752c_0 - 0{,}43902a_0, \qquad (46)$$

где c_0 определяется по формуле (34);

$$a_0 = x_0\sqrt[3]{\frac{Kq}{EJtg\varphi}}; \qquad (47)$$

$$x_0 = R\cdot tg\varphi, \qquad (48)$$

R - радиус кривизны колена, см.

5.8. Безразмерный параметр изгибающего момента для сечений сопряжения прямой вставки с коленом определяется по графику на рис.П.5.23 или по формуле

$$\omega_1 = -0{,}05565 + 0{,}28068a - 0{,}26005c_0 - 0{,}34226a_0. \qquad (49)$$

5.9. Безразмерный параметр сжимающего усилия K определяется по графику на рис. П.5.21 или по формуле

$$K = 0{,}02015 + 0{,}61008a + 1{,}06415c_0 + 0{,}10210a_0. \qquad (50)$$

5.10. Безразмерный параметр прогиба для середины прямой вставки определяется по графику на рис.П.5.24 или по формуле

$$\bar{v}_0 = -0{,}01002 + 0{,}07761a - 0{,}06941c_0 - 0{,}08504a_0. \qquad (51)$$

5.II. Безразмерный параметр прогиба для сечений сопряжения прямой вставки с коленами определяется по графикам на рис.П.5.25 или по формуле

$$\tilde{v}_1 = -0{,}02126 + 0{,}07966a - 0{,}06451a_0 - 0{,}07683a_0 . \quad (52)$$

5.I2. При выполнении поворота холодногнутым коленом продольное напряжение, изгибающий момент, продольное усилие и прогиб определяются по формулам (24), (25), (26) и (27), а безразмерные параметры a, ω, κ и $\tilde{v}$ определяются по графикам на рис.П.5.2I + рис.П.5.38 или по формулам

$$\beta = 0{,}053792 + 0{,}84892a - 4{,}47482a_0 - 0{,}I5335a^2 - 0{,}00211a\cdot a_0 + 7{,}677I2a_0^2 + z\,(0{,}73537 - 2{,}35922a + 5{,}32465a_0 + 0{,}83378a^2 - 0{,}84890a\cdot a_0 - 5{,}0I950a_0^2) ; \quad (53)$$

$$\omega = -0{,}00266 + 0{,}I27I2a - 0{,}I6428a_0 + 0{,}09395a^2 - 0{,}I9I04a_0\cdot a - 0{,}03I99a_0^2 ; \quad (54)$$

$$\kappa = -0{,}04225 + 0{,}70335a + 0{,}54566a_0 - 0{,}03867a^2 - 0{,}20948a_0\cdot a - 0{,}I5422a_0^2 ; \quad (55)$$

$$\tilde{v} = 0{,}00278 - 0{,}03I62a + 0{,}0300Ia_0 + 0{,}05406a^2 - 0{,}02602a\cdot a_0 - 0{,}06008a_0^2 . \quad (56)$$

Параметры β и z определяются по формулам (30) и (3I).

5.13.Потеря общей устойчивости трубопровода в продольном направлении происходит при значениях $z < 0,1$. В этой области необходима проверка общей устойчивости трубопровода согласно п.3.4.

5.14.Начальное сжимающее усилие, при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода определяется по формуле (43).

5.15.Безразмерный параметр $\theta_{кр}$ определяется по формуле (44) или по графикам на рис. П.5.26÷рис. П.5.29. Он равен максимуму кривых на этих рисунках. Здесь C_θ определяется по формуле (34), a_θ – по формуле (47), K – по формуле (50) и (55), для a берётся то значение, где кривые по графикам на рис. П.5.26÷рис. П.5.29 имеют максимум.

5.16.В области $z > 0,1$ потери общей устойчивости трубопровода в продольном направлении не происходит. Проверка устойчивости трубопровода не производится. В этом случае достаточно выполнить проверку поперечного перемещения трубопровода в вертикальной плоскости согласно п. 3.6.

5.17.Расчётные формулы, приведённые в данной главе, могут быть использованы для расчёта трубопровода на поворотах, выполненных несколькими *прямыми вставками* и *холодногнутыми коленами*, если на изогнутом участке один или два угла поворота. При этом, если $l \leq 1,2(x_\theta + 0,5C_\theta)$, то на изогнутом участке имеется один угол поворота. Здесь расчёт и проверка условия $l \leq 1,2(x_\theta + 0,5C_\theta)$ выполняются по формулам для углов поворота, выполненных только холодногнутыми коленами.

Если $1,2(x_\theta + 0,5C_\theta) < l \leq 1,2(x_\theta + C_\theta)$, то на изогнутом участке имеются два угла поворота. Здесь расчёт и проверка условия $1,2(x_\theta + 0,5C_\theta) < l \leq 1,2(x_\theta + C_\theta)$ выполняются по формулам для углов поворота, выполненных двумя холодногнутыми коленами с

прямой вставкой между ними.

5.I8.При не выполнении условий (I2), (I4), (I6), (I8) следует уменьшить величину угла поворота путём его разбивки с использованием прямых вставок и увеличить глубину заложения трубопровода.

6. РАСЧЁТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

6.I. Максимальные поперечные перемещения и продольные напряжения при выполнении поворота упругим изгибом трубы (рис. П.5.I д) возникают в середине изогнутого участка.

6.2. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе определяется по формуле

$$\sigma^{II}_{пр} = \frac{N}{F} \pm \left(\frac{M}{W} + \frac{E D_H}{2\rho} \right), \qquad (57)$$

где M – изгибающий момент в среднем сечении изогнутого участка трубопровода, кгс·см, определяемый в соответствии с п. 6.3.

6.3. Изгибающий момент M определяется по формуле

$$M = \omega \sqrt{EJA_0 q}, \qquad (58)$$

где ω – безразмерный параметр изгибающего момента, определяемый в соответствии с п.6.8;

A_0 – амплитуда начального упругого прогиба, см, определяемая в соответствии с п.6.I0.

6.4. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется по формуле

$$N = p \frac{\pi D_{BH}^2}{4} - \sqrt{K \frac{EJ}{A_0} q}. \qquad (59)$$

6.5. Максимальные поперечные перемещения трубопровода определяются по формуле

$$V = A_0 \cdot \tilde{V}, \qquad (60)$$

где $\tilde{V}$ – безразмерный параметр прогиба, определяемый в соответствии с п.6.10.

6.6. Длина изогнутого участка трубопровода определяется по формуле

$$l = 2a \sqrt[4]{\frac{1}{K} \cdot \frac{EJ}{q} \cdot A_0} \qquad (61)$$

Параметр a может иметь значения в интервале $0 < a < 4{,}49$.

6.7. Безразмерный параметр изгиба a определяется по графикам на рис.П.5.42÷рис.П.5.50 или решением уравнения

$$\beta = -0{,}09384 + 2{,}77552a - 1{,}98347a_0 - 0{,}45166a^2 - 0{,}09809a_0a + 0{,}58858a_0^2 + z(1{,}82039 + 0{,}13395a - 1{,}19675a_0 + 0{,}02651a^2 + 0{,}09894a_0a + 0{,}14492a_0^2), \qquad (62)$$

где

$$\beta = N_0 \sqrt{\frac{A_0}{EJq}}, \qquad (63)$$

$$z = \frac{\pi A_0}{4} \sqrt{\frac{2\rho F}{J}} \sqrt[4]{\left(\frac{A_0}{q}\right)^3 \frac{1}{EJ}}. \qquad (64)$$

В тех случаях, когда отсутствует график с найденным по формуле (64) значением z, необходимо прибегать к линейной интерполяции.

6.8. Безразмерный параметр изгибающего момента определяется по графику на рис.П.5.40 или по формуле

$$\omega = 0{,}12273 + 0{,}81659a - 0{,}61916a_0 + 0{,}36318a^2 - 0{,}67499a_0a + 0{,}30721a_0^2, \qquad (65)$$

где a_0 – безразмерный параметр длины волны начального упругого прогиба, определяемый по формуле

$$a_0 = \frac{l_0}{2} \sqrt[4]{K \frac{q}{EJ} \cdot \frac{1}{A_0}}, \qquad (66)$$

где l_0 – длина волны начального прогиба, см .

Параметр a_0 может иметь значения в интервале $0 < a_0 < 3,14$.

6.9. Безразмерный параметр сжимающего усилия определяется по графику на рис.П.5.39 или по формуле

$$K = 0,35188 + 1,18905a - 1,53659a_0 + 1,40264a^2 - 1,76410a_0 \cdot a + 1,06997a_0^2. \quad (67)$$

6.10. Безразмерный параметр прогиба определяется по графику на рис.П.5.41 или по формуле

$$\bar{V} = -0,03404 - 0,01412a + 0,09661a_0 + 0,04111a^2 + 0,01069a_0 \cdot a - 0,04166a_0^2. \quad (68)$$

6.11. Зависимость между амплитудой, длиной волны и радиусом кривизны начального упругого прогиба трубопровода имеет вид

$$A_0 = \frac{l_0^2}{2\pi^2\rho}. \quad (69)$$

6.12. Начальное сжимающее усилие, приводящее к потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении определяется по формуле

$$N_{0кр} = \beta_{кр}\sqrt{\frac{EJq}{A_0}}. \quad (70)$$

6.13. Безразмерный параметр $\beta_{кр}$ определяется по графикам на рис.П.5.42÷рис.П.5.50. Параметр $\beta_{кр}$ равен максимуму кривых на этих рисунках. В тех случаях, когда отсутствует максимум кривых, потери общей устойчивости трубопровода в продольном направлении не происходит. При определении $\beta_{кр}$ параметр a_0 вычисляется по формуле (66), K – по формуле (67), для a берётся то значение, где кривые по графикам на рис.П.5.42÷рис.П.5.50 имеют максимум.

6.14. При невыполнении условий (12), (14), (16), (18) следует увеличить радиус упругого изгиба и глубину заложения трубопровода.

7. РАЦИОНАЛЬНАЯ РАЗБИВКА ПОВОРОТОВ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ НА "ВЫПУКЛОМ" РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ

7.1. Одним из способов уменьшения напряжений и перемещений подземного трубопровода, находящегося под действием продольных сжимающих усилий, является рациональная разбивка вертикальных углов поворота с использованием прямых вставок.

7.2. От длины прямой вставки зависят значения продольных напряжений и перемещений трубопровода. Имеется оптимальная длина прямой вставки, при которой для данных условий сооружения и эксплуатации трубопровода напряжения минимальны.

7.3. Оптимальная длина прямой вставки определяется по формуле

$$C_{опт} = 2C_{0опт}\sqrt[5]{\frac{l}{K}\cdot\frac{EJ}{q}\cdot tg\varphi}, \qquad (71)$$

где $C_{0опт}$ – безразмерный параметр оптимальной длины прямой вставки, определяемый в соответствии с п.7.5 или п.7.6;

K – безразмерный параметр сжимающего усилия, определяемый в соответствии с п.4.11 или п.5.9.

7.4. Длина прямой вставки, кроме того, с учётом требований СНиП II-45-75 должна быть не менее диаметра трубопровода и не менее 250 мм.

7.5. Параметр оптимальной длины прямой вставки при выполнении поворота двумя отводами или крутоизогнутыми коленами с прямой вставкой между ними (рис.П.5.38) определяется по формуле

$$C_{0опт} = \begin{cases} 0{,}0514a^2 + 0{,}5858a & \text{при } a \leq 2{,}7, \\ 0{,}7346a^2 - 5{,}8768a + 11{,}9286 & \text{при } a > 2{,}7, \end{cases} \qquad (72)$$

где a – безразмерный параметр изгиба, определяемый в соответствии с п.4.8.

7.6. Параметр оптимальной длины прямой вставки при выполнении поворота двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними (рис.П.5.3 г) определяется по формуле

$$C_{опт} = \begin{cases} 0{,}0514a^2 + 0{,}3858a - 0{,}4555a_0 & \text{при } a \le 2{,}7+2a_0, \\ 0{,}7346a^2 - 5{,}8768a - 2{,}7320a_0^2 + 4{,}6904a_0 + 11{,}69286 & \text{при } a > 2{,}7+2a_0. \end{cases} \quad (72)$$

где a – безразмерный параметр изгиба, определяемый в соответствии с п.5.6 ;

a_0 – безразмерный параметр, определяемый по формуле (47).

7.7. Расчётные формулы (71), (72) и (73) могут быть использованы и для конструирования поворотов трубопроводов, выполненных несколькими прямыми вставками и коленами, если на изогнутом участке два угла поворота.

7.8. При выполнении поворота сварными или крутозагнутыми коленами и несколькими прямыми вставками на изогнутом участке будет два угла поворота, если соблюдено условие $0{,}6C_{опт} < l \le 1{,}2C_{опт}$

Проверка условия $0{,}6C_{опт} < l \le 1{,}2C_{опт}$ осуществляется по формулам для углов поворота, выполненных двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

7.9. При выполнении поворота холодногнутыми коленами и несколькими прямыми вставками на изогнутом участке будет два угла поворота, если соблюдено условие $1{,}2(x_0 + 0{,}5C_{опт}) < l \le 1{,}2(x_0 + C_{опт})$. Проверка условия $1{,}2(x_0 + 0{,}5C_{опт}) < l \le 1{,}2(x_0 + C_{опт})$ осуществляется по формулам для углов поворота, выполненных двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

8. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЁТА ТРУБОПРОВОДА

8.1. Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

1) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, $R_1^н$, $R_2^н$, $K_н$, C, m, n, $h^н$, h, p, Δt, φ, $q_{тр.}$, $q_{изл.}$, $\gamma_{гр}$, $\varphi_{гр}$, $c_{гр}$.

2) Вычисляется начальное усилие N_0 по формуле (7).

3) Вычисляется сопротивление поперечным перемещениям трубопровода по формуле (10).

4) Вычисляется сопротивление продольным перемещениям трубопровода по формуле (11).

5) Вычисляется несущая способность трубопровода по формулам (12) и (20).

6) Вычисляется критическое напряжение по формуле (14).

7) Вычисляется параметр β по формуле (30).

8) Вычисляется параметр z по формуле (31).

9) По графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 при $c_0 = 0$ находится параметр изгиба α.

10) По графику рис.П.5.4 или по формуле (40) находится параметр изгибающего момента ω.

11) По графику рис.П.5.3 при $c_0 = 0$ или по формуле (41) находится параметр сжимающего усилия K

12) По графику рис.П.5.6 или $c_0 = 0$ или по формуле (42) находится параметр прогиба $\tilde{v}$.

13) Вычисляется изгибающий момент по формуле (25).

14) Вычисляется продольное усилие по формуле (26).

15) Вычисляется продольное напряжение по формуле (24).

16) Вычисляется поперечное перемещение трубопровода по формуле (27).

17) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по

формуле (28).

I8)Если $z \leq 0,1$, то вычисляется параметр $\beta_{кр}$ по формуле (44) и $N_{екр}$ по формуле (43).

I9)Производится проверка прочности трубопровода из условий (I2) и (20).

20)Производится проверка устойчивости стенки трубы из условия (I4).

2I)Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении при $z \leq 0,1$ из условия (I6). При $z > 0,1$ проверка устойчивости по (I6) не производится и устойчивость обеспечивается.

22)Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (I8).

23)По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

24)Если $l \leq 0,6 C_g$, то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими коленами и прямыми вставками.

8.2. Поворот выполнен двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

I) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, $R_1^н$, $R_2^н$, $K_н$, C, m, n, $h^н$, h, ρ, Δt, C_g, φ, $q_{тр}$, $q_{изл}$, $\gamma_{гр}$, $C_{гр}$.

2) Вычисляется начальное усилие N_g по формуле (7).

3) Вычисляется сопротивление поперечным и продольным перемещениям трубопровода по формулам (I0) и (II).

4) Вычисляются несущая способность трубопровода и критическое напряжение по формулам (I2), (I4) и (20).

5) Вычисляются параметры β и z по формулам (30) и (3I).

6) Принимается $C_0 = 0$ и по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 находится параметр изгиба a .

7) По графику рис.П.5.3 при $C_0 = 0$ или по формуле (41) находится параметр K .

8) Вычисляется параметр C_0 по формуле (34).

9) Используя последнее значение C_0, по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 находится параметр a .

10) По графику рис.П.5.3 или по формуле (41) находится K , используя при этом последние значения a и C_0 .

11) Повторяются п.п.8.10 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями C_0 не будет менее 0,01.

12) По графикам рис.П.5.4 и рис.П.5.5 или по формулам (33), (34) находятся параметры ω_0 и ω_1 .

13) По графикам рис.П.5.6 и рис.П.5.7 или по формулам (37) и (38) находятся параметры $\tilde{V}_0$ и $\tilde{V}_1$.

14) Вычисляются значения изгибающего момента, продольного усилия, суммарного продольного напряжения и поперечного перемещения по формулам (24), (25), (26) и (27).

15) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по формуле (28).

16) Если $Z \leq 0,1$, то определяется параметр $\beta_{кр}$ по графикам рис.П.5.8 рис.П.5.11 или по формуле (44) и $N_{окр}$ по формуле (43).

17) Производится проверка прочности и устойчивости стенки трубопровода из условий (12), (14) и (20).

18) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении при $Z \leq 0,1$ из условия (16).
При $Z > 0,1$ устойчивость обеспечивается, и проверка устойчивости не производится.

19) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (18).

20) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

21) Если $0,6C_g < l < 1,2C_g$, то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими коленами и прямыми вставками.

8.3. Поворот выполнен холодногнутым коленом.

1) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, $R_1^н$, $R_2^н$, $K_н$, C, m, n, $h^н$, h, ρ, Δt, φ, R, $q_{тр}$, $q_{изл}$, $\gamma_{гр}$, $\varphi_{гр}$, $C_{гр}$.

2) Вычисляются N_0, q и ρ по формулам (7), (10) и (11).

3) Вычисляются несущая способность трубопровода и критическое напряжение по формулам (12), (14) и (20).

4) Вычисляются параметры β и x по формулам (30) и (31).

5) Принимаются $c_0 = 0$ и $a_0 = 0$ и по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 находится параметр изгиба α.

6) По графику рис.П.5.3 при $a_0 = 0$ и $c_0 = 0$ или по формуле (41) находится параметр K.

7) Вычисляется параметр a_0 по формуле (47).

8) Используя последние значения a_0 (при $c_0 = 0$) по графикам рис.П.5.26÷рис.П.5.38 находится параметр α.

9) По графику рис.П.5.21 (при $c_0 = 0$) или по формуле (55) находится K, используя при этом последние значения α и a_0.

10) Повторяются п.п.7÷9 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями a_0 не будет менее 0,01.

11) По графикам рис.П.5.22 и рис.П.5.24 или по формулам (54) и (56) находятся ω и $\tilde{v}$.

12) Вычисляются значения изгибающего момента, продольного усилия, суммарного продольного напряжения и поперечного переме-

ления по формулам (24), (25), (26) и (27).

13) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по формуле (28).

14) Если $z \leq 0,1$, то определяется параметр $\beta_{кр}$ по графикам рис.П.5.26÷рис.П.5.29 и $N_{e_{кр}}$ по формуле (43).

15) Производится проверка прочности и устойчивости стенки трубопровода из условий (12), (14) и (20).

16) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении при $z < 0,1$ из условия (16).

При $z > 0,1$ устойчивость обеспечивается и проверка устойчивости по (16) не производится.

17) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (18).

18) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

19) Если $l \leq 1,2(x_0 + 0,5 C_g)$, то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими кольцами и прямыми вставками.

8.5. Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

1) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, R_1'', R_2'', $K_н$, C, m, n, h'', h, ρ, Δt, φ, R, C_g, $q_{тр}$, $q_{доп}$, $\gamma_{гр}$, $\varphi_{гр}$, $C_{гр}$.

2) Вычисляются N_e, q и p по формулам (7), (10) и (11).

3) Вычисляются несущая способность трубопровода и критическое напряжение по формулам (12), (14) и (20).

4) Вычисляются параметры β и z по формулам (30) и (31).

5) Принимаются $C_e = 0$ и $C_e = 0$ и по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 находится параметр α.

6) По графику рис.П.5.3 при $a_0 = 0$ и $c_0 = 0$ или по формуле (41) находится параметр K .

7) Вычисляются параметры a_0 и c_0 по формулам (34) и (47).

8) Используя последние значения a_0 и c_0, по графикам рис.П.5.26÷рис.П.5.38 находится параметр a .

9) По графику рис.П.5.21 или по формуле (55) находится K , используя при этом последние значения a , a_0 и c_0 .

10) Повторяются п.п.7÷9 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями c_0 не будет менее 0,01.

11) По графикам рис.П.5.22÷рис.П.5.25 или по формулам (46), (49), (51) и (52) находятся ω_0 , ω_1 , $\bar{v}_0$ и $\bar{v}_1$.

12) Вычисляются значения изгибающего момента, продольного усилия, суммарного продольного напряжения и поперечного перемещения по формулам (24), (25), (26) и (27).

13) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по формуле (28).

14) Если $z \leq 0,1$, то определяется параметр $\beta_{кр}$ по графикам рис.П.5.26÷рис.П.5.29 или по формуле (44) и $N_{0кр}$ по формуле (43).

15) Производится проверка прочности и устойчивости стенки трубопровода из условий (12), (14) и (20).

16) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении при $z \leq 0,1$ из условия (16).

При $z > 0,1$ устойчивость обеспечивается и проверка устойчивости по (16) не производится.

17) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (18).

18) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в

продольном направлении.

I9) Если $1{,}2(x_0 + 0{,}5c_\beta) < l \leq 1{,}2(x_0 + c_\beta)$, то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими коленами и прямыми вставками.

8.5. Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

I) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, $R_1^н$, $R_2^н$, $K_н$, C, m, n, h'', h, ρ, Δt, l_β, φ, $q_{тр}$, $q_{доп}$, $\gamma_{ср}$, $\varphi_{ср}$, $c_{ср}$.

2) Вычисляются N_0, q и ρ по формулам (7), (I0) и (II).

3) Вычисляются несущая способность трубопровода и критическое напряжение по формулам (I2), (I4) и (20).

4) Вычисляются A_β, β и z по формулам (63), (64) и (69).

5) Принимается $a_\beta = 0{,}I$ и по графикам рис.П.5.42÷рис.П.5.50 находится параметр изгиба a.

6) По графику рис.П.5.39 при $a_\beta = 0{,}I$ или по формуле (67) находится параметр K.

7) Вычисляется параметр a_β по формуле (66).

8) Используя последнее значение a_β, по графикам рис.П.5.42÷рис.П.5.50 находится параметр a

9) По графику рис.П.5.39 или по формуле (67) находится K, используя при этом последние значения a и a_β.

I0) Повторяются п.п.7÷9 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями a_β не будет менее 0,0I.

II) По графикам рис.П.5.40 и рис.П.5.4I или по формулам (65) и (68) находятся ω и $\bar{V}$.

I2) Вычисляются значения изгибающего момента, продольного усилия, суммарного продольного напряжения и поперечного перемещения по формулам (57),(58), (59) и (60).

I3) Вычисляется длина изогнутого участка по формуле (6I).

I4) По графикам рис.П.5.42÷рис.П.5.50 определяется параметр $\beta_{кр}$.

I5) Производится проверка прочности и устойчивости стенки трубопровода из условий (I2), (I4) и (20).

I6) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении из условия (I6).

I7) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (I8).

I8) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

9. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАЦИОНАЛЬНОЙ РАЗБИВКИ ПОВОРОТОВ

Разбивка углов поворота производится в следующей последовательности.

I) Устанавливаются значения исходных величин: $D_н$, δ, J, F, W, $R_2^н$, $K_н$, C, m, n, h'', h, p, Δt, φ, $q_{тр}$, $q_{изл}$, $\gamma_{гр}$, $c_{гр}$.

2) Вычисляется начальное усилие N_0 по формуле (7).

3) Вычисляются сопротивления поперечным и продольным перемещениям трубопровода по формулам (I0) и (II).

4) Вычисляются несущая способность трубопровода и критическое напряжение по формулам (I2), (I4) и (20).

5) Вычисляются параметры β и z по формулам (30) и (3I).

6) Принимаются $\alpha_0 = 0$ и $c_0 = 0$ и по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.20 находится параметр изгиба α.

7) Определяется параметр K при $\alpha_0 = 0$ и $c_0 = 0$ по рис.П.5.3 или по формуле (4I).

8) Вычисляется параметр α_0 по формуле (47) при конструировании поворота с использованием холодногнутых колен.

9) Вычисляется параметр $c_{0опт}$ по формуле (72) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен

и по формуле (73) при конструировании поворота с использованием холодногнутых колен.

10) Используя последние значения a_0 и $\delta_{0опт}$ определяется параметр a по графику рис.П.5.8÷рис.П.5.20 при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен и по графику рис.П.5.26÷рис.П.5.38 при конструировании поворота с использованием холодногнутых колен.

11) Используя последние значения a , a_0 и $\delta_{0опт}$, определяется параметр K по графику рис.П.5.3 или по формуле (41) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен и по графику рис.П.5.21 или по формуле (55) при конструировании поворота с использованием холодногнутых колен.

12) Повторяются п.п.8÷11 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями $\delta_{0опт}$ не будет менее 0,01.

13) Вычисляется оптимальная длина прямой вставки по формуле (71).

14) Определяются параметры ω_0 , ω_l , $\tilde{V}_0$ и $\tilde{V}_l$ по графикам рис.П.5.4÷рис.П.5.7 или по формулам (33),(34),(37) и (38) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен и по графикам рис.П.5.22÷рис.П.5.25 или по формулам (46),(49),(51),(52) при конструировании поворота с использованием холодногнутых колен.

15) Вычисляются значения изгибающего момента, продольного усилия, суммарного продольного напряжения и поперечного перемещения по формулам (24),(25),(26) и (27).

16) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по формуле (28).

17) Если $z \leq 0,1$, то определяется параметр $\beta_{кр}$ по графикам рис.П.5.8÷рис.П.5.11 или по формуле (44) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен и по графикам рис.П.5.26÷рис.П.5.29 или по формуле (44) при конст-

рупировании поворота с использованием холодногнутых колен.

18) Вычисляется значение продольного критического усилия по формуле (43).

19) Производится проверка прочности и устойчивости стенки трубопровода из условий (12),(14) и (20).

20) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении при $z \leq 0{,}1$ из условия (16).

При $z > 0{,}1$ устойчивость обеспечивается, и проверка устойчивости по (16) не производится.

21) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (18).

22) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

23) Если $0{,}6\,C_{опт} < l \leq 1{,}2\,C_{опт}$, то данный алгоритм используется для рациональной разбивки поворотов с использованием нескольких сварных или крутозагнутых колен и прямых вставок.

24) Если $1{,}2(x_0 + 0{,}5C_{опт}) < l \leq 1{,}2(x_0 + C_{опт})$, то данный алгоритм справедлив для рациональной разбивки поворотов с использованием нескольких холодногнутых колен и прямых вставок.

10. РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВМ "ЕС-1022"

10.1. Программа решения задачи написана на языке PL / I .

10.2. Входной информацией для эксплуатации программы являются исходные данные: $D_н$, δ, J, F, W, $P_{вн}$, $q_{тр}$, $q_{доп}$, R, h, $\gamma_{гр}$, $C_{гр}$, $\varphi_{гр}$, $R_z^н$, m, c, $K_н$, тип грунта (песчаный или глинистый), код варианта конструкции поворота трубопровода (сварное или крутозагнутое колено, сварные или крутозагнутые колена с прямой вставкой между ними, холодногнутое колено, два холодногнутых колена с прямой вставкой между ними,

свободный изгиб трубопровода).

10.3. Входной информацией для всех вариантов конструкции поворотов трубопроводов являются также наименьшее и наибольшее возможные значения температурного перепада и шаг изменения температурного перепада, который используется при выполнении расчёта по данной программе. Аналогично входной информацией являются наименьшее и наибольшее возможные значения угла поворота и шаг изменения этой величины при выполнении поворота коленами и прямыми вставками. А при выполнении поворота свободным изгибом трубы вводятся области изменения радиуса упругого изгиба и длины волны начального прогиба и шаги изменения этих величин.

Таким образом, расчёт выполняется не только для конкретных значений Δt , 2φ , ρ и $l_в$, а для всех их возможных значений для рассчитываемого магистрального трубопровода.

10.4. Выходной информацией являются: $\sigma''_{пр_0}$, $\sigma''_{пр_1}$, $\sigma''_{пр}$, V_0 , V_1 , V , $(\psi_в \frac{c}{K_м} R''_2)$, $\sigma_{кр}$, $N_{0кр}$, N_0 , N , M_0 , M_1 , M , $\sigma''_{кц}$, P , q , $c_в$.

10.5. При выполнении поворота с использованием прямых вставок программа наряду с определением напряжений и перемещений позволяет найти оптимальную длину прямой вставки.

10.6. Время трансляции программы не более 5 мин., время расчёта одного угла поворота для одного значения температурного перепада не более 10 сек.

10.7. Рабочая программа и инструкция находятся в ВЦ института ВНИИСПТнефть.

11. РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВМ "НАИРИ-2"

11.1. Программа решения задачи записывается на алгоритмическом языке и в такой записи вводится в машину.

11.2. Для обозначения величин на машине имеется специаль-

ный алфавит букв. Поэтому условные обозначения, используемые в Указаниях заменяются буквами, используемыми на машине:

$D_{вн}$ - ф ; δ - б ; J - и ; F - ч ; W - ш ; $R_2^н$ - $ц_1$;

$K_н$ - $ц_2$; $C_э$ - $ц_3$; m - m ; $h^н$ - $ц_4$; h - $ц_5$; p - g ;

Δt - t ; φ - f ; $C_в$ - c_1 ; R - r_1 ; $l_в$ - $l_в$; g - r_2 ;

($q_{тр}$ + $q_{доп}$) - $л_1$; $\gamma_{гр}$ - $л_2$; $\varphi_{гр}$ - $л_3$; $\ell_{гр}$ - c_2 ; a - в ;

$N_в$ - π_1 ; q_1 - у ; $C_н$ - э ; p - р ; β/определяемый по формуле (30),(31)/ - δ_1 ; β/определяемый через безразмерные параметры a , $a_в$, $c_в$ / - δ_2 ; z - z ; K - к ; $C_в$ - c_0 ;

$\tilde{V}$ - Н ; $a_в$ - о ; $\tilde{V}_0$ - $И_0$; $\tilde{V}_1$ - $И_1$; ω - ж ; $\omega_в$ - $ж_0$;

ω_1 - $ж_1$; $\sigma_{пр}^н$ - ъ ; $\sigma_{пр}^н$ - $ъ_0$; $\sigma_{пр}^н$ - $ъ_1$; $\tilde{V}$ - и ; t - l ;

$V_в$ - $н_0$; V_1 - $н_1$; ($m\sigma_{кр}$) - $ц_6$; $(\Psi_3 \frac{c}{K_н} R_2^н)$ - $ц_7$;

[V] - $ц_8$; $mN_{вкр}$ - π_2 ; $A_в$ - $ц_9$; $\tilde{V}_{1в}$ - $И_2$; δ_1 - σ_6 (шаг изменения a)

При составлении программы для обозначения типа грунта используются буквы щ и s . При песчаном грунте обозначено s = I и щ = 0, а при глинистом - s = 0 и щ = I.

II.3. После окончания ввода-программы при выполнении расчёта на прочность , устойчивость стенки трубы и общую устойчивость вводятся следующие значения исходных данных:

ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ m $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$

$л_3$ c_2 щ s

Кроме того вводятся :

I) при выполнении поворота сварным или крутозагнутым коленом:

f

2) при выполнении поворота двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними:

f c_1

3) при выполнении поворота холодногнутым коленом:

f r_1

4) при выполнении поворота двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними:

f r_1 c_1

5) при выполнении поворота свободным изгибом трубопровода:

l_2 r_2

При рациональной разбивке поворотов длина прямой вставки не вводится, а вычисляется по формуле (71).

II.4. Аргументы функции вводятся в машину только в радианах. Поэтому аргументы функции, заданные в градусах, переводятся в радианную меру. Физические величины вводятся в машину в см, кгс.

II.5. На печать выводятся значения суммарных продольных напряжений, поперечных перемещений, ($\psi_2 \frac{C}{K_н} R_2^н$), $m\sigma_{кр}$, $[V]$ и $mN_{0_{кр}}$. Также для контроля печатаются значения N_0, q, p и A_0. При рациональной разбивке поворотов на печать выводится кроме того оптимальная длина прямой вставки.

II.6. По полученным результатам делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарков Г.М., Рыжов Л.Б. Программирование для цифровой вычислительной машины "Наири". М., изд. Московского университета, 1973.

2. Камерштейн А.Г. и др. Расчёт трубопроводов на прочность. М., "Недра", 1969.

3. Указания по проектированию и методике расчёта магистральных газопроводов из труб диаметром 1420 мм . ВСН 1 - 46 - 73. Издание ЦНТИ ВНИИСТа, 1974.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

ПРИМЕРЫ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА РАСЧЁТА ТРУБОПРОВОДА

П.I.I. Расчёт трубопровода на прочность и устойчивость. Пример I. Нефтепровод диаметром 720 мм и толщиной стенки I0 мм уложен в песчаном грунте на глубине 0,8 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, равный 6^0. Внутреннее давление в трубопроводе равно 50 кгс/см^2, а температурный перепад составляет 60^0С. Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны I40600 см^4, 3906 см^3 и 223 см^2. Вес трубы с продуктом 5,0 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2, временное сопротивление 5200 кгс/см^2.

Характеристики грунта: объёмный вес $\gamma_{гр} = 0{,}0012$ кгс/см^3, угол внутреннего трения $\varphi_{гр} = 23^0$, сцепление $C_{гр} = 0$.

Согласно табл.3 нефтепровод относится к II-категории. Для трубопроводов II-категории имеем $c = I$, $K_н = I$ и $m = 0{,}9$. Согласно СНиП II-45-75 принимаем $n = I{,}I5$, $K_1 = I{,}4$.

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

I) Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

По формуле (7) начальное сжимающее усилие

$$N_0 = I2 \cdot I0^{-6} \cdot 2{,}I \cdot I0^6 \cdot 223 \cdot 60 + (I - 2 \cdot 0{,}3) \cdot 50 \cdot 3850 = 4I4I45 \text{ кгс}$$

Здесь по (5)

$$F_{cв} = \frac{3{,}I4 \cdot 70^2}{4} = 3850 \text{ см}^2.$$

Согласно (I0) и (II)

$$q = 50 + 0{,}8[0{,}0012 \cdot 72(80+0{,}II \cdot 72) + 0{,}0012(80+0{,}5 \cdot 72)^2 tg I6^0] =$$

$$= I4{,}8I \text{ кгс/см}.$$

$$p = 0{,}8\left[5 \cdot tg\,23^0 + 2 \cdot 0{,}0012 \cdot 0{,}46 \cdot 3{,}14 \cdot 70^2 \cdot tg\,23^0\right] = 8{,}05 \text{ кгс/см}.$$

По графику рис.П.5.2 для $\frac{h}{D_н} = 1{,}11$ и песчаного грунта находим $C_н = 0{,}46$.

По формуле (13)

$$\varphi_s = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\frac{1750}{3600}\right)^2} - 0{,}5\frac{1750}{3600} = 0{,}665.$$

Здесь $\sigma^н_{кц} = \frac{50 \cdot 70^2}{2 \cdot 1} = 1750$ кгс/см^2.

Несущая способность трубопровода по формуле (12)

$$\varphi_s \frac{C}{K_н} R^н_s = 0{,}665 \cdot 3600 = 2390 \text{ кгс/см}^2 .$$

По формуле (15)

$$\sigma_{кр} = \left(\frac{8{,}26 \cdot 1}{72 - 1} + 0{,}85\right) \cdot 3600 = 3479 \text{ кгс/см}^2 .$$

По (20) $\varphi_s \frac{R^н_1 m}{K_1 K_н} = 3243$ кгс/см^2.

По формулам (30) и (31)

$$\beta = 4{,}14145\sqrt[3]{\frac{1}{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 140600}\left(\frac{0{,}0524}{14{,}81}\right)^2} = 1{,}445 .$$

$$z = \sqrt{\frac{2 \cdot 8{,}05}{14{,}81}\cdot\frac{223}{140600}}\,0{,}0524^8 \cdot \sqrt[3]{\frac{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 140600}{14{,}81}} \cdot 0{,}0524 = 0{,}5$$

По графику рис.П.5.11 при $C_0 = 0$ имеем $a = 2{,}134$.

Согласно графикам на рис. П.5.3 , рис.П.5.4 и рис.П.5.6 при $C_0 = 0$ или по формулам (40), (41) и (42) получим

$\omega = 0{,}69084$, $K = 1{,}294$, $\tilde{V} = 0{,}2415$.

Тогда согласно (25)

$$M = 0{,}69084 \sqrt[3]{14{,}81(2{,}1\cdot10^6\cdot140600\cdot0{,}0524)^2} = 10579167 \text{ кгс}\cdot\text{см}.$$

По формуле (26)

$$N = 50\cdot\frac{3{,}14\cdot70^2}{4} - \sqrt[3]{2{,}1\cdot10^6\left(-\frac{1{,}294\cdot14{,}81}{0{,}0524}\right)^2} = -148052 \text{ кгс}.$$

По формуле (24) продольные сжимающие напряжения

$$\sigma^N_{пр} = -\frac{148052}{223} - \frac{10579167}{3906} = -3372 \text{ кгс/см}^2.$$

Продольные растягивающие напряжения

$$\sigma^N_{пр} = -\frac{148052}{223} + \frac{10579167}{3906} = 2045 \text{ кгс/см}^2.$$

Имеем $3372 > 2390$ кгс/см^2, т.е. условие (12) не выполняется и прочность трубопровода не обеспечена. По формуле (23) $\sigma_{пр_N} = -1452$ кгс/см^2. На прямолинейных участках прочность обеспечена, т.к. имеем $1452 < 3243$ кгс/см^2. Устойчивость стенки трубы не обеспечена, т.к. условие (14) не выполняется:

$$3373 > 0{,}9\cdot3479 = 3130 \text{ кгс/см}^2.$$

Общая устойчивость трубопровода в продольном направлении обеспечена, т.к. имеем $z > 0{,}1$. Проверка (16) не требуется. По формуле (27)

$$V = 0{,}2415 \sqrt[3]{\frac{2{,}1\cdot10^6\cdot140600}{14{,}81}\cdot0{,}0524^4} = 12{,}8 \text{ см} .$$

С целью снижения продольных напряжений следует использовать холодногнутое колено вместо сварных или крутозагнутых, уменьшить величину угла поворота путём его разбивки или увеличить глубину заложения трубопровода.

Определим длину изогнутого участка по формуле (28)

$$l = 2{,}134\sqrt[a]{\frac{I}{I{,}294}\cdot\frac{2{,}1\cdot10^{6}\cdot140600}{14{,}81}}\cdot 0{,}0524 = 1985 \text{ см}.$$

2) Поворот выполнен холодногнутым коленом. Радиус кривизны колена 25 м.

Параметр a_0 по формуле (47)

$$a_0 = 131\cdot\sqrt[8]{\frac{1{,}294\cdot14{,}81}{2{,}1\cdot10^{6}\cdot140600\cdot0{,}0524}} = 0{,}129.$$

Здесь по (48) $x_0 = 2500\cdot0{,}0524 = 131$ см.

Величина $K = 1{,}294$ берётся для случая выполнения поворота крутозагнутым или сварным коленом.

По графику рис.П.5.32 при $C_0 = 0$ находим $a = 2{,}134$. По графику рис.П.5.21 или по формуле (55) $K = 1{,}296$. Тогда $a_0 = 0{,}140$. При новом приближении имеем $a = 2{,}134$, $K = 1{,}297$, $a_0 = 0{,}141$ Разность между предыдущим и последующими значениями a_0 менее 0,01 и по этому приближение заканчиваем. По графикам рис.П.5.22 и рис.П.5.24 или по формулам (54) и (56) находим $\omega = 0{,}616$ и $\bar{V} = 0{,}237$.

По формулам (24), (25), (26) и (27) находим $M =$ $= 942760$ кгс·см, $N = -14854$ кгс, $\sigma^{M}_{x0} = -3080$ кгс/см^2, $\sigma^{N}_{x0} = 1748$ кгс/см^2, $V = 12{,}6$ см. По (28) длина изогнутого участка $l = 2167$ см.

Как видно, при выполнении поворота холодногнутым коленом вместо сварного, крутозагнутого колена напряжения уменьшаются.

Согласно п.п.3.1, 3.3, 3.7, 5.13 устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода в продольном направлении обеспечены, а прочность не обеспечена.

С целью снижения продольных напряжений следует уменьшить величину угла поворота путём его разбивки с использованием пря-

мых вставок или увеличить глубину заложения трубопровода.

3) Поворот выполнен двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Длина прямой вставки 11 м .

По формуле (34), используя найденное выше значение K для случая исполнения поворота сварным или крутозагнутым коленом, вычислим параметр C_σ .

$$\text{Итак} \quad C_\sigma = \frac{1100}{2}\sqrt[3]{\frac{1{,}294\cdot 14{,}81}{2{,}1\cdot 10^6\cdot 140600\cdot 0{,}0524}} = 0{,}605 .$$

По графику рис.П.5.11 находим $\alpha = 1{,}386$.
По графику рис.П.5.3 или по формуле (41) $K = 1{,}508$. Тогда по (34) $C_\sigma = 0{,}628$. При новом приближении имеем $\alpha = 1{,}387$, $K = 1{,}510$, $C_\sigma = 0{,}634$. Разность между предыдущим и последним значениями C_σ менее 0,01 и по этому приближению заканчиваем.

По графикам рис.П.5.4÷рис.П.5.7 или по формулам (33),(34), (37) и (38) находим $\omega = 0{,}0437$, $\omega_1 = 0{,}1832$, $\tilde{V}_0 = 0{,}0642$ и $\tilde{V}_1 = 0{,}0528$. По формулам (25) и (26) находим $M_\sigma =$ $= 663638$ кгс·см , $M_1 = 2785363$ кгс·см и $N = -184854$ кгс. По формулам (24) и (27) максимальные напряжения и прогиб трубопровода : $\sigma^N_{пр_0} = -1000$ кгс/см^2, $\sigma^N_{пр_1} = -1542$ кгс/см^2, $V_0 =$ $= 3{,}4$ см и $V_1 = 2{,}8$ см . По (28) имеем $l = 1220$ см. Согласно п.п.3.1, 3.3, 3.7, 5.13 прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Глубину заложения трубопровода на изогнутом участке согласно (17) следует принять не менее $h = 0{,}8 + 0{,}03 = 0{,}83$ м .

4) Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Радиус кривизны колен 25 м, длина прямой вставки 11 м .

По формулам (34) и (47), используя значение K для случая исполнения поворота сварным или крутозагнутым коленом, находим $a_\varphi = 0{,}135$ и $c_\varphi = 0{,}581$.

По графику рис.П.5.32 находим $a = 1{,}446$. По графику рис.П.5.21 или по формуле (55) $K = 1{,}525$. Тогда по (34) и (47) $a_\varphi = 0{,}148$ и $c_\varphi = 0{,}596$. При новом приближении имеем $a = 1{,}447$, $K = 1{,}526$, $a_\varphi = 0{,}149$, $c_\varphi = 0{,}598$. Разность между предыдущим и последним значениями c_φ менее 0,01 и приближение заканчиваем.

По графикам рис.П.5.22÷рис.П.5.25 или по формулам (46), (49), (51) и (52) находим $\omega_\varphi = 0{,}02152$, $\omega_l = 0{,}1493$, $\bar{V}_\varphi = 0{,}0566$ и $\bar{V}_l = 0{,}0509$.

По формулам (24), (25), (26) и (27) находим $M_\varphi = 327159$ кгс·см, $M_l = 2269152$ кгс·см, $N = -187512$ кгс, $\sigma''_{np_\varphi} = -925$ кгс/см^2, $\sigma''_{np_l} = -1422$ кгс/см^2, $V_\varphi = 3{,}0$ см и $V_l = 2{,}7$ см. По (28) $l = 1273$ см.

Согласно п.п.3.1, 3.3, 3.7, 5.12 прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

Радиус упругого изгиба оси трубопровода 600 м, длина волны начального прогиба 50 м.

По формуле (69)

$$A_\varphi = \frac{5000^2}{2 \cdot 3{,}14^2 \cdot 60000} = 21{,}1 \text{ см}.$$

Согласно (63) и (64) имеем

$$\beta = 414145 \sqrt{\frac{21{,}1}{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 140600}} = 0{,}910.$$

$$z = \frac{3{,}14 \cdot 21{,}1}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot 8{,}05 \cdot 223}{140600}} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{21{,}1}{14{,}81}\right)^3 \cdot \frac{1}{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 140600}} = 0{,}1$$

Вычислениями по формулам (57) ÷ (70) и по графикам на рис.П.5.39÷рис.П.5.50 находим $\sigma^{н}_{пр} = -2254$ кгс/см^2, $N_{кр} = 933234$ кгс. Прогиб трубопровода незначителен.

Полученные результаты показывают, что прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

Пример 2. Нефтепровод диаметром 1020 мм и толщиной стенки 11 мм уложен в песчаном грунте на глубине 1,0 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, равный 6^0. Внутреннее давление равно 45 кгс/см^2, температурный перепад составляет 60^{0}С. Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны 443900 см^4, 8704 см^3 и 349 см^2. Вес трубы с продуктом 10 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2.

Характеристики грунта: $\gamma_{гр} = 0{,}0012$ кгс/см^3, $\varphi_{гр} = 23^0$ и $c_{гр} = 0$,

Согласно п.3.1 имеем $C = 1$, $K_н = 1$.

Согласно п.3.3 имеем $m = 0{,}9$.

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1) Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

По формулам (7), (10) и (11) $N = 668495$ кгс, $q = 27{,}21$кгс/см и $p = 15{,}25$ кгс/см.

По формулам (12), (13) и (15) $\psi_3 = 0{,}587$, $\psi_3 \frac{C}{K_н} R^{н}_{2} =$ $= 2115$ кгс/см^2 и $\sigma_{кс} = 3384$ кгс/см^2.

По формулам (30) и (31) $\beta = 1{,}059$ и $z = 0{,}912$.

Вычислениями или по соответствующим графикам находим $\omega = -0{,}3748$, $K = 0{,}917$, $\tilde{V} = 0{,}06907$, $M = 14990748$ кгс·см, $N =$ $= -243665$кгс. Продольные сжимающие напряжения $\sigma^{н}_{пр} = -2420$ кгс/см. Прогиб $V = 4{,}4$ см. Длина изогнутого участка $l = 2369$ см.

Согласно (12) прочность трубопровода не обеспечена. Условие (14) выполняется и устойчивость стенки трубы обеспечена.

Имеем $z > 0,1$, поэтому проверка по (16) не требуется и общая устойчивость обеспечена.

2) Поворот выполнен холодногнутым коленом.

Радиус кривизны колена 40 м.

Вычислениями и по соответствующим графикам находим $a = 1,428$, $a_0 = 0,168$, $K = 0,922$, $\omega = 0,2967$ и $\tilde{V} = 0,0675$. Находим $M = 11868753$ кгс·см, $N = -245850$ кгс, $\sigma''_{пр} = -2068$ кгс/см^2, $V = 4,3$ см и $l = 2271$ см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

3) Поворот выполнен двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Длина прямой вставки 14 м.

Вычислениями и по графикам находим $a = 0,941$, $\omega_0 = 0,0269$, $\omega_1 = 0,10762$, $\tilde{V}_0 = 0,0219$, $\tilde{V}_1 = 0,0188$, $C_0 = 0,408$, $K = 0,995$. Тогда имеем $M_0 = 1075905$ кгс·см, $M_1 = 4304718$ кгс·см, $N = -276710$ кгс, $\sigma''_{пр_0} = -917$ кгс/см^2, $\sigma''_{пр_1} = -1287$ кгс/см^2, $V_0 = 1,4$ см, $V_1 = 1,2$ см и $l = 1615$ см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

4) Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Радиус кривизны колен 40 м, длина прямой вставки 9 м.

Вычислениями и по графикам находим: $a = 0,991$, $a_0 = 0,173$, $C_0 = 0,354$, $K = 1,002$, $\omega_0 = 0,0087$, $\omega_1 = 0,0703$, $\tilde{V}_0 = 0,0173$, $\tilde{V}_1 = 0,0157$. Тогда имеем $M_0 = 346243$ кгс·см, $M_1 = 2813387$ кгс·см, $N = -279685$ кгс, $\sigma''_{пр_0} = -841$ кгс/см^2, $\sigma''_{пр_1} = -1125$ кгс/см^2, $V_0 = 1,1$, $V_1 = 1,0$ см и $l = 1516$ см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость

трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

Радиус упругого изгиба оси трубопровода 900 м, длина волны начального прогиба 50 м.

По формуле (69)

$$A_0 = \frac{5000^2}{2 \cdot 3{,}14^2 \cdot 90000} = 14{,}1 \text{ см} .$$

Согласно (63) и (64) имеем $\beta = 0{,}498$ и $Z = 0{,}043$.

Вычислениями по формулам (57) + (70) и по графикам на рис.П.5.39 + рис.П.5.50 находим $\sigma''_{пр} = -2097$ кгс/см^2, $N_{0кр} = 2682482$ кгс. Прогиб незначителен.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

Пример 3. Нефтепровод диаметром 1220 мм и толщиной стенки 14 мм уложен в песчаном грунте на глубине 1,0 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, равный 6^0. Внутреннее давление равно 40 кгс/см^2, температурный перепад составляет 60^0C. Геометрические характеристики трубы: $J = 964700$ см^4, $W = 15810$ см^3, и $F = 530$ см^2. Вес трубы с продуктом 13 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2.

Характеристики грунта: объёмный вес $\gamma_{гр} = 0{,}0012$ кгс/см^3, угол внутреннего трения $\varphi_{гр} = 23^0$, сцепление $C_{гр} = 0$.

Согласно табл.3 нефтепровод относится к III-категории. Тогда имеем $C = 1$, $K_н = 1$ и $m = 0{,}9$.

Расчёт выполним для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1) Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

По формулам (7), (10) и (11) $N_0 = 979911$ кгс, $q = 33{,}47$ кгс/см и $p = 19{,}72$ кгс/см. По формулам (12) и (15)

$\psi_3 \frac{C}{K_н} R_s^н$ = 2244 кгс/см^2 и $\sigma_{кр}$ = 3405 кгс/см^2. По формулам (30) и (31) β = 1,044 χ = 0,449. Вычислениями и по соответствующим графикам находим ω = 0,36005, K = 0,895, $\tilde{V}$ =0,065, M = 25923425 кгс·см, N = - 425036 кгс. Продольные напряжения $\sigma_{пр}^н$ = - 2442 кгс/см^2. Прогиб V = 5,0 см. Длина изогнутого участка l = 2114 см.

Согласно (12) прочность трубопровода не обеспечена. Условие (14) выполняется и устойчивость стенки трубы обеспечена. Имеем $\chi > 0,1$, поэтому проверка по (16) не требуется и общая устойчивость обеспечена.

2) Поворот выполнен холодногнутым коленом.

Радиус кривизны колена 60 м.

Вычислениями и по соответствующим графикам находим a = 1,584, a_0 = 0,241, K = 0,902, ω = 0,2498 и $\tilde{V}$ = 0,0584. Находим M = 17988377 кгс·см, N = - 429560 кгс, $\sigma_{пр}^н$ = = - 1948 кгс/см^2, V = 4,5 см и l = 2104 см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

3) Поворот выполнен двумя сварными или крутовогнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Длина прямой вставки 12 м.

Вычислениями и по графикам находим a = 0,919, ω_0 = 0,026, ω_1 = 0,1041, $\tilde{V}_0$ = 0,0208, $\tilde{V}_1$ = 0,0169, C_0 = 0,398, K = 0,970. Тогда имеем M_0 = 1883171 кгс·см, M_1 = 7493736 кгс·см, N = = - 473069 кгс, $\sigma_{пр0}^н$ = - 101 кгс/см^2, $\sigma_{пр1}^н$ = - 1367 кгс/см^2, V_0 = 1,6 см, V_1 = 1,3 см и l = 1369 см.

4) Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Радиус кривизны колен 60 м, длина прямой вставки 9 м.

Вычислениями и по графикам находим a = 0,991, C_0 = 0,249,

C_0 = 0,3I9, K = 0,984, ω_0 = 0,00I83, ω_1 = 0,053I, $\tilde{V}_0$ = 0,0I4, $\tilde{V}_1$ = 0,0I29. Тогда имеем M_0 = I32362 кгс·см, M_1 = 38I99I9 кгс·см, N = - 48I7I7 кгс, $\sigma^N_{пр0}$ = - 9I7 кгс/см^2, $\sigma^N_{пр1}$ = - II5I кгс/см^2, V_0 = I,I см, V_1 = I,0 см и l = I487 см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

Радиус упругого изгиба оси трубопровода I000 м, длина волны начального прогиба 50 м.

По формуле (69) имеем A_0 = I2,7 см. Согласно (63) и (64) находим β = 0,424 и Z = 0,029.

Вычислениями по формулам (57) ÷ (70) и по графикам на рис.П.5.39 ÷ рис.П.5.50 находим $\sigma^N_{пр}$ = - 2288 кгс/см^2, $N_{0кр}$ = 462I276 кгс. Прогиб незначителен.

Устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Условие (I2) не выполнено. С целью снижения напряжений можно увеличить радиус упругого изгиба трубопровода. Так, например, при ρ = I200 м и l_0 = 50 м имеем A_0 = = I0,6 см, β = 0,387 и Z = 0,023. Продольные напряжения $\sigma^N_{пр}$ = - 2074 кгс/см^2.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

П.I.2. Рациональная разбивка угла поворота.

Нефтепровод диаметром 720 мм и толщиной стенки I0 мм уложен в песчаном грунте на глубине 0,8 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности 9°. Внутреннее давление в трубопроводе равно 50 кгс/см^2, а температурный перепад составляет 70°С. Геометрические характеристики трубы: J = I40600 см^4, W = 3906 см^3 и F = 223 см^2. Вес трубы с продуктом 5,0 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2.

Характеристики грута: объёмный вес $\gamma_{гр} = 0{,}0012$ кгс/см^3, угол внутреннего трения $\varphi_{гр} = 23^0$, сцепление $C_{гр} = 0$.

Согласно табл.3 нефтепровод относится Ш-категории. Для трубопроводов Ш-категории имеем $C = 1$ и $K_н = 1$.

I) Поворот конструируется с использованием сварных или крутозагнутых колен.

Начальное оживающее усилие по формуле (7) $N_0 = 47341$ кгс. Сопротивления поперечным и продольным перемещениям по (10) и (11) $q = 14{,}81$ кгс/см и $\rho = 8{,}05$ кгс/см. Несущая способность трубопровода 2390 кгс/см^2 и критическое напряжение 3479 кгс/см^2.

По формулам (30) и(31) имеем $\beta = 2{,}151$ и $z = 1{,}000$.

По графику рис.П.5.13 при $C_\sigma = 0$ имеем $a = 1{,}945$. Находим по графику рис.П.5.13 или по формуле (41) $K = 2{,}203$. По формуле (72) $C_{\sigma опт} = 0{,}924$. По графику рис.П.5.13 $a = 1{,}936$. Находим $K = 2{,}204$, $C_{\sigma опт} = 0{,}935$. При новом приближении $a = 1{,}937$, $K = 2{,}205$ и $C_{\sigma опт} = 0{,}940$. Разность между предыдущим и последним значениями $C_{\sigma опт}$ менее 0,01 и приближение заканчиваем.

Оптимальная длина прямой вставки равна

$$C_{опт} = 2 \cdot 0{,}940 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2{,}205} \cdot \frac{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 140600}{14{,}81}} \cdot 0{,}0787 = 1679 \text{ см},$$

По графикам рис.П.5.4 и рис.П.5.7 или по формулам (33),(34), (37) и (38) имеем $\omega_0 = 0{,}0186$, $\omega_1 = 0{,}06335$, $\tilde{V}_0 = 0{,}08086$ и $\tilde{V}_1 = 0{,}0661$.

По формулам (24),(25),(26) и (27) имеем $M_0 = 1721320$ кгс·см, $M_1 = 5859954$ кгс·см, $N = -177918$ кгс, $\sigma^н_{пр0} = -1239$ кгс/см^2, $\sigma^н_{пр1} = -2298$ кгс/см^2, $V_0 = 15{,}93$ см и $V_1 = 13{,}02$ см. По (28) $l = 1750$ см.

Согласно п.п.3.1, 3.3, 4.15 прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Глубину заложения трубопровода на изогнутом участке согласно (17) следует принять не менее 0,96 м.

2) Поворот конструируется с использованием холодногнутых колен.

Имеем (при $C_0 = 0$ и $a_0 = 0$) $a = 1{,}945$ и $K = 2{,}203$. По формулам (47) и (72) $C_{0опт} = 0.900$ и $a_0 = 0{,}215$. По графику рис.П.5.34 $a = 2{,}060$. Находим $K = 2{,}240$, $C_{0опт} = 0{,}910$, $a_0 = 0{,}221$. При новом приближении $a = 2{,}066$, $K = 2{,}245$, $C_{0опт} = 0{,}915$ и $a_0 = 0{,}222$. Разность между предыдущим и последним значениями $C_{0опт}$ менее 0,01 и приближение заканчиваем. Оптимальная длина прямой вставки $C_{опт} = 1625$ см.

По графикам рис.П.5.22 и рис.П.5.25 или по формулам (46), (49),(51) и (52) имеем $\omega_0 = 0{,}0078$, $\omega_1 = 0{,}054$, $\tilde{V}_0 = 0{,}0745$ и $\tilde{V}_1 = 0{,}06614$.

По формулам (24),(25),(26) и (27) имеем $M_0 = 722383$ кгс·см, $M_1 = 4995893$ кгс·см, $N = -182375$ кгс, $\sigma^N_{пр_0} = -1003$ кгс/см^2, $\sigma^N_{пр_1} = 2097$ кгс/см^2, $V_0 = 14{,}67$ см и $V_1 = 13{,}03$ см. По (28) имеем $l = 3925{,}4$ см.

Согласно п.п.3.1, 3.3, 4.15 прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

Приложение 2

ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВМ "ЕС-1022"

Нефтепровод диаметром 1020 мм и толщиной стенки 11 мм уложен в песчаном грунте на глубине 1,0 м от верхней образующей трубы. Внутреннее давление равно 45 кгс/см^2. Геометрические характеристики трубы: J = 443900 см^4, W = 8704 см^3, F = 349 см^2. Вес трубы с продуктом 10 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2.

Характеристика грунта: $\gamma_{гр}$ = 0,0012 кгс/см^3, $\varphi_{гр}$ = 23° и $C_{гр}$ = 0.

Согласно п.3.1 имеем C = 1 и $K_н$ = 1.

Температурный перепад изменяется от 40°С до 80°С. Шаг изменения температурного перепада примем 20°С. Угол поворота изменяется от 3° до 15° с шагом 6°.

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1. Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

1) В машину вводятся исходные данные согласно п.п. 10.3 и 10.4. Величины вводятся и печатаются в см, кгс, град., кгс/см^2.

2) Машина печатает название конструкции угла поворота и для контроля всю входную информацию (исходные данные), а также:

несущая способность трубопровода (для случаев $\sigma''_{пр} < 0$ и $\sigma_{пр} > 0$ по формуле (12)), кгс/см^2	2115	3600
кольцевое напряжение, кгс/см^2	2041	
Сопротивление продольным перемещениям трубопровода, кгс/см	15,25	
сопротивление поперечным перемещениям трубопровода, кгс/см	27,21	

критическое напряжение (по формуле (14)), кгс/см^2 3050

3) Печатаются результаты расчёта:

Вариант 1.

Температурный перепад, ^{0}C	40
угол поворота , град.	3
продольное напряжение, кгс/см^2	645
прогиб, см	0,1
начальное сжимающее усилие, кгс	492599
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 134343
изгибающий момент, кгс·см	2264974

Для контроля печатаются безразмерные параметры:

α = 0,509, κ = 0,338, z = 0,121, β^*(по формуле (30)) = 0,492,

β (по формуле (39)) = 0,493.

Прочность обеспечена (условие (12)).

Устойчивость обеспечена (условие (16)).

Устойчивость стенки трубы обеспечена (условие (14)).

Вариант 2.

Температурный перепад, ^{0}C	40
угол поворота, град	9
продольные напряжения, кгс/см^2	- 1867 1571
прогиб, см	4,4
начальное сжимающее усилие, кгс	492599
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 51584
изгибающий момент, кгс·см	14963624

Безразмерные параметры α = 1,181, κ = 0,768, z = 0,912,

β^* = 1,024, β = 1,024.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 3.

Температурный перепад, °С	40
угол поворота, град	I5
продольные напряжения, кгс/см^2	- 2662 2931
прогиб, см	II,7
начальное сжимающее усилие, кгс	492599
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	46970
изгибающий момент, кгс·см	2433813

Безразмерные параметры a = I,306, κ = 0,844, z = 2,343, β^* = I,443, β = I,443.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 4.

Температурный перепад, °С	60
угол поворота, град	3
продольные напряжения, кгс/см^2	- I346 386
прогиб, см	0,3
начальное сжимающее усилие, кгс	668495
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 302I87
изгибающий момент, кгс·см	4I79243

Безразмерные параметры a = 0,800, κ = 0,527, z = 0,I2I, β^* = 0,667, β = 0,667.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 5.

Температурный перепад, °С	60
угол поворота, град	9
продольные напряжения, кгс/см^2	- 3477 2569

прогиб, см 13,7

начальное сжимающее усилие, кгс 668495

продольное усилие на изогнутом участке, кгс - 158317

изгибающий момент, кгс·см 26312480

Безразмерные параметры α = 1,736, κ = 1,092, z = 0,912, β^* = 1,389, β = 16390.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 6.

Температурный перепад, °С 60

угол поворота, град 15

продольные напряжения, кгс/см^2 - 4483 4393

прогиб, см 29,4

начальное сжимающее усилие, кгс 668495

продольное усилие на изогнутом участке, кгс - 15723

изгибающий момент, кгс·см 38631245

Безразмерные параметры α = 1,783, κ = 1,118, z = 2,343, β^* = 1,958, β = 1,959.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 7.

Температурный перепад, °С 60

угол поворота, град 3

продольные напряжения, кгс/см^2 - 2133 - 562

прогиб, см 0,9

начальное сжимающее усилие, кгс 844391

продольное усилие на изогнутом участке, кгс - 470165

изгибающий момент, кгс·см 6838906

Безразмерные параметры α = 1,141, κ = 0,743, z = 0,121, β^* = 0,843, β = 0,844.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 8.

Температурный перепад, °С 80

угол поворота, град 9

продольные напряжения, кгс/см^2 - 5419 4047

прогиб, см 33,5

начальное сжимающее усилие, кгс 844391

продольное усилие на изогнутом участке, кгс - 239407

изгибающий момент, кгс·см 41192266

Безразмерные параметры α = 2,289, κ = 1,363, z = 0,912, β^* = 1,755, β = 1,756.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 9.

Температурный перепад, °С 80

угол поворота, град 15

продольные напряжения, кгс/см^2 - 6441 6095

прогиб, см 58,7

начальное сжимающее усилие, кгс 844391

продольное усилие на изогнутом участке, кгс - 60435

изгибающий момент, кгс·см 54553733

Безразмерные параметры α = 2,208, κ = 1,327, z = 2,343, β^* = 2,473, β = 2,474.

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

2. Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

I) В машину вводятся исходные данные согласно п.п.I0.3 и I0.".

2) Машина печатает название конструкции угла поворота и для контроля всю входную информацию, а также:

несущая способность трубопровода, кгс/см^2	2II5	3600
кольцевое напряжение, кгс/см^2	204I	
сопротивление продольным перемещениям трубопровода, кгс/см	I5,25	
сопротивление поперечным перемещениям трубопровода, кгс/см	27,2I	
критическое напряжение, кгс/см^2	3050	

3) Печатаются результаты расчёта.

Вариант I.

Температурный перепад, °С	40	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения (σ''_{np_0} и σ''_{np_1}), кгс/см^2	- 406	- 44I
прогиб (V_0 и V_1), см	0,03	0,02
длина прямой вставки, см	298	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- I38384	
изгибающий момент (M_0 и M_1), кгс·см	85795	386055

Безразмерные параметры a = 0,353, c_0 = 0,I08, a_0 = 0,076, κ = 0,342, z = 0,I2I, β'' = 0,492, β = 0,493.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 2.

Температурный перепад, °С	40	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 229	- 560
прогиб, см	I,2	I,2
длина прямой вставки, см	834	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 93795	
изгибающий момент, кгс·см	I72064	2534596

Безразмерные параметры a = 0,900, c_0 = 0,290, c_0=0,2I8, κ = 0,892, z = 0,9I2, β^*= I,024, β = I,023.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 3.

Температурный перепад, °С	40	
угол поворота, град	I5	
продольные напряжения, кгс/см^2	- II5	- 577
прогиб, см	4,3	4,2
длина прямой вставки, см	II72	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 27895	
изгибающий момент, кгс·см	306445	4330313

Безразмерные параметры a = I,I8I, c_0 = 0,374, c_0=0,337, κ = I,I74, z = 2,343, β^*= I,443, β = I,444.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 4.

Температурный перепад, ^0C	60	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 965	- 979
прогиб, см	0,09	0,08
длина прямой вставки, см	435	
начальное сжимающее усилие, кгс	668495	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 309072	
изгибающий момент, кгс·см	171636	811452

Безразмерные параметры a = 0,541, a_0 = 0,183, a_0 = 0,088, κ = 0,536, z = 0,121, β^* = 0,667, β = 0,667.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 5.

Температурный перепад, ^0C	60	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 704	- 1268
прогиб, см	3,8	3,6
длина прямой вставки, см	1218	
начальное сжимающее усилие, кгс	668495	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 234065	
изгибающий момент, кгс·см	288271	520497

Безразмерные параметры a = 1,316, a_0 = 0,483, a_0 = 0,250, κ = 1,344, z = 0,912, β^* = 1,389, β = 1,390.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 6.

Температурный перепад, °С	60	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 423	- 1349
прогиб, см	11,9	11,5
длина прямой вставки, см	1650	
начальное сжимающее усилие, кгс	668495	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 127051	
изгибающий момент, кгс·см	515708	869751

Безразмерные параметры a = 1,627, c_0 = 0,591, a_0 = 0,378, κ = 1,662, z = 2,343, β^* = 1,958, β = 1,956.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 7.

Температурный перепад, °С	80	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 1404	- 1533
прогиб, см	0,2	0,2
длина прямой вставки, см	577	
начальное сжимающее усилие, кгс	843391	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 479319	
изгибающий момент, кгс·см	270218	1385931

Безразмерные параметры a = 0,748, c_0 = 0,273, a_0 = 0,099, κ = 0,756, z = 0,121, β^* = 0,843, β = 0,841.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 8.

Температурный перепад, °С	80	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 1101	- 2039
прогиб, см	8,9	8,3
длина прямой вставки, см	1592	
начальное сжимающее усилие, кгс	844391	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 364797	
изгибающий момент, кгс·см	481761	8649418

Безразмерные параметры α = 1,734, C_0 = 0,698, a_0 =0,276, κ = 1,818, z = 0,912, β'' = 1,755, β = 1,754.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 9.

Температурный перепад, °С	80	
угол поворота, град	15	
продольные напряжения, кгс/см^2	- 677	- 2200
прогиб, см	25,3	24,1
длина прямой вставки, см	2099	
продольное сжимающее усилие, кгс	844391	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 214443	
изгибающий момент, кгс·см	544455	13803202

Безразмерные параметры α = 2,047, C_0 = 0,818, a_0 = 0,410, κ = 2,137, z = 2,343, β'' = 2,473, β = 2,474.

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Приложение 3

ПРОГРАММЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НА ЭЦВМ "НАИРИ - 2"

П.3.1.Программа расчёта поворота трубопровода,оформленного крутозагнутым или сварным коленом и прямой вставкой

ап

i = з м ц с г l л π δ а $\tilde{v}$ й ж ъ н ы

1. Введём ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ m $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$ $л_3$ c_2 щ s t c_1
2. Допустим $a = 0$ $c_0 = 0{,}0001$
3. Вычислим $y = л_1(0{,}8л_2(ф+2б)(ц_2+ б(ф/2- 0{,}39(ф+2б))) +$
   $+ (0{,}8л_2(ц_2+б+ф/2)^2 tg\, 0{,}7л_3) + 0{,}8c_2(ц_2+б+ф/2)/\cos 0{,}7л_3)$
4. Вычислим $\pi_1 = 25{,}2\ чt + 0{,}3141\, g\, ф^2$
5. Вычислим $з = щ(-0{,}2926(\exp((1/3)\ln(ц_2/(ф+2б)))) +$
   $+ (0{,}6483\sqrt{(ц_2/(ф+2б))}) + 0{,}05) + s(-0{,}4733/\exp((1/3)\ln$
   $(ц_2/(ф+2б)))) + (0{,}8335\sqrt{(ц_2/(ф+2б))}) + 0{,}09)$
6. Вычислим $p = 0{,}8л_1 tg\, л_3 + 5{,}024л_2 з(ф+2б)^2 tg\, л_3 + 1{,}5072c_2(ф+2б)$
7. Вычислим $\delta_1 = \pi_1 \exp((1/3)\ln(tg^2 f/21\cdot 10^5 и\ y^2))$
8. Вычислим $Z = \sqrt{(2pч\, tg^2 f/\ yи)}\cdot\exp((1/3)\ln(21\cdot 10^5 и\ tg\, f/y))$
9. Вставим $a = a + 0{,}25$
10. Вычислим $x = c_0-(((a-c_0)\cos a - \sin a - tg\, c_0)/(1-\cos a + \sin a\, tg\, c_0))$
11. Вычислим $c_0 = (c_1/2)(\exp(((1/3)\ln(xy/21\cdot 10^5 tg\, f)))$

При выполнении поворота только сварным или крутозагнутым коленом c_0-не вычисляется,остаётся постоянным,равным $c_0 = 0{,}0001$.

12. Вычислим $й_0 = (a/\exp((4/3)\ln x)((1 + a\sin c_0)((x-c_0)\sin a -$
    $- 1)/(a\cos a\cdot\cos c_0) + (a/2) + (1/a) + 2c_0^2 - x + c_0/2a)$
13. Вычислим $й_1 = (a/\exp((4/3)\ln x))(((\cos c_0 + a\sin c_0)/$
    $(a\cos a\cdot\cos c_0)))(((x-c_0)\sin a - 1) - a/2 - 1/a - 2c_0 - x))$
14. Вычислим $\delta_2 = (\exp((2/3)\ln x)) + Z(\sqrt{(й_1 + (\sqrt{(й_0-й_1)^2}) +}$
    $+ (((9{,}8596/16c_0)(\exp((1/3)\ln x)))((2(й_0-й_1)^2) + (й_1^2 c_0/a)))))$
15. Если $\delta_2-\delta_1 < 0$ идти к 9

16.Вставим $a = a - 0{,}0001$

17.Вычислим x

18.Вычислим c_0. При выполнении поворота только сверным или крутозагнутым коленом c_0 не вычисляется, остаётся постоянным, равным $c_0 = 0{,}0001$.

19.Вычислим $ц_1$

20.Вычислим $ц_0$

21.Вычислим $б_2$

22.Если $б_1 - б_2 < 0$ идти к 16

23.Вычислим $x_0 = (1/\exp((2/3)\ln x))((x - c_0)\sin a - 1)/(\cos a \cdot \cos c_0)) + 1)$

24.Вычислим $x = (1/(\exp((2/3)\ln x)))(((x - c_0)\sin a - 1)/\cos a + 1)$

25.Вычислим $b_0 = (\exp((1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и)))(\exp((2/3)\ln(xy/\operatorname{tg} ф)))/ч + x_0(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(21 \cdot 10^5 и \operatorname{tg} ф)))/ш$

26.Вычислим $b_1 = (\exp((1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и)))(\exp((2/3)\ln(xy/\operatorname{tg} ф)))/ч + x(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(21 \cdot 10^5 и \operatorname{tg} ф)))/ш$

27.Вычислим $h_0 = h_0(\exp((1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и \operatorname{tg}^4 ф / y)))$

28.Вычислим $h_1 = h_1(\exp((1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и/y))(\exp(4/3)\ln(\operatorname{tg} ф)))$

29.Вычислим $h_2 = (м_2 м_1/м_3)(\sqrt{}(1 - 0{,}75(g ф м_2/2 б м_2 м_1)^2)) - (0{,}5\, g ф м_2/2 б м_2 м_1)$

30.Вычислим $\pi_2 = m(2{,}9285z^6 + 1{,}0270z + 1{,}3505)(\sqrt{}(\exp(1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и(y/\operatorname{tg} ф)^3)))$

31.Вычислим $l = (a(\exp(1/3)\ln(21 \cdot 10^5 и(\operatorname{tg} ф)/xy)))$

32.Вычислим $н_1 = (((8{,}26\ б/(ф+б)) + 0{,}85)\ м_1 m)$

33.Вычислим $н_2 = m(ц_2 - ц_1)$

34.Печатаем с 4 знаками $b_0\ b_1\ н_2\ м_1$

35.Печатаем с 4 знаками $h_0\ h_1\ h_2\ l$

36.Печатаем с 4 знаками $\pi_1\ \pi_2\ y\ p$

37.Идти к 1

38.Конец

Испытан 1.

II.3.2. Программа расчёта поворота трубопровода, оформленного холодногнутым коленом и прямой вставкой

ап

i = з м ц с г l л ж в е ў й ж ь н ы

I. Введём ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ m $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$ $л_3$ $с_2$ щ s f $г_1$ $с_1$

2. Допустим $а = 0{,}25$ $с_0 = 0{,}000I$ $о = 0{,}000I$

3. Вычислим $у = л_1(0{,}8л_2(ф+2б)(ц_2+б(ф/2 - 0{,}39(ф+2б))) + (0{,}8л_2(ц_2+б+ф/2)^2 tg\, 0{,}7л_3) + 0{,}8с_2(ц_2+б+ф/2)/\cos 0{,}7л_3)$

4. Вычислим $\pi_1 = 25{,}2чt + 0{,}3I4Igф^2$

5. Вычислим $з = щ(-0{,}2926(\exp((I/3)\ln(ц_2/(ф+2б))))+(0{,}6483\sqrt{(ц_2/(ф+2б))})+0{,}05)+ s(-0{,}4733/\exp((I/3)\ln(ц_2/(ф+2б)))) + (0{,}8335\sqrt{(ц_2/(ф+2б))}) + 0{,}09)$

6. Вычислим $р = 0{,}8л_1 tg\, л_3+5{,}024л_3 з(ф+2б)^2 tg\, л_3+I{,}5072с_2(ф+2б)$

7. Вычислим $в_1 = \pi_1(\exp((I/3)\ln(tg^2 f/2I\cdot I0^5 иу^2)))$

8. Вычислим $z = (\sqrt{(2рч(tg^3 f)/ уи)})(\exp((I/3)\ln(2I\cdot I0^5 и(tg f)/у)))$

9. Вычислим $х = (а-tg\, а+с_0(2-I/\cos а)-tg\, с_0(I+с_0 \sin а)/\cos а)/(I+(\sin(а-о))/о-tg\, а(\cos(а-о))/о+(tg\, с_0/о)(I-(\cos(а-о))/о))$

I0. Вставим $а = а + 0{,}25$

II. Вставим $с_0 = (с_1/2)(\exp((I/3)\ln(xy/2I\cdot I0^5 и\, tg f)))$

I2. Вычислим $о = г_1(\exp((I/3)\ln(xy/2I\cdot I0^5 и)))(\exp((2/3)\ln(tg f)))$

При вычислении поворота одним холодногнутым коленом $С_0$ – не вычисляется, остаётся постоянным, равным $С_0 = 0{,}000I$

I3. Вычислим $х$

I4. Вычислим $й_1 = (а/(\exp((4/3)\ln х)))(((\cos с_0+а\sin с_0)/(а(\cos а)(\cos с_0)))(I-\cos(а-о)/\cos а)+(I+а^2/2-I/\cos а-с_0 tg\, а+2ас_0-а tg с_0/\cos а-ас_0 tg\, а\, tg с_0)/х$

I5. Вычислим $й_0 = (I/(\exp((I/3)\ln х)))(\cos(а-о)(I+а\sin с_0)/о\cos а\cos с_0-I/о\cos с_0-а+о/2а-а tg с_0/о+(I/х)(I+а^2/2-I/\cos а\cos с_0 -$

$-c_0 tg\,a/(x\cos c_0)-a tg\,c_0/\cos(a-c_0)\,tg\,a\,tg\,c_0-c_0^2/2a\cos a\cos c_0 -$
$-2ac_0/(\cos a\cos c_0)))$

16. Вычислим $\delta_2 = (\exp((2/3)\ln x))+z(\sqrt{}(\mu_1+(\mu_0-\mu_1)^2)+(((9,8596/16c_0)(\exp((1/3)\ln x)))((2(\mu_0-\mu_1)^2)+(\mu_1^2 c_0/a)))))$

17. Если $\delta_2-\delta_1<0$ идти к 10

18. Вставим $a = a - 0,001$

19. Вычислим x

20. Вычислим c_0

21. Вычислим $o = r_1(\exp((1/3)\ln(yx/21\cdot 10^5 м)))(\exp((2/3)\ln(tg\varphi)))$
При выполнении поворота одним холодногнутым коленом C_o – не вычисляется, остаётся постоянным, равным $C_o = 0,0001$

22. Вычислим μ_1

23. Вычислим μ_0

24. Вычислим δ_2

25. Если $\delta_1-\delta_2<0$ идти к 18

26. Вычислим $x_0 = (1/\exp((2/3)\ln x))((1/\cos a\cos c_0)(1+c_0\sin a) -$
$-(x/(\cos c_0)o)(\cos(a-o)/\cos a)-1)$

27. Вычислим $x = (1/\exp((2/3)\ln x))((1+c_0\sin a)/\cos a-(x/o)((\cos(a-$
$-o)/\cos a-1)-1)$

28. Вычислим $x_0 = (\exp((1/3)\ln(21\cdot 10^5 м)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg\varphi)))/ч + x_0(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)(\ln(21\cdot 10^5 к\,tg\varphi))))/м$

29. Вычислим $x_1 = (\exp((1/3)\ln(21\cdot 10^5 м)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg\varphi)))/ч + x(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)(\ln(21\cdot 10^5 м\,tg\varphi))))/м$

30. Вычислим $\mu_0 = \mu_0(\exp((1/3)(\ln(21\cdot 10^5 м\,tg^6\varphi/y))))$

31. Вычислим $\mu_1 = \mu_1(\exp((1/3)(\ln(21\cdot 10^5 м\,tg^6\varphi/y))))$

32. Вычислим $\mu_2 = (\mu_3 м_1/\mu_2)(\sqrt{}(1-0,75(g\phi м_2/2бм_3 м_1)^2)) -$
$-(0,5\,g\phi м_2/2бм_3 м_1)$

33. Вычислим $\pi_2 = m(2,9285z^2+1,0270z+1,3505)(\sqrt{}(\exp(1/3)\ln(21\cdot 10^5 м(x/tg\varphi)^3)))$

34. Вычислим $l = (a(\exp(1/3)\ln(21\cdot 10^5 м(tg\varphi)/xy)))$

85.Вычислим $м_1 = (((8{,}26\sigma/(\phi+\sigma))+0{,}85)м_1 m)$

36.Вычислим $н_2 = m(ц_2 - ц_1)$

37.Печатаем с 4 знаками $ъ_0$ $ъ_1$ $м_2$ $м_1$

38.Печатаем с 4 знаками $н_0$ $н_1$ $н_2$ l

39.Печатаем с 4 знаками π_1 $у$ $р$

40.Идти к I

4I.Кончаем

Исполним I

П.3.3. Программе расчета поворота трубопровода, оформленного свободным изгибом трубопровода

ап

i = з м ц с г l л π δ а $\tilde{у}$ й ж ъ н ы б

I. Введём ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ m $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$ $л_3$ $с_2$ щ ε l_0 r_2

2. Допустим $а = 0{,}I$ $о = 0{,}000I$ $\sigma = 0{,}005$ $х = 0{,}I$ $к = 0$

3. Вычислим $\pi_1 = 25{,}2\ чt + 0{,}3I4I6\ g\phi^2$

4. Вычислим $н_3 = ((l_0^2)/(I9{,}7392 r_2))$

5. Вычислим $\delta_1 = ((\pi_1/(2I\cdot I0^5 и))(\sqrt{}(2I\cdot I0^5 и\cdot н_3/у)))$

6. Вычислим $z = 0{,}7854\ н_3(\sqrt{}((2рч/и)(\exp((I/4)\ln((н_3/у)^3(I/$
$/(2I\cdot I0^5 к)))))))$

7. Вставим $а = а + 0{,}I$

8. Если $а - о > 0$ идти к I4

9. Вычислим $о = (l_0/2)(\exp((I/4)\ln((ху)/(2I\cdot I0^5 н_3 к))))$

I0.Вычислим $х = 2((а-(\operatorname{tg} а))(3{,}I4I6^2 - о^2))/((3{,}I4I6(\cos(3{,}I4I6а/$
$/о)))(3{,}I4I6(\operatorname{tg} а) - о(\operatorname{tg}(3{,}I4I6а/о))))$

II.Вычислим $и = ((I/х)(I+(а^2/2)-(I/(\cos а))))+(0{,}5)(\cos(3{,}I4I6$
$(а/о)))+((о^2/(2(3{,}I4I6^2 - о^2)))(I-((3{,}I4I6/о)^2(\cos(3{,}I4I6$
$(а/о)))/(\cos а))))$

I2.Вычислим $\delta_2 = (\sqrt{}х) + z\sqrt{}(((\exp((I/4)\ln х))/а)(и^2 + (2и(\sin$
$(3{,}I4I6\ а/(2о)))^2)))$

I3.Если a - o < 0 идти к I9

I4.Вычислим o = (l_0/2)(exp((I/4)ln((xy)/(2I·$10^5$$н_3$и))))

I5.Вычислим x = (a-(tg a))/(((4,9298(cos (a-o)))/(9,8596-o^2))((tg(a-o))-(tg a)))

I6.Вычислим й = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(cos a))))-(0,5)+(((o^2/(I9,7392-2o^2))(I+((3,I4I6/o)^2((cos (a-o))/(cos a)))))

I7.Вычислим $й_3$= ((I/x)(I+(a^2/2)-(o^2/2)-((cos o)/(cos a)))) + + ((9,8596/(I9,7392 - 2o^2))(((((cos o)(cos (a-o)))/(cos a)))-I))

I8.Вычислим $б_2$ = (exp(I/4)ln x^8)+z(√(((exp(I/8)ln(x^6))/o)(√((I+й-$й_3$)^2+(((I4й)^2(o/a)(I-(o/a)+(I/6,2832)(sin (6,2832 o/a)))) - I)))))

I9.Вставим к = к + I

20.Если к - I0 < 0 идти к 7

2I.Если $б_2$ - $б_1$ < 0 идти к 7

22.Вставим a = a - $б_1$

23.Если a - o > 0 идти к 30

24.Вычислим o = (l_0/2)(exp((I/4)ln((xy)/(2I·$10^5$$н_3$и))))

25.Вычислим x = 2((a-(tg a))(3,I4I6^2 - o^2))/((3,I4I6(cos (3,I4I6 a/o)))(3,I4I6(tg a)-o(tg (3,I4I6a/o))))

26.Вычислим й = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(cos a))))+(0,5)(cos (3,I4I6 (a/o)))+((o^2/(2(3,I4I6^2 - o^2)))(I-((3,I4I6/o)^2(cos (3,I4I6 (a/o))))/(cos a))))

27.Если й - 0, 00000001 < 0 идти к 47

28.Вычислим $б_3$= (√x) +z√(((exp((I/4)ln x))/a)($й^2$+(2$й_0$(sin (3,I4I6 a/(2o)))^2)))

29.Если a - o < 0 идти к 4I

30.Вычислим o = (l_0/2)(exp((I/4)ln((xy)/(2I·$10^5$$н_3$и))))

3I.Вычислим x = (a-(tg a))/(((4,9298(cos (a-o)))/(9,8596-o^2))((tg(a-o))-(tg a)))

32.Вычислим й = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(cos a))))-(0,5)+(((o^2/(I9,7392-2o^2))(I+((3,I4I6/o)^2((cos (a-o))/(cos a)))))

33.Если й - 0,000001 < 0 идти к 47

34.Вычислим δ_2= ((I/x)(I+(a^2/2)-(o^2/2)-((cos o)/(cos a)))) +
+ ((9,8596/(I9,7392 - 2o^2))(((((cos o)(cos (a-o)))/(cos a)))-I))

35.Вычислим δ_2= (exp(I/4)lnx^2) + Z(√(((exp(0,8)ln(x^2))/o)(√
((I+й-$й_3$)^2+(((I+й)^2(o/a)(I-(o/a)+(I/6,2832)(sin (6,2832
o/a)))) - I)))))

36.Если б - 0,09 < 0 идти к 40

37.Если a - a < 0 идти к 23

38.Идти к 57

39.Вставим a = a + $б_1$

40.Если a - o > 0 идти к 43

4I.Вычислим ж = (I/(√x))((I/(cos a))-I+((4,9298x/(9,8596-o^2))
(((cos (3,I4I6 a/o))/(cos a)) - I)))

42.Идти к 44

43.Вычислим ж = (I/(√x))((I/(cos a)) - I - ((4,9298x/(9,8596 -
- o^2))(((cos (a-o))/(cos a)) + I)))

44.Вычислим ъ = ((√(2I·I0^{6}и xy/$н_э$))-(0,7854 g$ф^2$)/ч)-((
(√(2I·I0^5$н_э$иу)))/и)+((2I·I0^5(ф+2б))/(2$r_д$))

45.Если δ_1-δ_2<0 идти к 22

46.Идти к 49

47.Вычислим ъ = (π_1 - 0,7854 g$ф^2$)/ч)+((2I·I0^5(ф+2б))/(2$r_д$))

48.Допустим й = 0 ж = 0

49.Вычислим н = й · $н_д$

50.Вычислим l = 2a(exp(I/4)ln(2I·I0^{6}и $н_э$/ xy))

5I.Печатаем с 9 знаками ъ $м_д$ $н_1$

52.Печатаем с 9 знаками н $н_д$ l

53.Печатаем с 9 знаками π_1 у p

54.Допустим a = 2,5 $б_1$ = 0,I

55.Идти к 23

56.Вычислим π_2=δ_2(√(2I·I0^{5}и у/ $н_э$))

57.Печатаем с 4 знаками π_2 δ_2

58.Идти к I

59.Кончаем

Исполним I

П.3.4. Программе решения задачи по рациональной разбивке поворотов с использованием отворных или крутозагнутых колен

ап

l = з ъ ц о г l л ѫ б а ў й ж ь ы

I. Введем ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ т $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$ $л_3$ $с_2$ ц з t $с_1$

2. Допустим з = 0 c_0 = 0,0001

3. Вычислим у = $л_1$(0,8$л_3$(ф+2б)($ц_2$+б(ф/2)-0,39(ф+2б)))+(0,8$л_3$ ($ц_2$+б+ф/2)^{2}tg 0,7$л_3$)+0,8$с_2$($ц_2$+б+ф/2)/cos0,7$л_3$)

4. Вычислим $ѫ_1$ = 25,2vt + 0,3I4I gф^2

5. Вычислим з = ш(-0,2926(exp((I/3)ln($ц_2$/(ф+2б))))+(0,6483$\sqrt{}$($ц_2$/(ф+2б)))+0,05)+ s(-0,4733/exp((I/3)ln($л_2$/(ф+2б))))+(0,8335 $\sqrt{}$($ц_2$/(ф+2б)))+0,09)

6. Вычислим р = 0,8$л_1$tg $л_3$+5,024$л_2$ з(ф+2б)^{2}tg $л_3$+I,5072$с_2$(ф+2б)

7. Вычислим $б_1$ = $ѫ_1$ exp((I/3)ln(tg^2 ѓ (2I·I0^{5}и у^2))

8. Вычислим z = $\sqrt{}$(2рvtg^{3}ѓ/ ун)exp((I/3)ln(2I·I0^{5}иtg ѓ / у))

9. Заставим а = а + 0,25

I0. Вычислим х = $с_0$-(((о-$с_0$)cos а- sin а-tg$с_0$)/(I-cos а+ sinатg$с_0$))

II. Если а - 2,7 ≤ 0 идти к I4

I2. Вычислим $с_0$= 0,7346 а^2 - 5,8768а + II,9286

I3. Идти к I5

I4. Вычислим $с_0$= 0,05I4а^2+ 0,3858а

I5. Вычислим $и_1$= (а/exp((4/3)lnх))(((cos $с_0$+а sin$с_0$)/(а cos а cos $с_0$)))(((х-$с_0$)sin а-I)-а/2-I/а-2$с_0$-х))

I6. Вычислим $и_0$= (а/exp((4/3)lnх)((I+а sin $с_0$)((х-$с_0$)sinа-I)/ (а cosа cos$с_0$)+(а/2)+(I/а)+2$с_0$-х+$с_0^2$/2а)

I7. Вычислим $б_2$=(exp((2/3)lnх))+ z($\sqrt{}$($и_1$+($\sqrt{}$($и_0$-$и_1$)^2)+(((9,8596/ I6$с_0$)(exp((I/3)lnх)))((2($и_0^2$-$и_0^2$)^2) + ($и_1^2$$с_0$/а)))))

I8.Если $b_2-b_1<0$ идти к 9

I9.Вставим a = a - 0,0001

20.Вычислим x

2I.Если a - 2,7 < 0 идти к 24

22.Вычислим $c_0 = 0{,}7346a^2 - 5{,}8768a + 11{,}9286$

23.Идти к 26

24.Вычислим $c_0 = 0{,}0514a^2 + 0{,}3858a$

25.Вычислим $\bar{n}_1$

26.Вычислим $\bar{n}_0$

27.Вычислим b_2

28.Если $b_1-b_2<0$ идти к I9

29.Вычислим $x_0 = (1/\exp((2/3)\ln x))((x-c_0)\sin a - 1)/(\cos a \cos c_0)) + 1)$

30.Вычислим $x = (1/(\exp((2/3)\ln x)))(:(x-c_0)\sin a - 1)/\cos a + 1)$

3I.Вычислим $b_0 = (\exp((1/3)\ln(2I\cdot I0^5 м)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg\phi)))/ч + x_0(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I\cdot I0^5 м\, tg\phi)))/м$

32.Вычислим $b_1 = (\exp((1/3)\ln(2I\cdot I0^5 м)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg\phi)))/ч + x(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I\cdot I0^5 м\, tg\phi)))/ м$

33.Вычислим $n_0 = \bar{n}_0(\exp((1/3)\ln(2I\cdot I0^5 м\, tg^4\phi/y)))$

34.Вычислим $n_1 = \bar{n}_1(\exp((1/3)\ln(2I\cdot I0^5 м/y))(\exp(4/3)\ln(tg\phi)))$

35.Вычислим $m_2 = (m_3 m_1/m_3)(\sqrt{}(I-0{,}75(g\phi m_3/2\sigma m_3 m_1)^2))(0{,}5g\phi m_2/2\sigma m_3 m_1)$

36.Вычислим $\pi_3 = m(2{,}9285z^2 + I{,}0270z + I{,}3505)(\sqrt{}(\exp(I/3)\ln(2I\cdot I0^5 м(\ y/tg\phi)^3)))$

37.Вычислим $l = (a(\exp(I/3)\ln(2I\cdot I0^5 м\ (tg\phi)/\ xy\ )))$

38.Вычислим $n_1 = (((8{,}26\sigma/(\phi+\sigma))+0{,}85)m_1 m)$

39.Вычислим $n_2 = m(n_2 - n_1)$

40.Вычислим $c_1 = (2c_0)((\exp(I/3)\ln(2I\cdot I0^5 м\ (tg\phi)/xy)))$

4I.Печатаем с 4 знаками b_0 b_1 m_2 m_1

42.Печатаем с 4 знаками n_0 n_1 l c_1

43.Печатаем с 4 знаками π_1 y p

44.Идти к I

45.Кончаем

Исполним I.

П.3.5. Программа решения задачи по рациональной разбивке поворотов с использованием холодногнутых колен

ап

l = а м ц о г l л π $\hat{b}$ а $\tilde{v}$ й ж ь н ы

I. Введём ф б и ч ш $м_1$ $м_2$ $м_3$ m $ц_1$ $ц_2$ g t $л_1$ $л_2$ $л_3$ c_2 щ s f r_1 c_1

2. Допустим $a = 0{,}25$ $c_0 = 0{,}0001$ $c = 0{,}0001$

3. Вычислим $y = л_1(0{,}8л_2(ф+2б)(ц_2+б(ф/2-0{,}39(ф+2б)))+(0{,}8л_2(ц_2+ + б+ф/2)^2 tg\, 0{,}7л_3)+0{,}8c_2(ц_2+б+ф/2)/\cos 0{,}7л_3)$

4. Вычислим $\pi_1 = 25{,}2\ чt + 0{,}3141\ gф^2$

5. Вычислим $з = щ(-0{,}2926(\exp((1/3)\ln(ц_2/(ф+2б))))+(0{,}6483 \sqrt{(ц_2/(ф+2б))}+0{,}05)+ s(-0{,}4733/\exp((1/3)\ln(ц_2/(ф+2б)))) + + (0{,}8335\sqrt{(ц_2/(ф+2б))}+0{,}09)$

6. Вычислим $p = 0{,}8л_1 tg\, л_3+5{,}024л_3 з(ф+2б)^2 tg\, л_3+1{,}5072c_2/(ф+2б)$

7. Вычислим $\hat{b}_1 = \pi_1(\exp((1/3)\ln(tg^2 f/21\cdot 10^5 и\ y^2)))$

8. Вычислим $z = (\sqrt{(2рч(tg^3 f)/уи)})(\exp((1/3)\ln(21\cdot 10^5 и\ (tg f)/y)))$

9. Вычислим $x = (a-tg\, a+c_0(2-1/\cos a)-tg\, c_0(1+c_0 \sin a)/\cos a)/(1+ +(\sin(a-o))/o-tg\, a(\cos(a-o))/o+(tg\, c_0/o)(1-(\cos(a-o))/o))$

10.Вставим $a = a + 0{,}25$

11.Если $a - 2{,}7 - 2a_0 \leq 0$ идти к 14

12.Вычислим $c_0 = 0{,}7346a^2 - 5{,}8768a - 2{,}7320a_0^2 + 4{,}6904a_0 + 11{,}9286$

13.Идти к 15

14.Вычислим $c_0 = 0{,}0514a^2 + 0{,}3858a - 0{,}4555a_0$

15.Вычислим $o = r_1(\exp((1/3)\ln(xy/21\cdot 10^5 и)))(\exp((2/3)\ln(tg f)))$

16.Вычислим x

17.Вычислим $\hat{и}_1 = (a/(\exp((4/3)\ln x)))(((\cos c_0 + a \sin c_0)/(a(\cos a)$

$(\cos c_0)))(I-\cos(a-o)/\cos a)+(I+a^2/2-I/\cos a-c_0 tg a+2ac_0-$
$-a tg c_0/\cos a-ac_0 tg a tg c_0)/x$

18. Вычислим $R_0=(I/(\exp((I/3)\ln x)))(\cos(a-o)(I+a\sin c_0)/o\cos a$
$\cos c_0-I/o\cos c_0-a+o/2a-atgc_0/o+(I/x)(I+a^2/2-I/$
$\cos a\cos c_0-c_0 tg a/(x\cos c_0)-atgc_0/\cos(a-c_0)tg atgc_0-$
$-c_0^2/2a\cos a\cos c_0-2ac_0/(\cos a\cos c_0)))$

19. Вычислим $b_2=(\exp((2/3)\ln x))+z(\sqrt{(R_1+(R_0-R_1)^2)}+$
$+(((9,8596/I6c_0)(\exp((I/3)\ln x)))((2(R_0-R_1)^2)+(R_1^2c_0/a)))))$

20. Если $b_2-b_1<0$ идти к I0

21. Вставим $a=a-0,00I$

22. Вычислим x

23. Если $a-2,7-2a_0\leqslant 0$ идти к 26

24. Вычислим $c_0=0,7346a^2-5,8768a-2,7320a_0^2+4,6904a_c+II,9286$

25. Идти к 27

26. Вычислим $c_0=0,05I4a^2+0,3858a-0,4555a_0$

27. Вычислим $o=r_1(\exp((I/3)\ln(yx/2I\cdot I0^5 u)))(\exp((2/3)\ln(tg f)))$

28. Вычислим R_1

29. Вычислим R_0

30. Вычислим b_2

31. Если $b_1-b_2<0$ идти к 2I

32. Вычислим $x_0=(I/\exp((2/3)\ln x))((I/\cos a\cos c_0)(I+c_0\sin a)-$
$-(x/(\cos c_0)o)(\cos(a-o)/\cos a)-I)$

33. Вычислим $x=(I/\exp((2/3)\ln x))((I+c_0\sin a)/\cos a-$
$-(x/o)((\cos(a-o)/\cos a-I)-I)$

34. Вычислим $b_0=(\exp((I/3)\ln(2I\cdot I0^5 u)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/ч+$
$+x_0(\exp((I/3)\ln y))(\exp((2/3)(\ln(2I\cdot I0^5 u tg f)))))/ш$

35. Вычислим $b_1=(\exp((I/3)\ln(2I\cdot I0^5 u)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/ч+$
$+x(\exp((I/3)\ln y))(\exp((2/3)(\ln(2I\cdot I0^5 u tg f)))))/ш$

36. Вычислим $R_0=R_0(\exp((I/3)(\ln(2I\cdot I0^5 u tg^4 f/y))))$

37. Вычислим $R_1=R_1(\exp((I/3)(\ln(2I\cdot I0^5 u tg^4 f/y))))$

38.Вычислим $ы_2 = (м_3 м_1 / м_2)(\sqrt{(1 - 0{,}75(g ф м_2 / 2б м_3 м_1)^2)}) -$
$- (0{,}5 g ф м_2 / 2б м_3 м_1)$

39.Вычислим $\pi_2 = m(2{,}9285 z^2 + 1{,}0270 z + 1{,}3505)(\sqrt{(\exp(1/3) \ln (2 \cdot 10^5 и (y/tg f)^3)})$

40.Вычислим $l = (a(\exp(1/3) \ln(2 \cdot 10^5 и (tg f)/ xy)))$

41.Вычислим $ы_1 = (((8{,}26б/(ф+б)) + 0{,}85) м_1 m)$

42.Вычислим $н_2 = m(ц_2 - ц_1)$

43.Вычислим $c_1 = (2c_0)((\exp(1/3) \ln(2 \cdot 10^5 и (tg f)/ xy)))$

44.Печатаем с 4 знаками $ь_0$ $ь_1$ $ы_2$ $ы_1$

45.Печатаем с 4 знаками $н_0$ $н_1$ l c_1

46.Печатаем с 4 знаками π_1 y p

47.Идти к 1

48.Кончаем

Исполним 1.

Приложение 4

ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВМ "НАИРИ-2"

Нефтепровод диаметром 1220 мм и толщиной стенки 14 мм уложен в песчаном грунте на глубине 1,2 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, равный 12^0. Внутреннее давление в трубопроводе равно 40 кгс/см^2, а температурный перепад составляет 50^0С. Геометрические характеристики трубы: $J = 964700$ см^4, $W = 15810$ см^3 и $F = 530$ см^2. Вес трубы с продуктом 13 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см^2. Характеристики грунта: объёмный вес $\gamma_{гр} = 0{,}0012$ кгс/см^3, угол внутреннего трения $\varphi_{гр} = 23^0$, сцепление $C_{гр} = 0$.

Согласно табл.3 нефтепровод относится к III-категории. Для трубопроводов III-категории имеем $c = 1$, $K_н = 1$ и $m = 0{,}9$. По СНиП II-45-75 имеем $h'' = 1$м.

Выполним расчёт на прочность и устойчивость для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1) Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

Аргументы функции, заданные в градусах, переводятся в радианную меру: $\varphi = 6^0 - 0{,}1047$, $\varphi_{гр} = 23^0 - 0{,}4014$.

Вводим в машину программу расчёта поворота трубопровода, оформленного сварными или крутозагнутыми коленами.

Вводим исходные величины:

```
119,2 - 1,4   964700   530   15810   3600   11   0,9
100   120   40   50   13   0,0012   0,4014   0   0
1   0,1014
```

Машина печатает:

$b = -3151$ $\quad b_2 = 2244$ $\quad b_1 = 3060$ $\quad n = 15{,}6$ $\quad n_2 = 18$

$l = 2818$ $\quad \pi_1 = 846351$ $\quad y = 33{,}47$ $\quad p = 19{,}72$.

Таким образом:

$\sigma''_{пр}$ = - 3151 кгс/см^2, $\psi_3 \frac{C}{K_н} R''_2$ = 2244 кгс/см^2,

$m\sigma_{кр}$ = 3060 кгс/см^2, V = 15,6 см, $[V]$ = 18 см,

l = 2818 см, N_0 = 846351 кгс, q = 33,47 кгс/см и

p = 19,72 кгс/см.

Согласно (12), (14) и (16) прочность и устойчивость стенки трубы не обеспечены, а устойчивость трубопровода в продольном направлении обеспечена. Поперечные перемещения по (18) меньше допускаемых.

2) Поворот выполнен холодногнутым коленом. Радиус кривизны колена 60 м.

Вводим программу расчёта поворота трубопровода, оформленного холодногнутым коленом.

Вводим исходные величины:

119,2 1,4 964700 530 15810 3600 11 0,9 100

120 40 50 13 0,0012 0,4014 0 0 1 0,1047 6000

Машина печатает:

σ_1 = - 1984 σ_2 = 2244 σ_I = 3060 n = 13,6 n_2 = 18

l = 2249 π_1 = 846351 y = 33,47 p = 19,72.

Таким образом:

$\sigma''_{пр}$ = - 1984 кгс/см^2, $\psi_3 \frac{C}{K_н} R''_2$ = 2244 кгс/см^2,

$m\sigma_{кр}$ = 3060 кгс/см^2, V = 13,6 см, $[V]$ = 18 см,

l = 2249 см, N_0 = 846351 кгс, q = 33,47 кгс/см и

p = 19,72 кгс/см .

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Поперечные перемещения меньше допускаемых.

3) Поворот выполнен двумя сварными или крутозагнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Длина прямой вставки 17 м.

Вводим программу расчёта поворота трубопровода рассматривае-

мой конструкции.

Вводим исходные величины:

119,2 1,4 964700 530 15810 3600 1 1 0,9 100
120 40 50 13 0,0012 0,4014 0 0 1 0,1047 1700

Машина печатает:

b_0 = - 655 b_1 = - 1408 h_2 = 2244 h_1 = 3060 n_0 = 6,9
n_1 = 5,8 n_2 = 18 l = 4156 π_1 = 846351
y = 33,47 p = 19,72.

Таким образом:

$\sigma^{н}_{пр_0}$ = - 655 кгс/см^2, $\sigma^{н}_{пр_1}$ = - 1408 кгс/см^2,
$\psi_3 \frac{c}{k_н} R^{н}_{в}$ = 2244 кгс/см^2, $m\sigma_{кр}$ = 3060 кгс/см^2, V_0 = 6,9 см,
V_1 = 5,8 см, $[V]$ = 18 см, l = 4156 см, N = 846351 кгс,
q = 33,47 кгс/см^2 и p = 19,72 кгс/см^2.

Прочность, устойчивость стенки и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

4) Поворот выполнен двумя холодногнутыми коленами с прямой вставкой между ними.

Длина прямой вставки 13 м, радиус кривизны колена 60 м.

Вводим программу расчёта поворота трубопровода рассматриваемой конструкции.

Вводим исходные величины:

119,2 1,4 964700 530 15810 3600 1 1 0,9 100
120 40 50 13 0,0012 0,4014 0 0 1 0,1047
6000 1300.

Машина печатает:

b_0 = - 559 b_1 = - 860 h_2 = 2244 h_1 = 3060 n_0 = 4,6
n_1 = 4,2 n_2 = 18 l = 4615 π_1 = 846351
y = 33,47 p = 19,72.

Таким образом:

$\sigma^{н}_{пр_0}$ = - 559 кгс/см^2, $\sigma^{н}_{пр_1}$ = - 860 кгс/см^2,

$\psi_3 \frac{C}{K_н} R_2^н$ = 2244 кгс/см^2, $m\sigma_{кр}$ = 3060 кгс/см^2,
V_0 = 4,6 см, V_1 = 4,2 см, $[V]$ = 18 см, l = 4615 см,
N_0 = 846351 кгс, q = 33,47 кгс/см и p = 19,72 кгс/см.

Прочность, устойчивость стенки и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

Радиус упругого изгиба оси трубопровода 1400 м, длина волны начального прогиба 150 м, температурный перепад 60°С.

Вводим программу расчёта поворота трубопровода, оформленного свободным изгибом трубопровода.

Вводим исходные величины:

119,2	1,4	964700	530	15810	3600	1	1	0,9	100	
120	40	50	13	0,0012	0,4014	0	0	1	15000	140000

Машина печатает:

b = − 1922 $ш_2$ = 2244 $ш_1$ = 3060 $н$ = 0,01 $н_2$ = 18
l = 150 π_1 = 979911 π_2 = 1807118 y = 33,47 p = 19,72.

Таким образом:

$\sigma_{кр}^н$ = − 19,22 кгс/см^2, $\psi_3 \frac{C}{K_н} R_2^н$ = 2244 кгс/см^2,
$m\sigma_{кр}$ = 3060 кгс/см^2, V = 0,01 см, $[V]$ = 18 см, l = 150см,
N_0 = 979911 кгс, $mN_{0кр}$ = 1807118 кгс, q = 33,47 кгс/см и
p = 19,72 кгс/см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и устойчивость трубопровода в продольном направлении обеспечены.

Приложение 5

НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

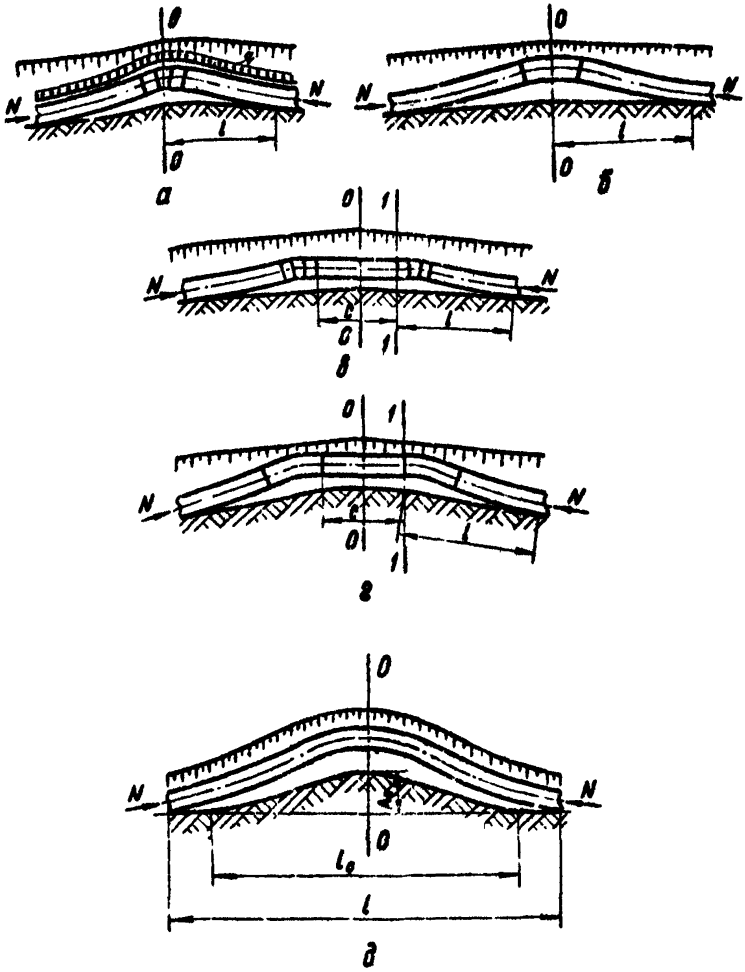

Рис. П5.1. Изгиб трубопровода на "выпуклом" рельефе местности при различных конструкциях углов поворота:

а) Сварное колено; б) гнутое колено; в) прямая вставка со сварными коленами; г) прямая вставка с гнутыми коленами; д) упругий изгиб.

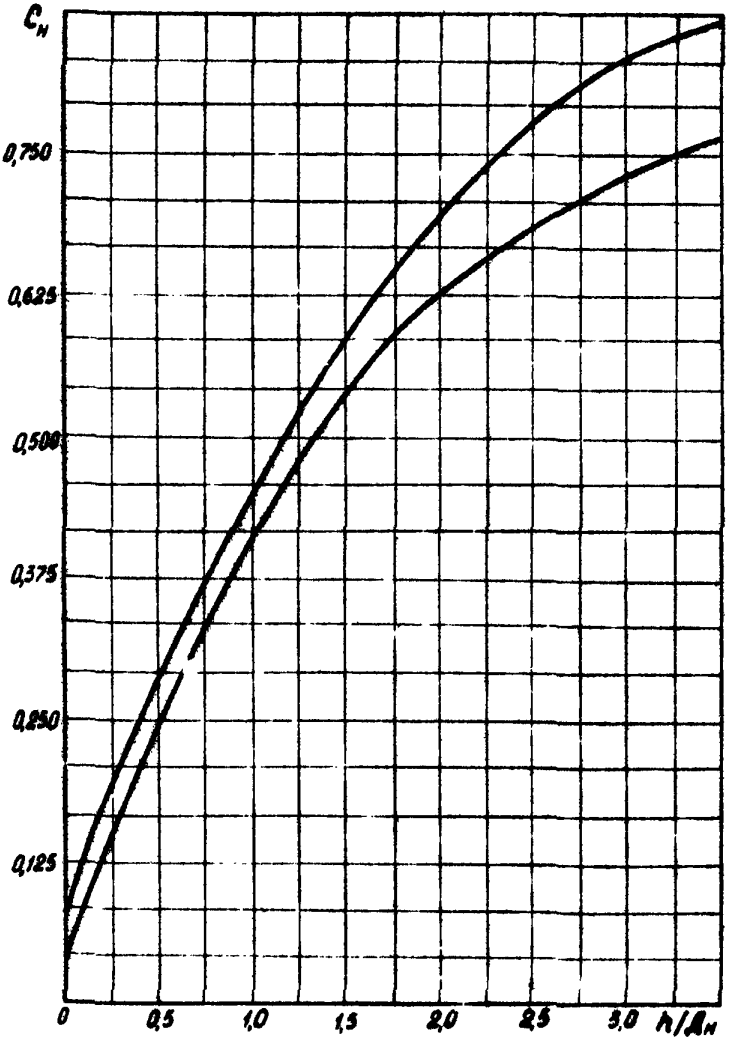

Рис. П.5.2. График для определения коэффициента $C_н$:

1 - песчаные грунты; 2 - глинистые грунты.

II.5.I. Номограммы для расчёта углов поворота, выполненных сварными, крутозагнутыми коленами и прямыми вставками

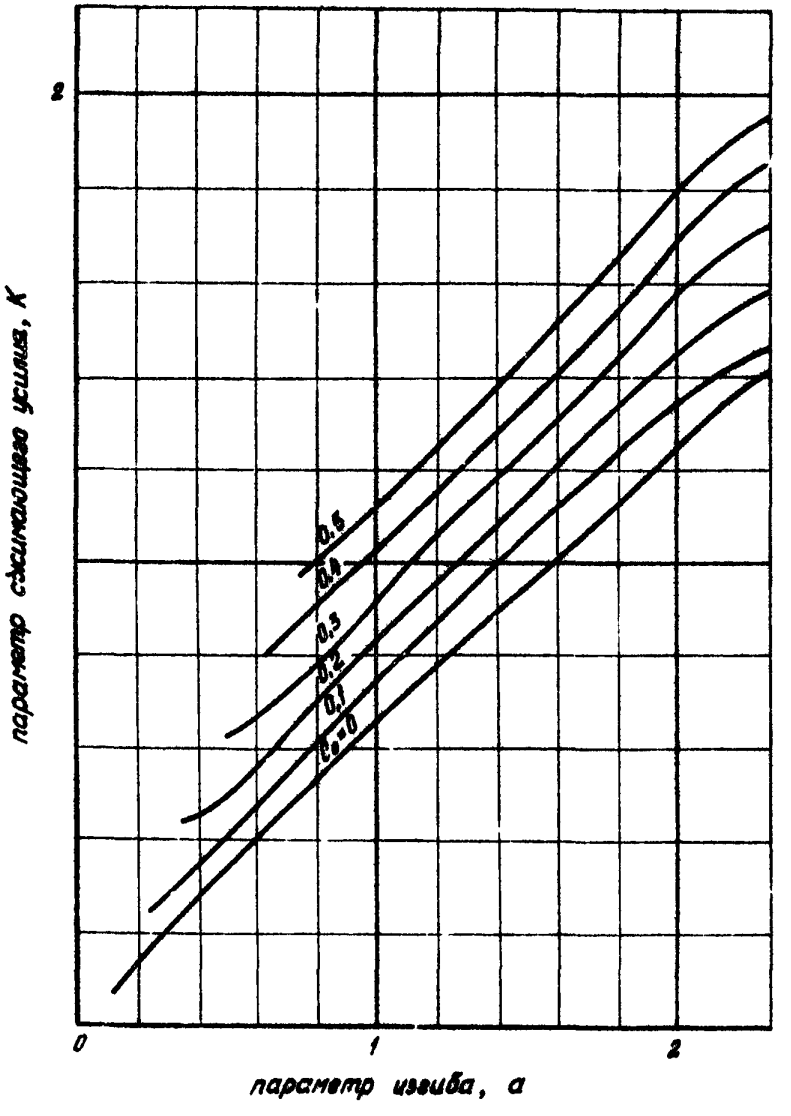

Рис.П.5.3.Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

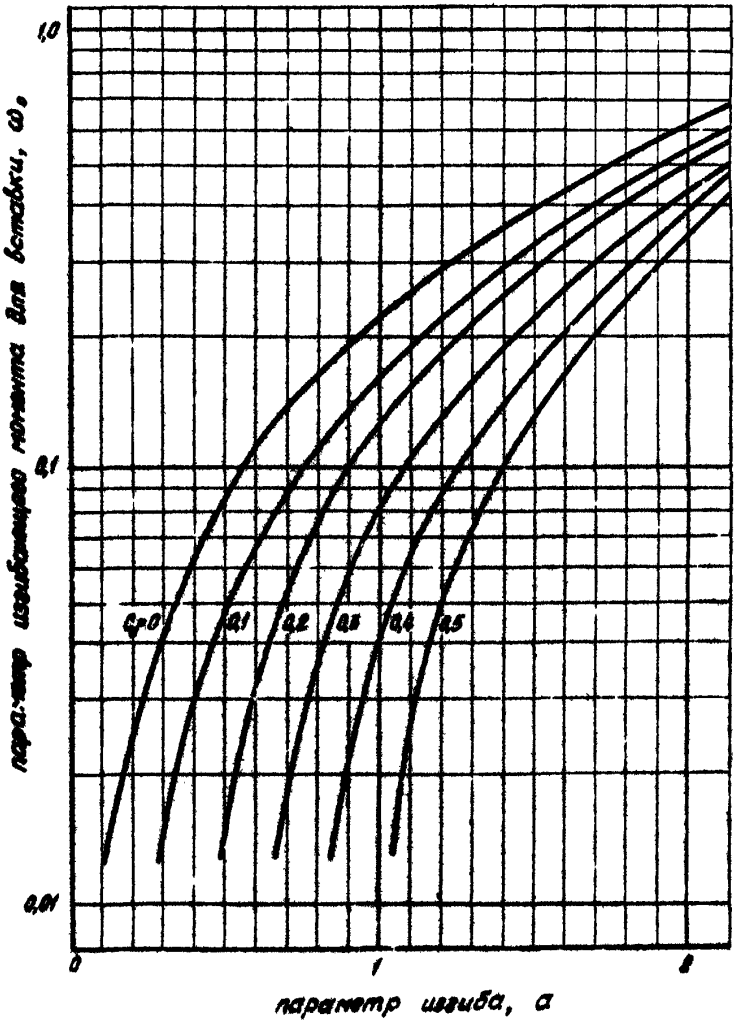

Рис.П.5.4.График для определения параметра изгибающего момента ω_0 .

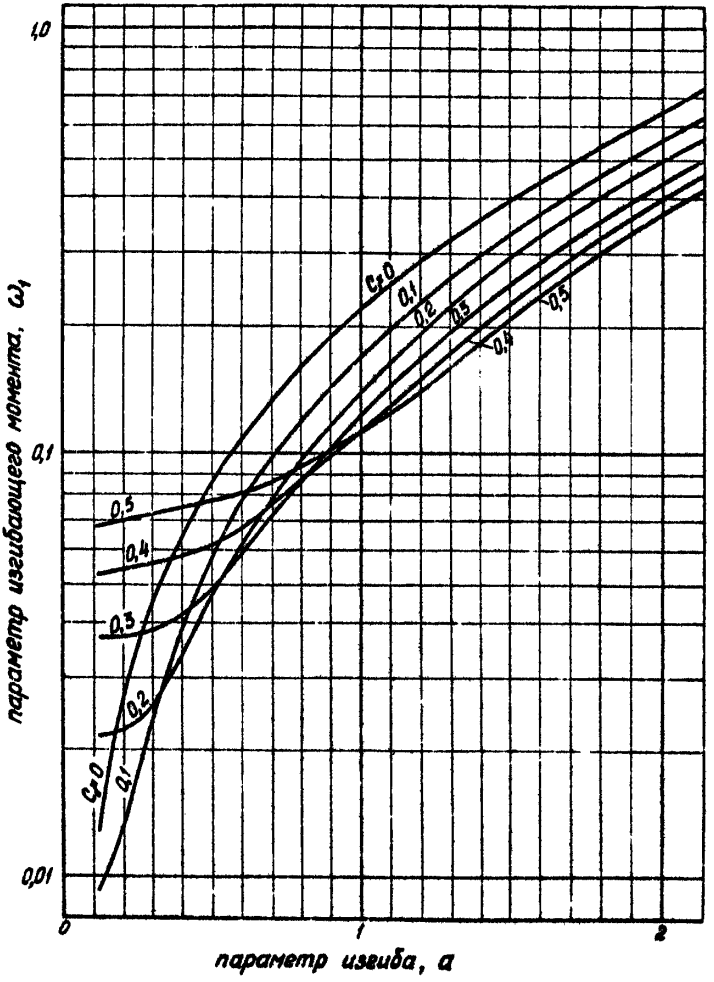

Рис.П.5.5.График для определения параметра изгибающего момента ω_1 .

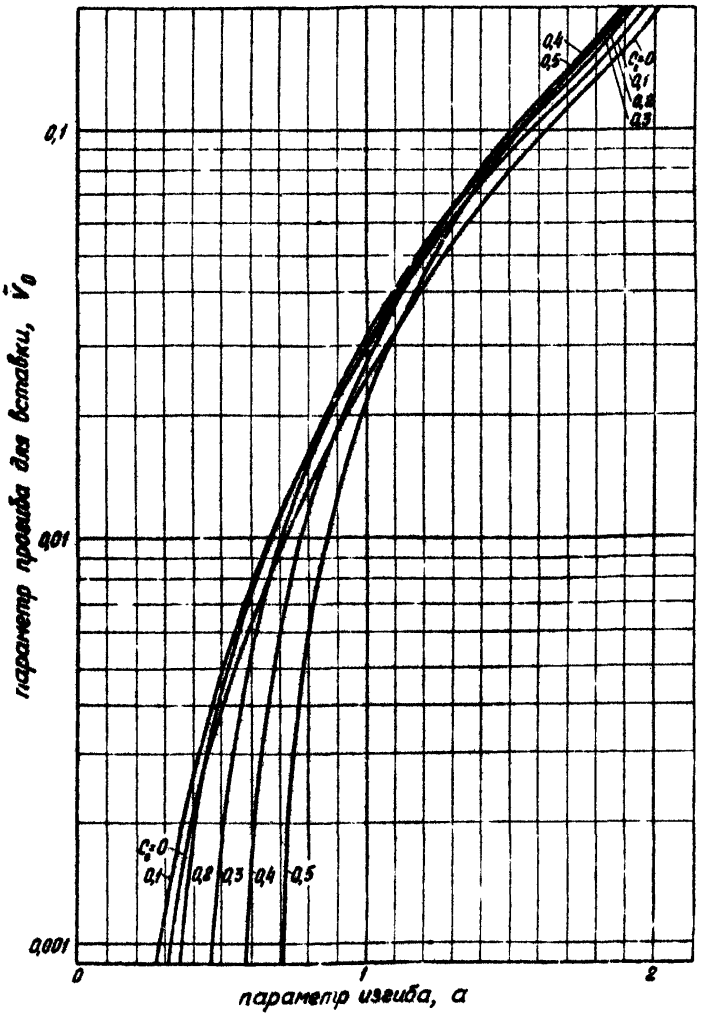

Рис.П.5.6.График для определения параметра прогиба $\tilde{V}$.

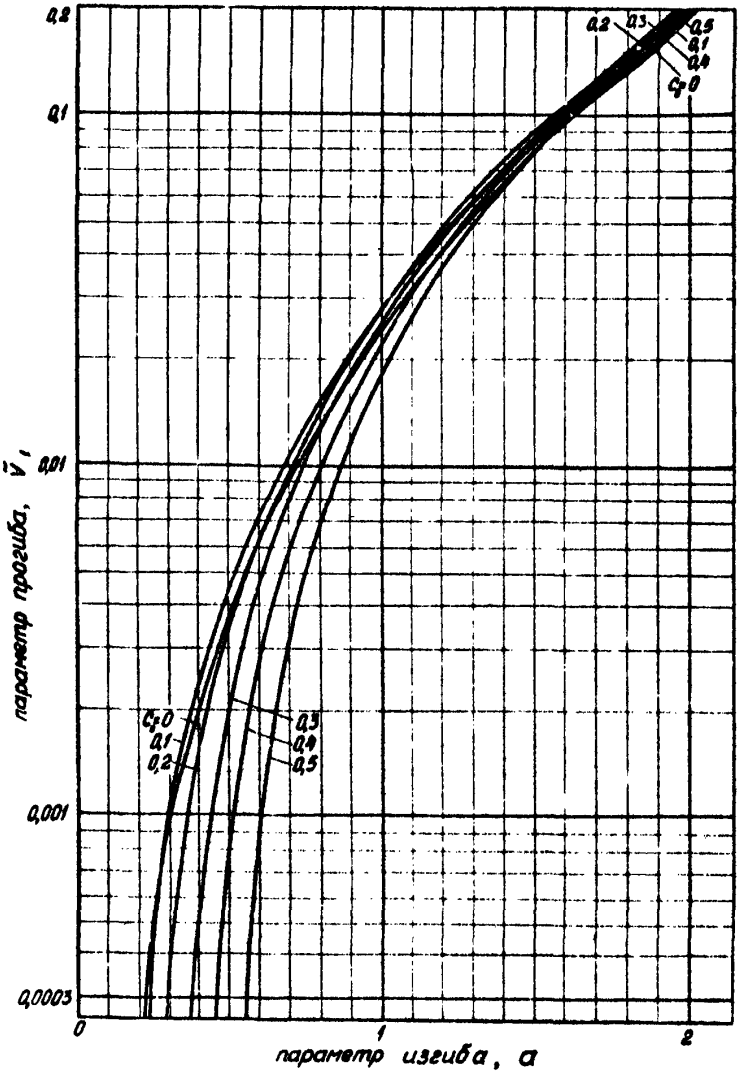

Рис.П.5.7.График для определения параметра прогиба V_i .

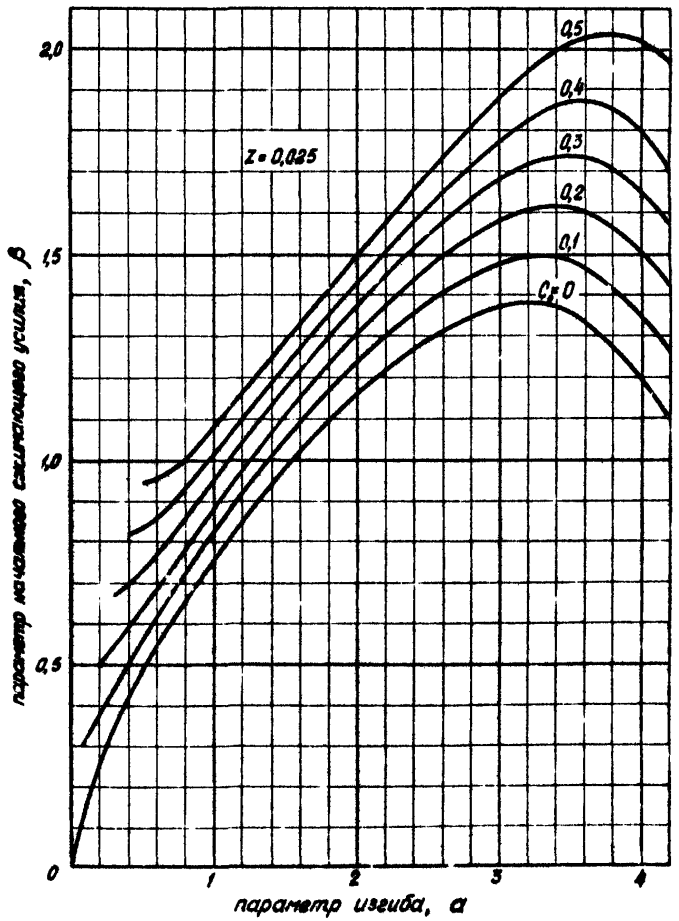

Рис.П.5.8.График для определения параметра α при $z = 0,025$.

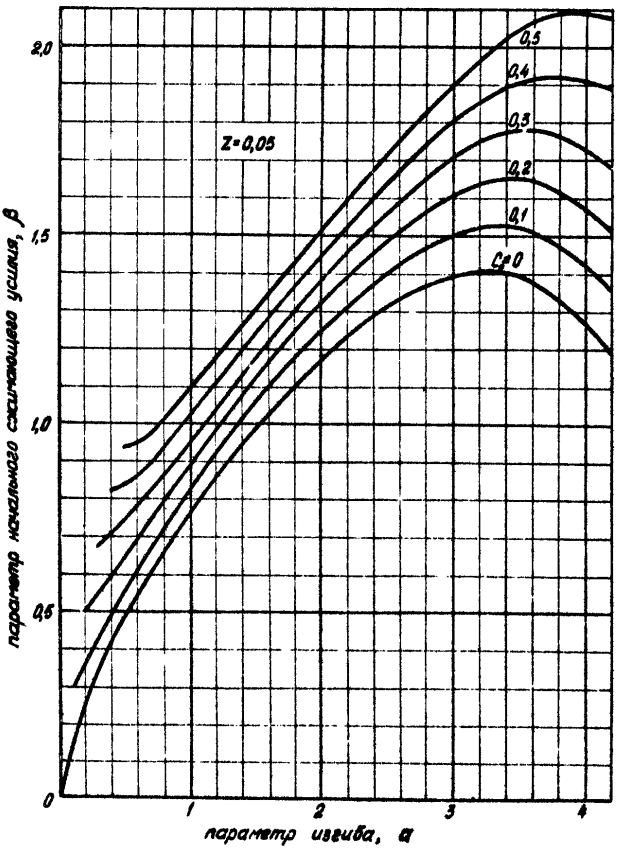

Рис.П.5.9.График для определения параметра α при $z = 0,05$.

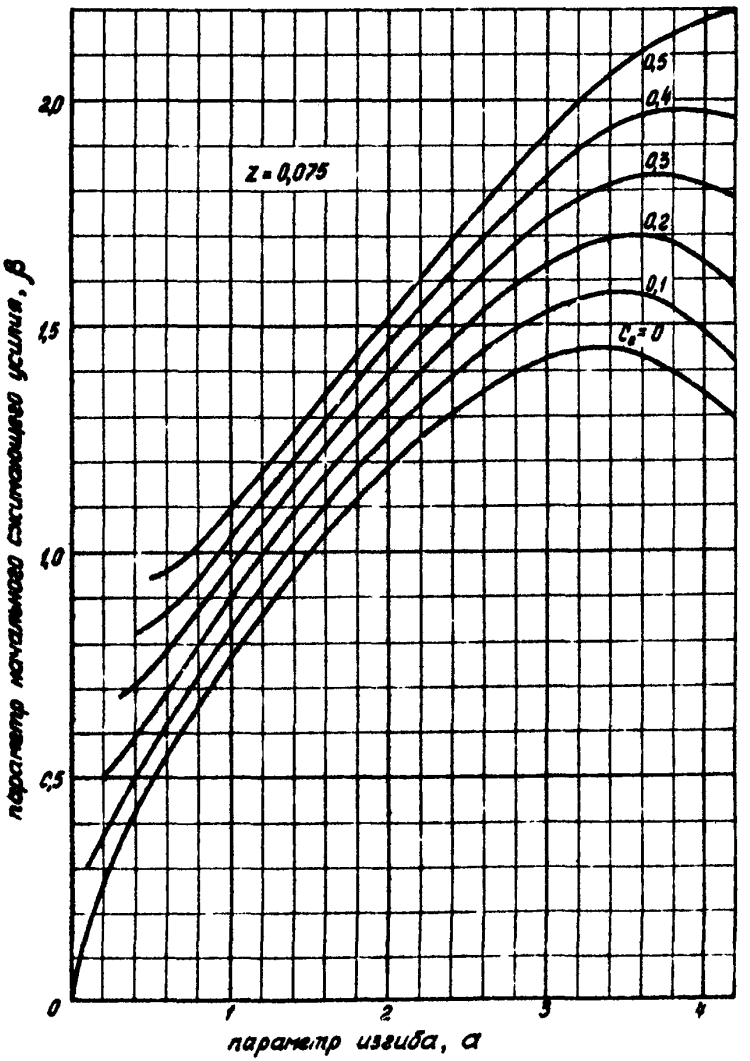

Рис.П.5.10. График для определения параметра a при $z = 0,075$.

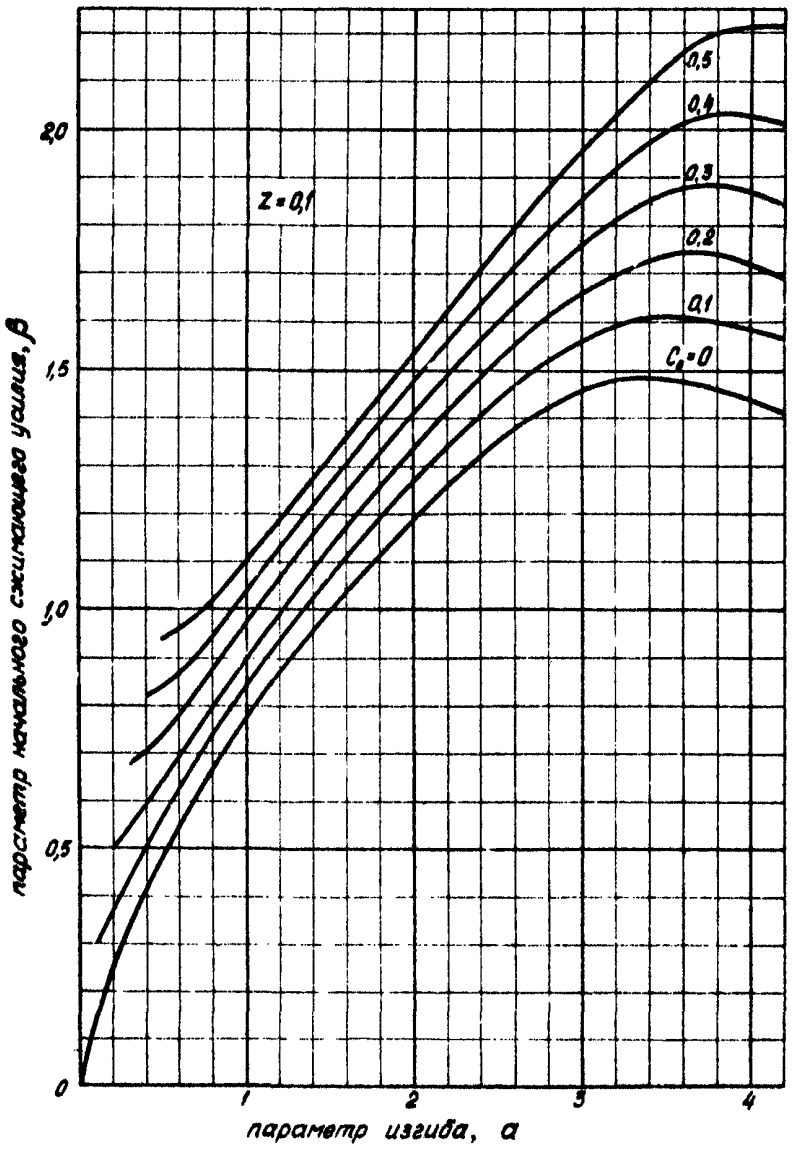

Рис.П.5.II. График для определения параметра a при $z = 0,1$.

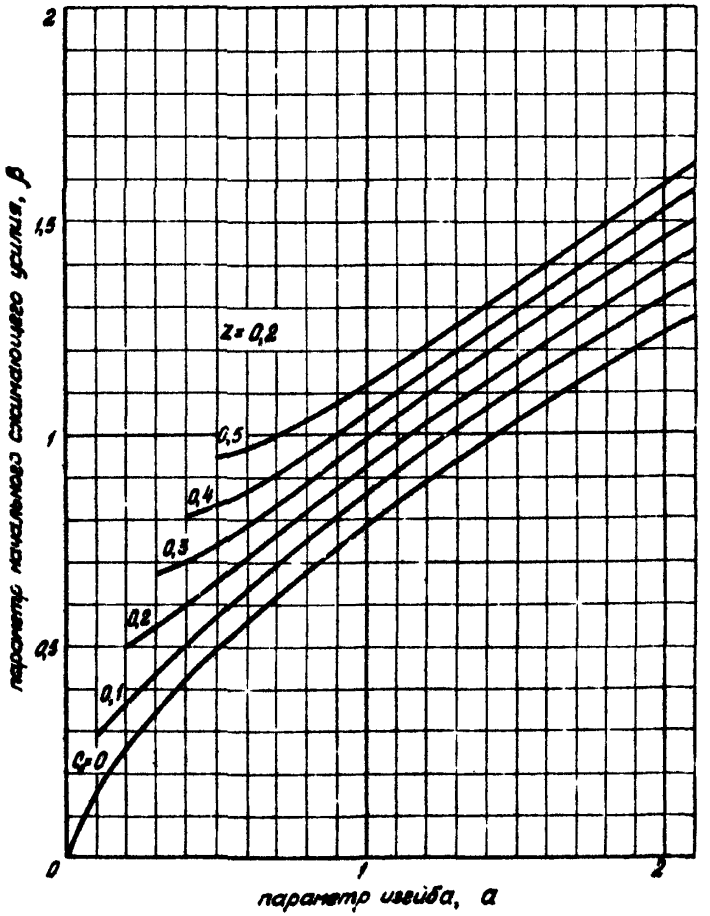

Рис.П.5.I2. График для определения параметра α при $z = 0,2$.

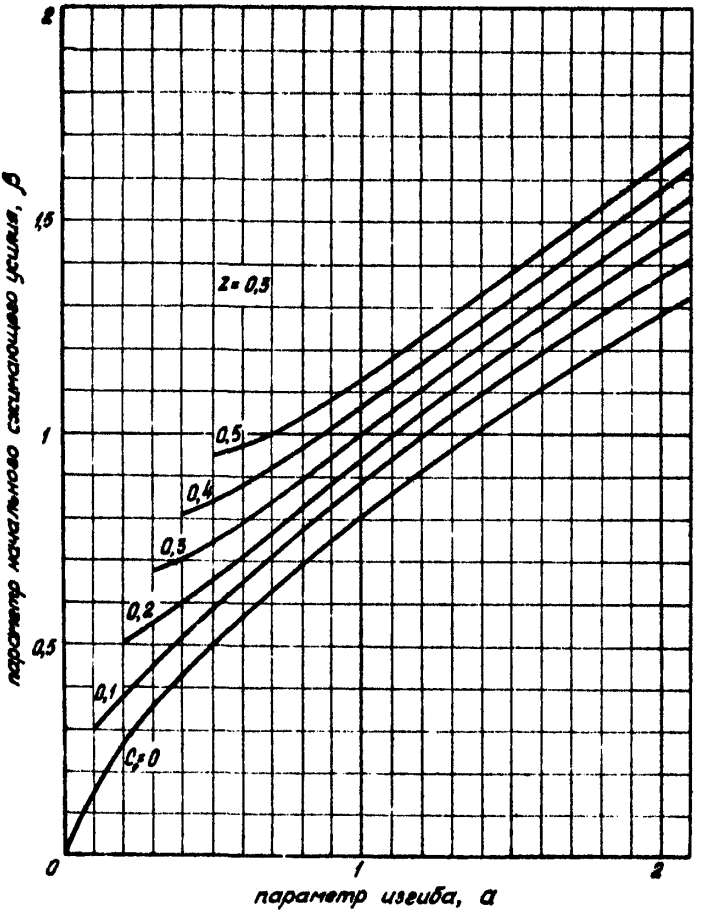

Рис.П.5.13. График для определения параметра α при $z = 0,3$.

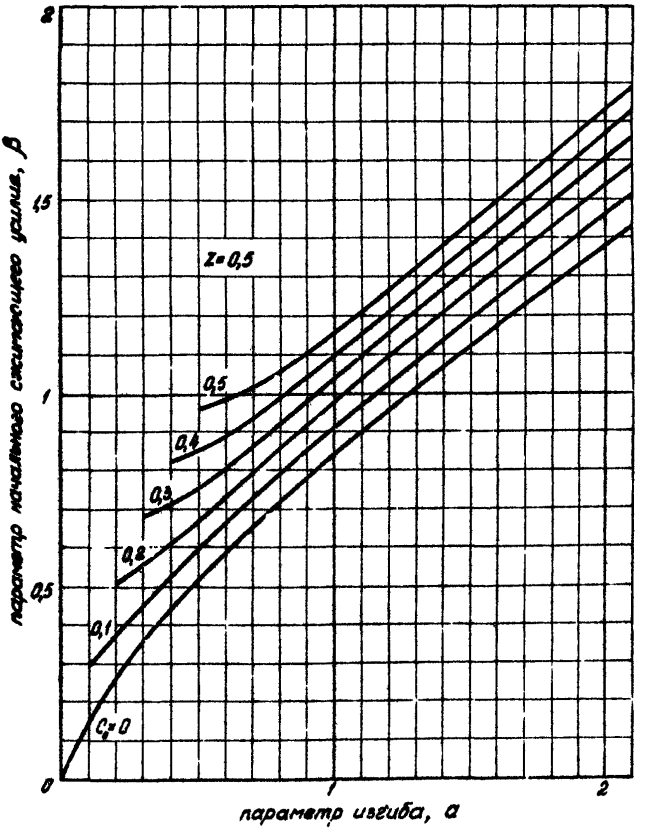

Рис.П.5.14. График для определения параметра a при $z = 0,5$.

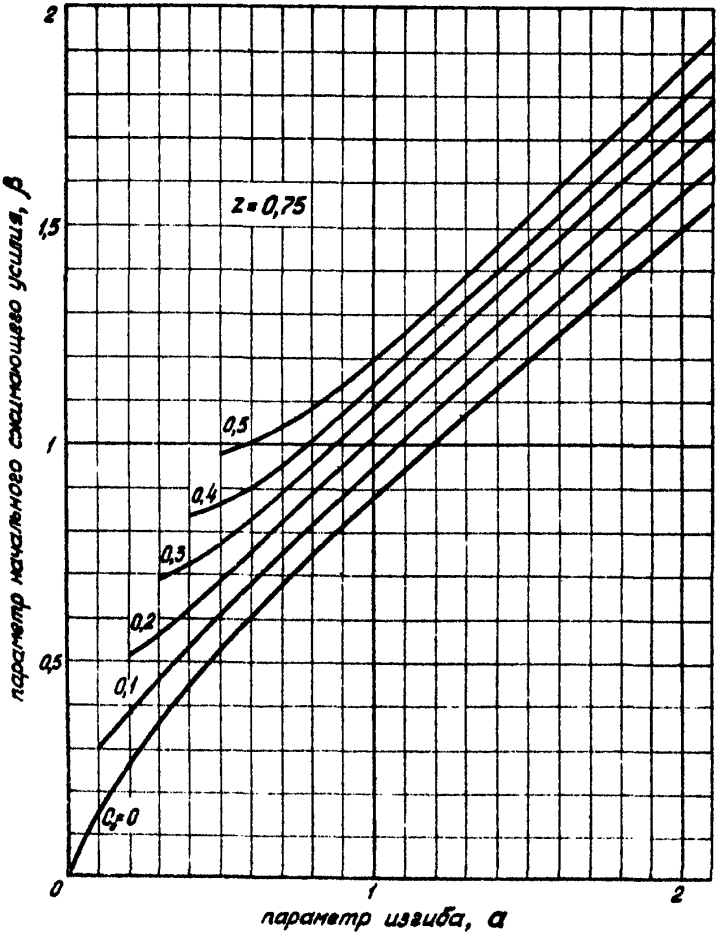

Рис.П.5.I5. График для определения параметра α при $z = 0{,}75$.

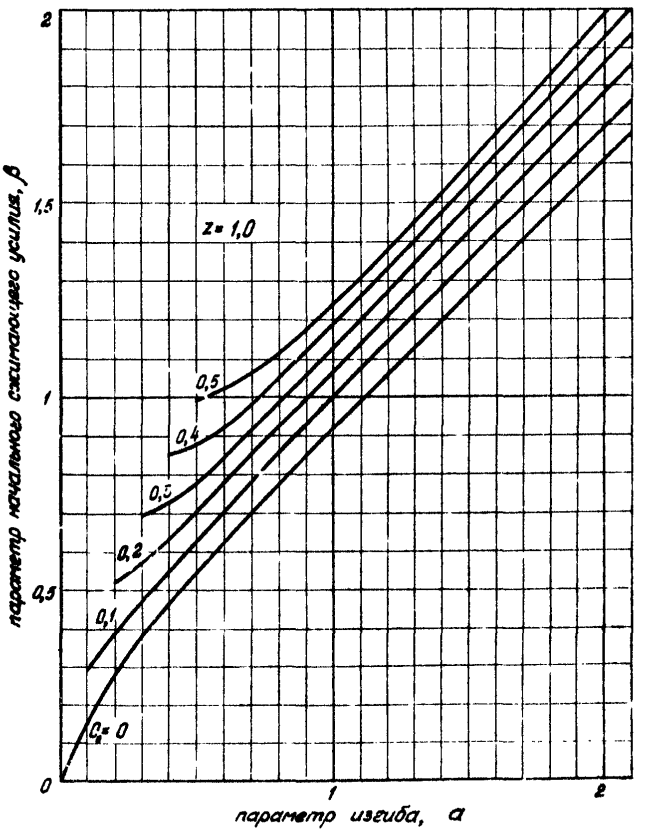

Рис.П.5.16. График для определения параметра α при $z = 1$.

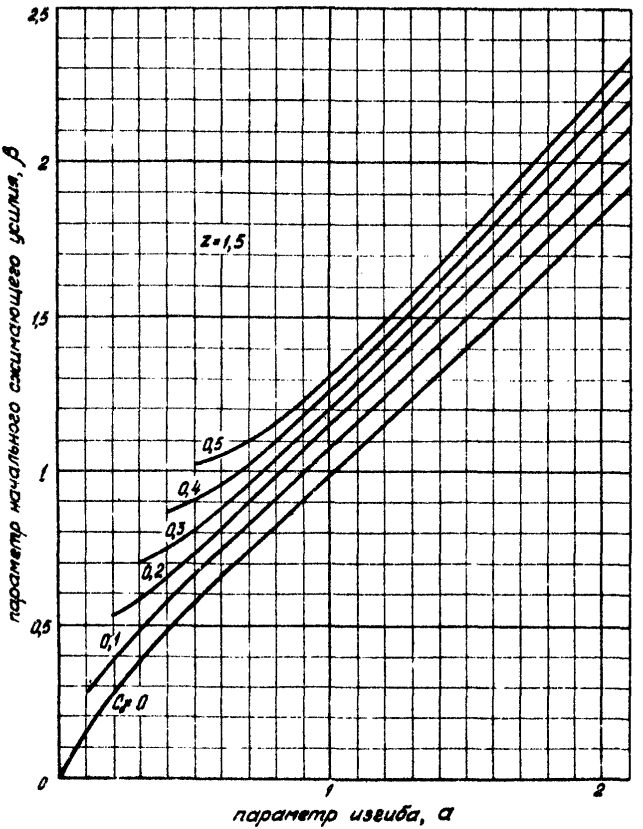

Рис.П.5.17. График для определения параметра α при $z = 1{,}5$.

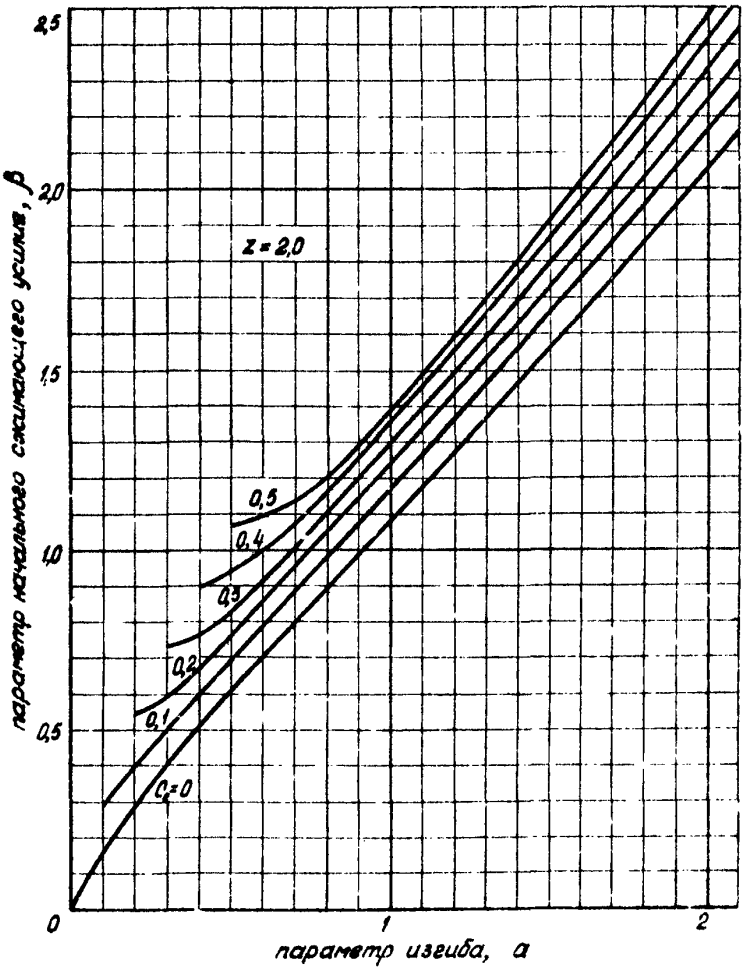

Рис.П.5.18. График для определения параметра α при $z = 2$.

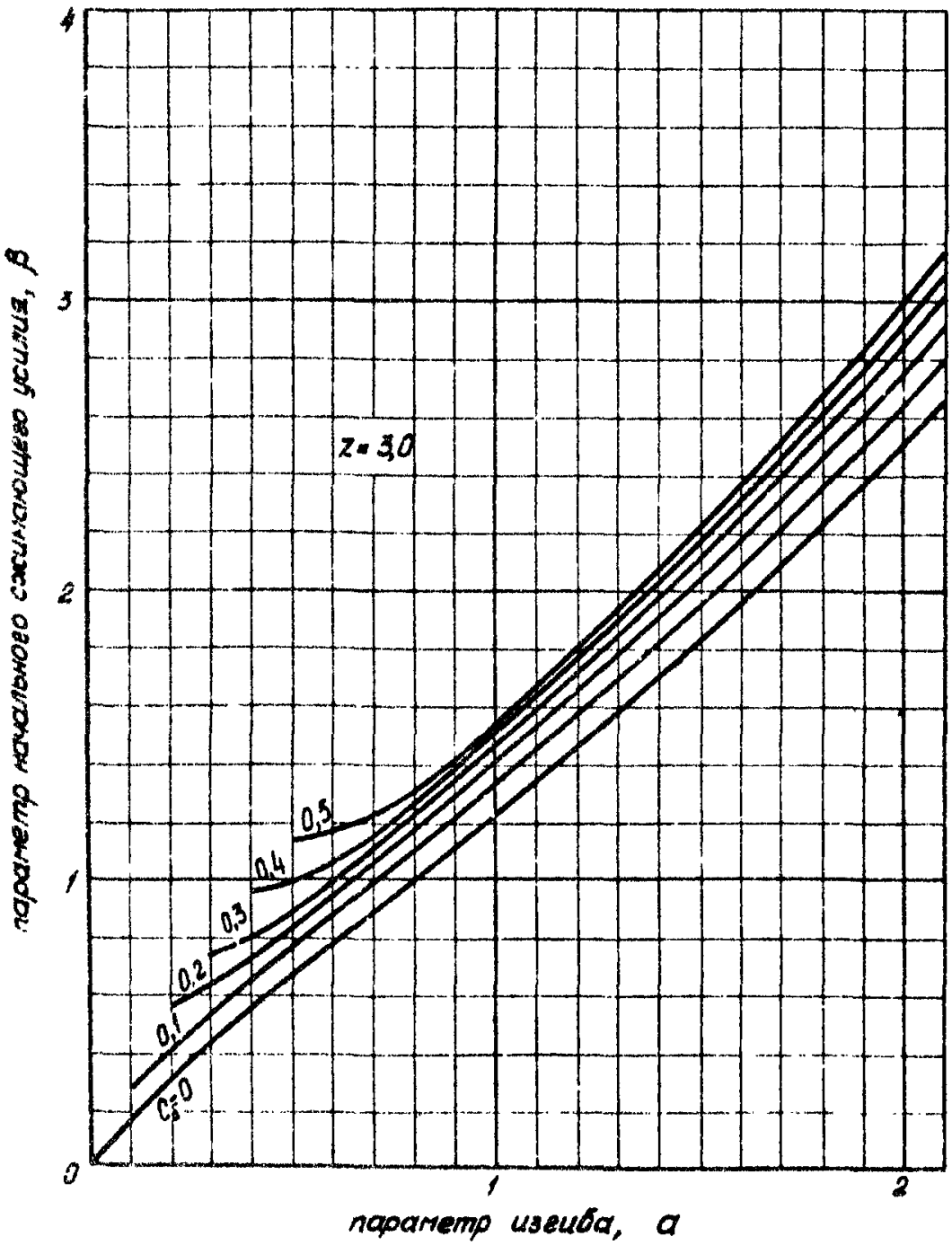

Рис.П.5.I9. График для определения параметра α при $z = 3$.

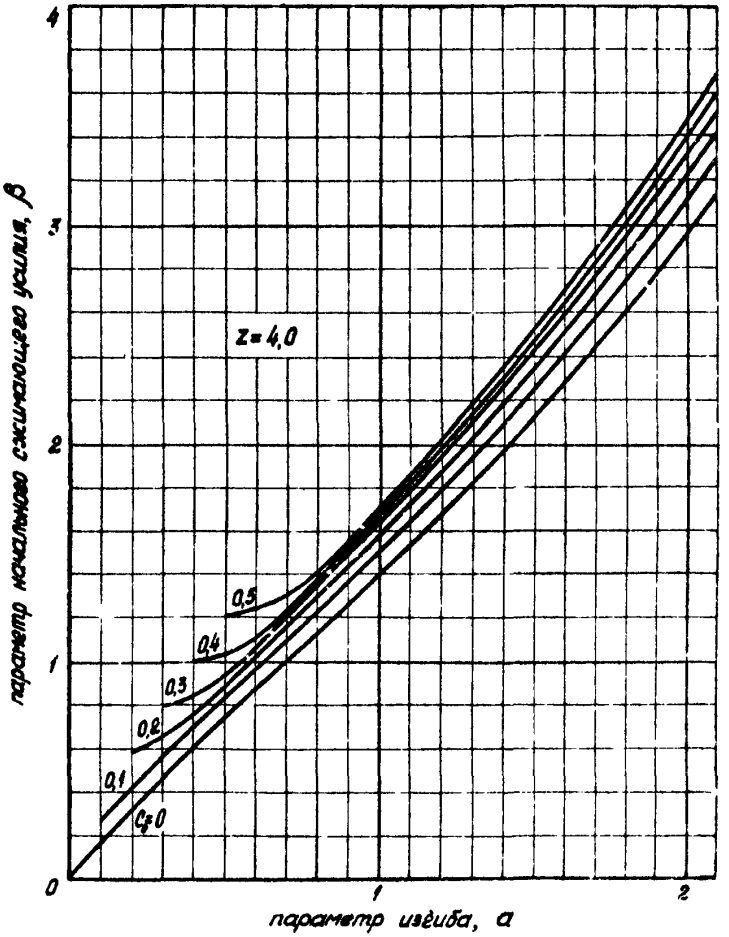

Рис.П.5.20. График для определения параметра α при $z = 4$.

П.5.2. Номограммы для расчёта углов поворота, выполненных холодногнутыми коленами и прямыми вставками

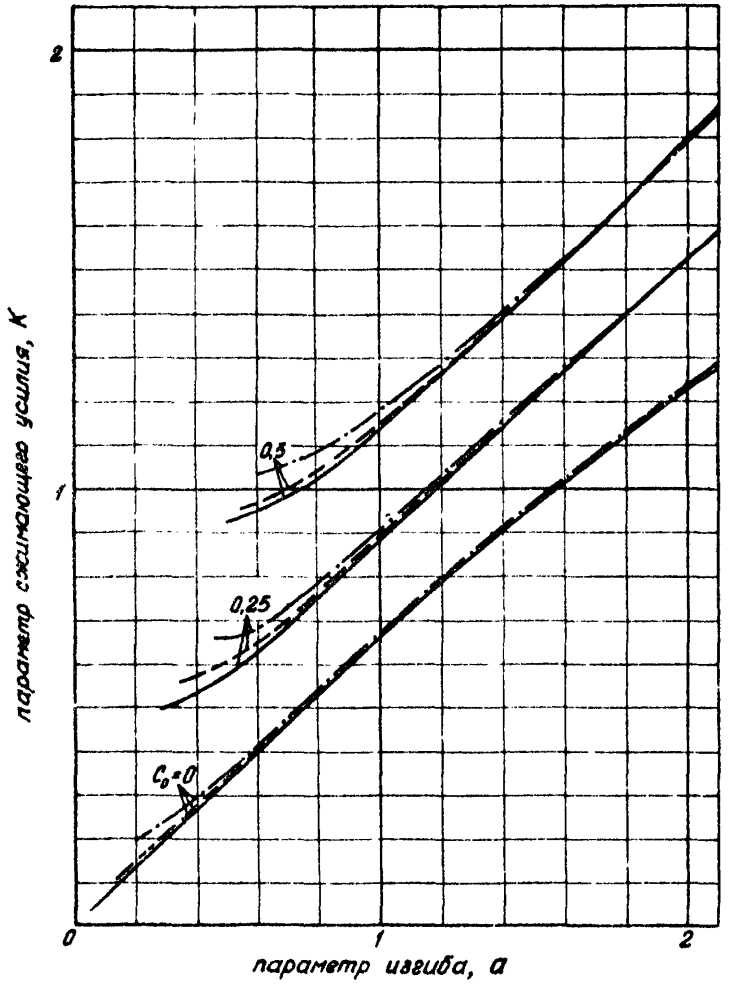

Рис.П.5.21. Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

——— $a_0=0,05$; – – – – $a_0=0,1$; —·—·— $a_0=0,2$

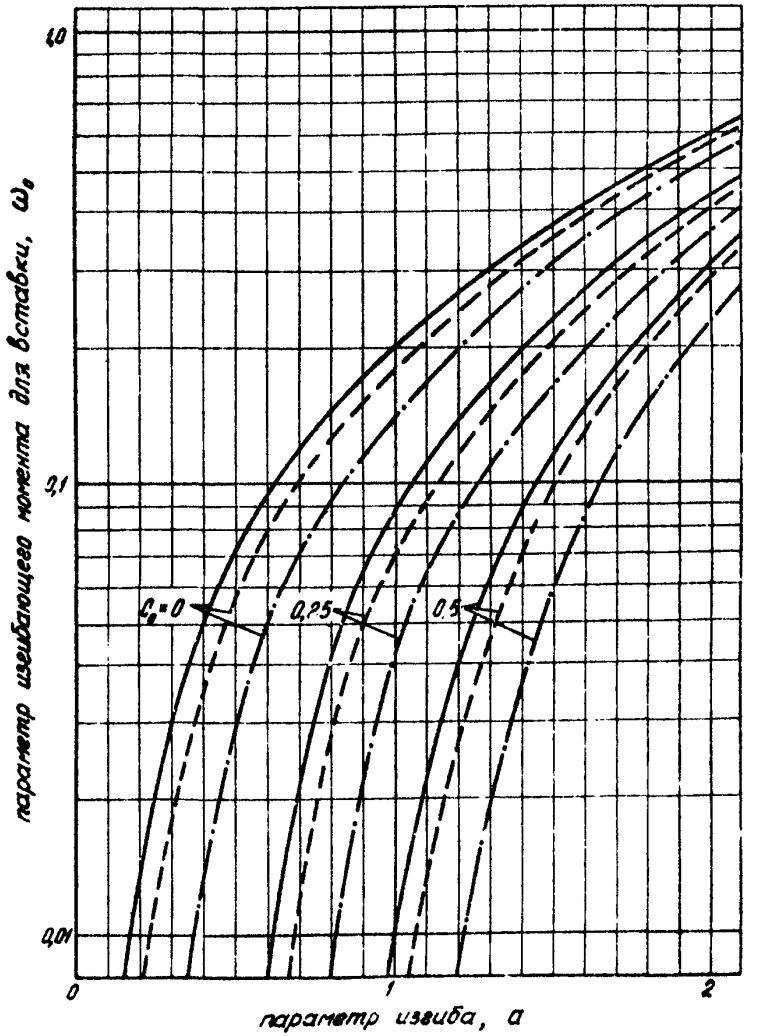

Рис.II.5.22. График для определения параметра изгибающего момента $\omega_в$.

——— $a_0 = 0,05$; — — — — $a_0 = 0,1$; ——·—— $a_0 = 0,2$

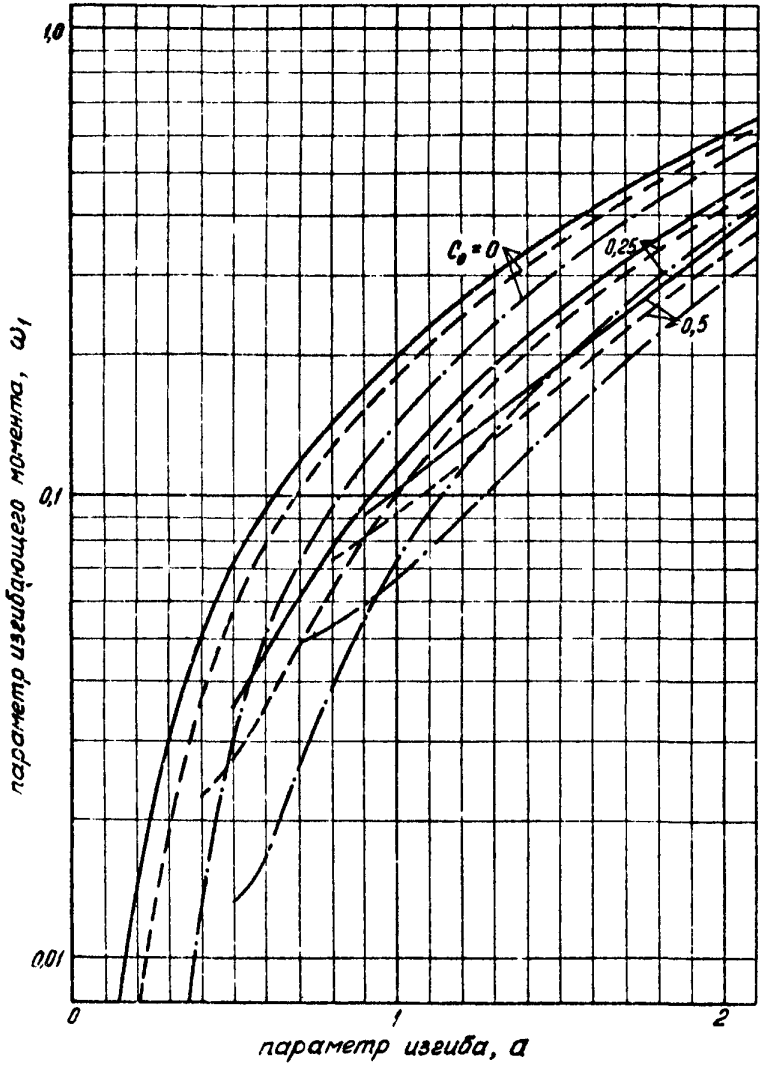

Рис.П.5.23.График для определения параметра изгибающего момента ω_1 .

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; ——·—— $a_0 = 0,2$

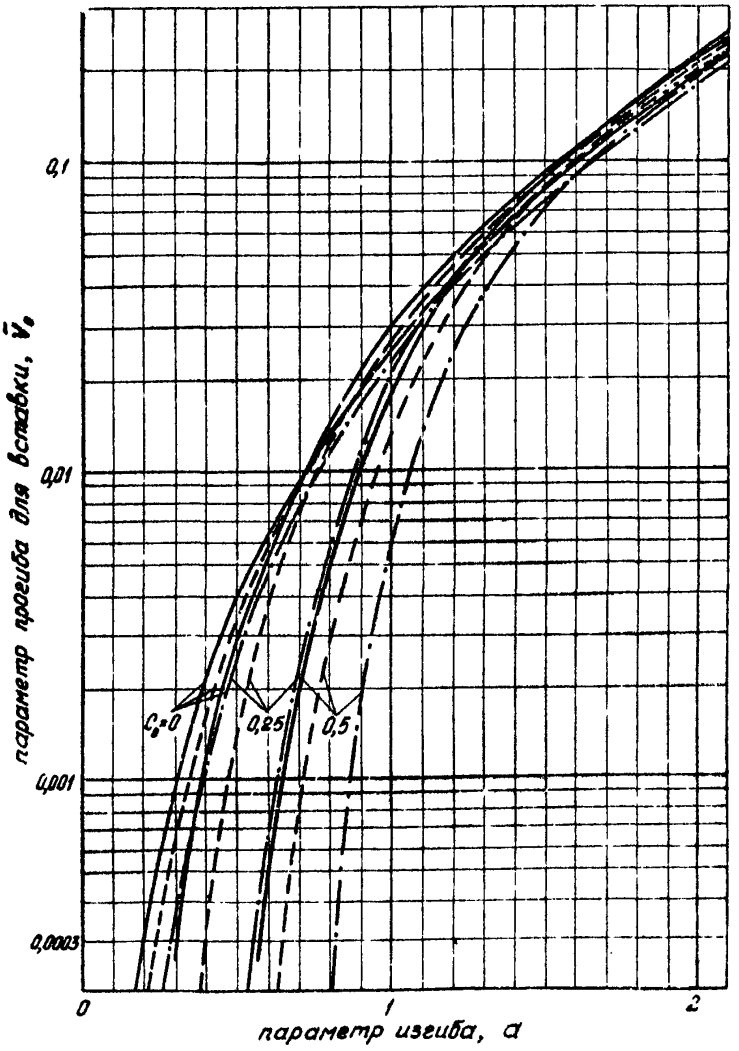

Рис.II.5.24. График для определения параметра прогиба $\tilde{V}_0$.

——— $a_0=0,05$; — — — $a_0=0,1$; —·—·— $a_0=0,2$

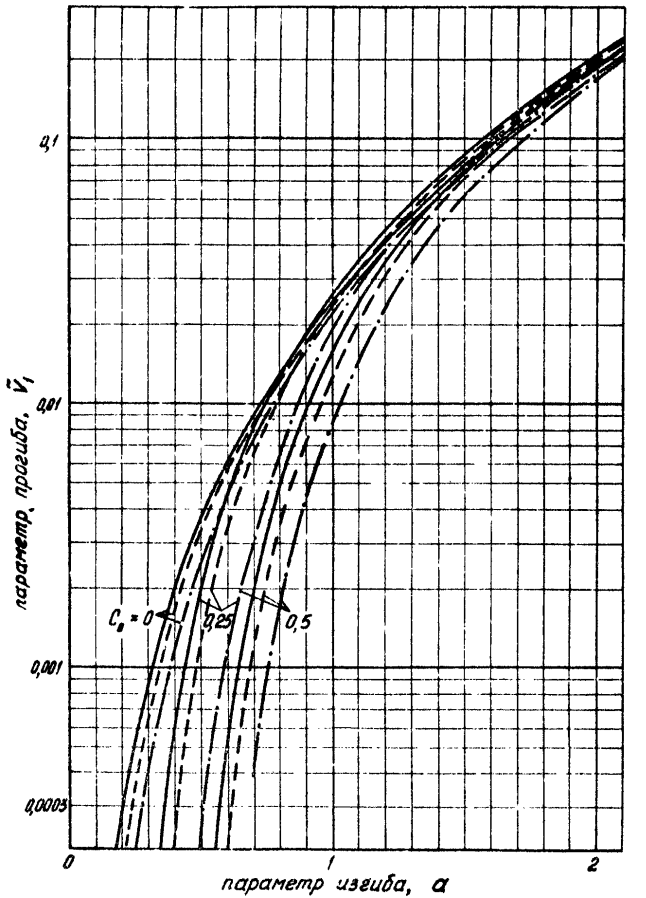

Рис.П.5.25. График для определения параметра прогиба $\tilde{V}_1$.

——— $-\alpha_0 = 0,05$; – – – – $-\alpha_0 = 0,1$; —·— $-\alpha_0 = 0,2$

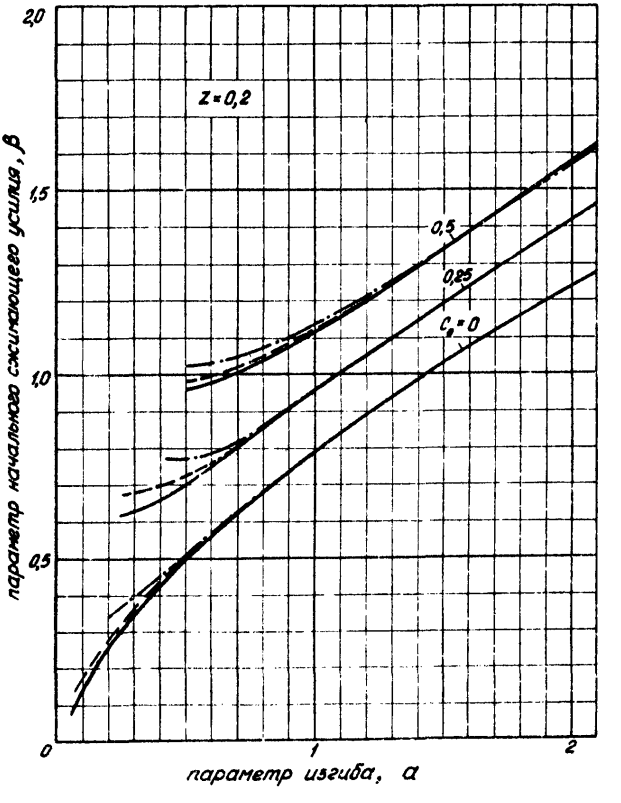

Рис.П.5.30. График для определения параметра α при $z = 0,2$.

——— $a_0=0,05$; — — — $a_0=0,1$; ——·—— $a_0=0,2$

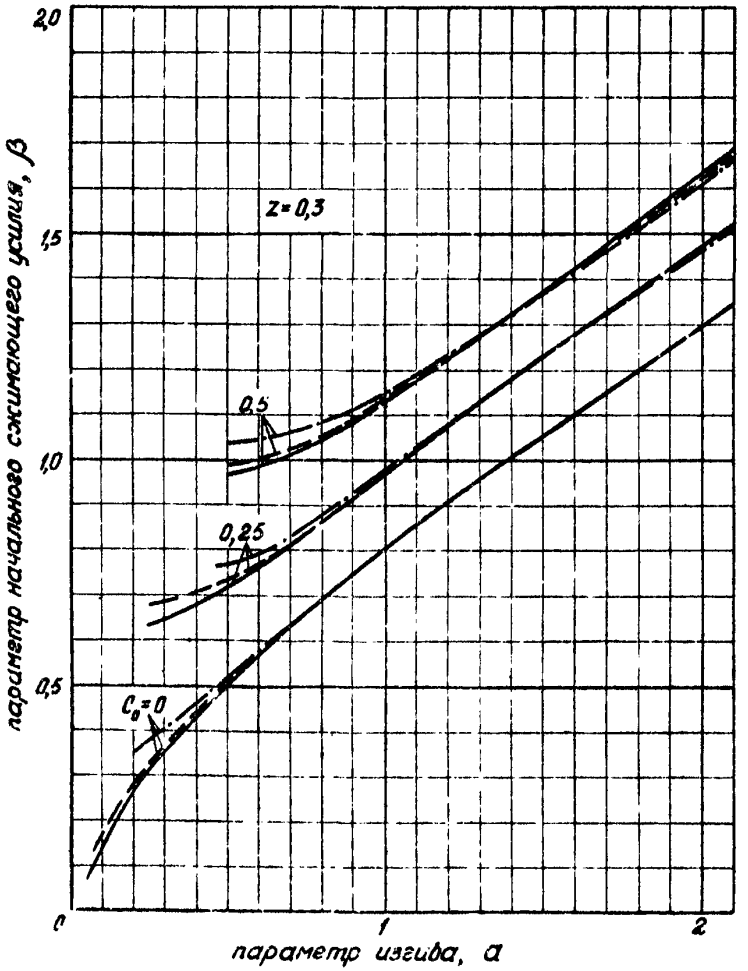

Рис.П.5.31. График для определения параметра α при $z = 0,3$.

——— a_0=0,05; – – – – a_0=0,1, ——·—— a_0=0,2

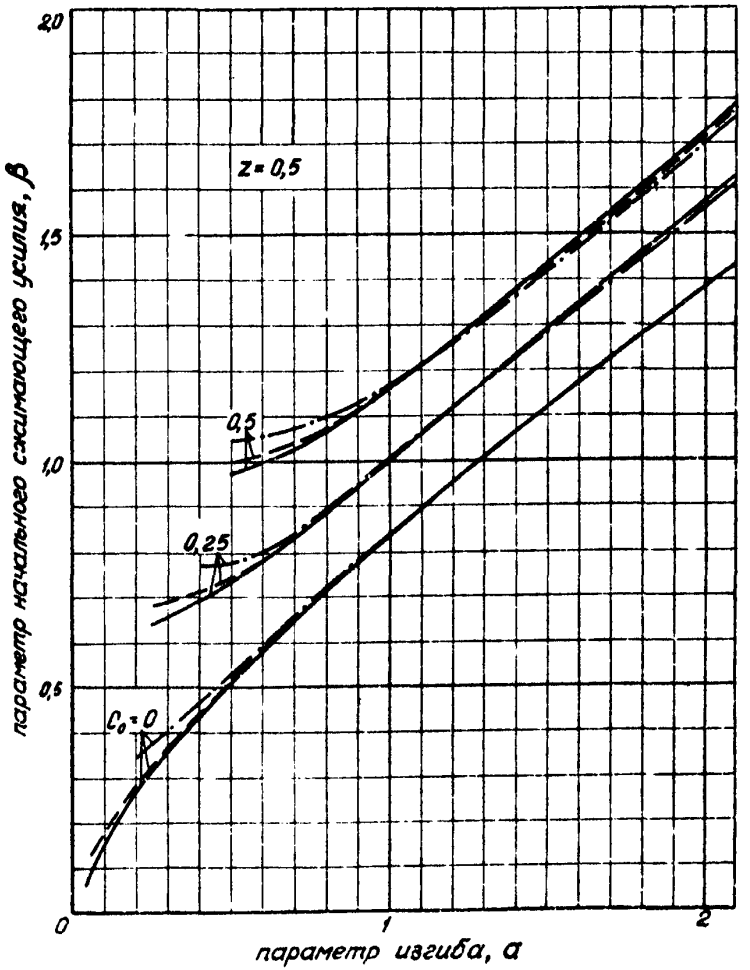

Рис.П.5.32. График для определения параметра α при $z = 0,5$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; —·— $a_0 = 0,2$

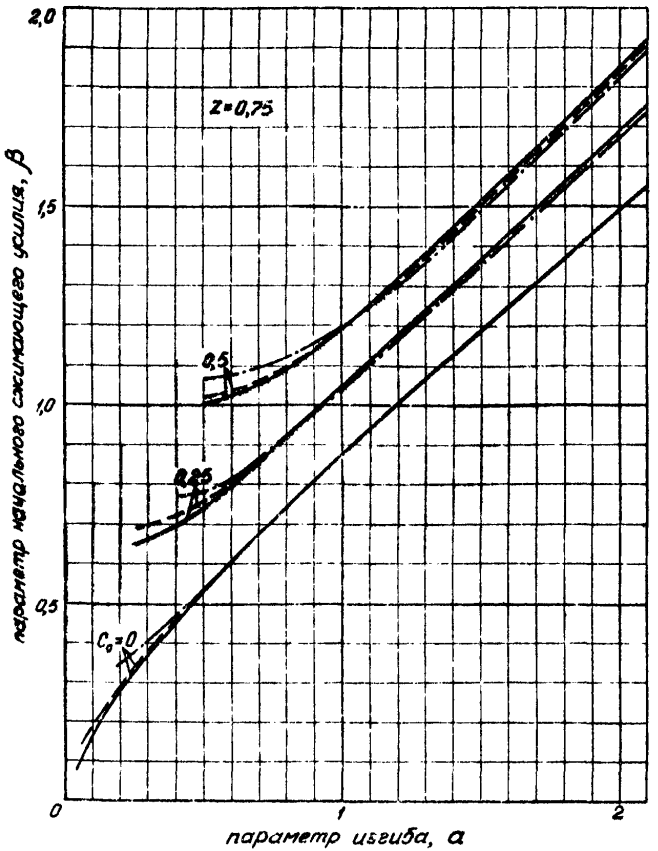

Рис.П.5.33. График для определения параметра α при $z = 0,75$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; ——·—— $a_0 = 0,2$

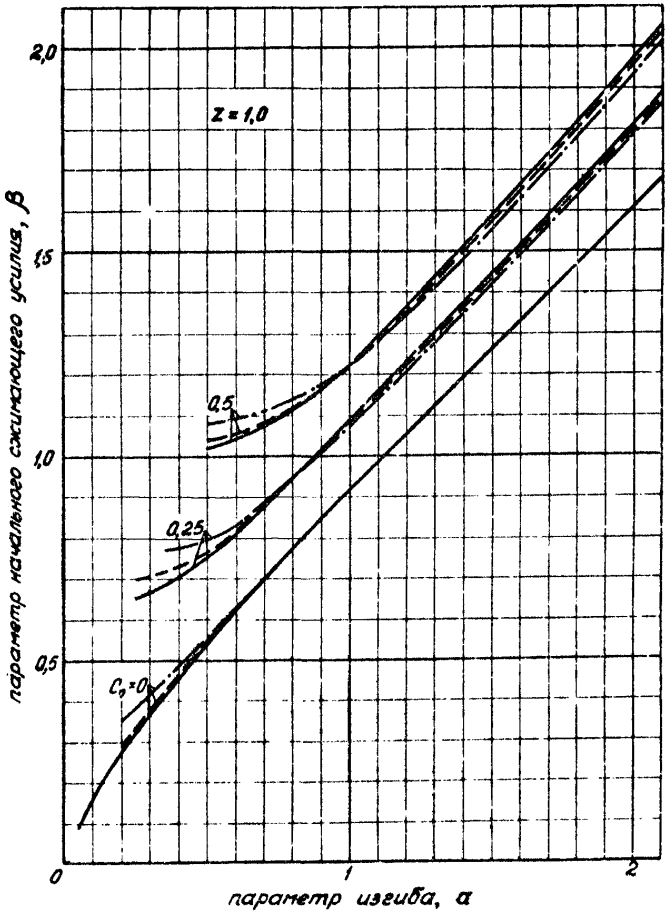

Рис.П.5.34. График для определения параметра α при $Z = 1$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; —·—·— $a_0 = 0,2$

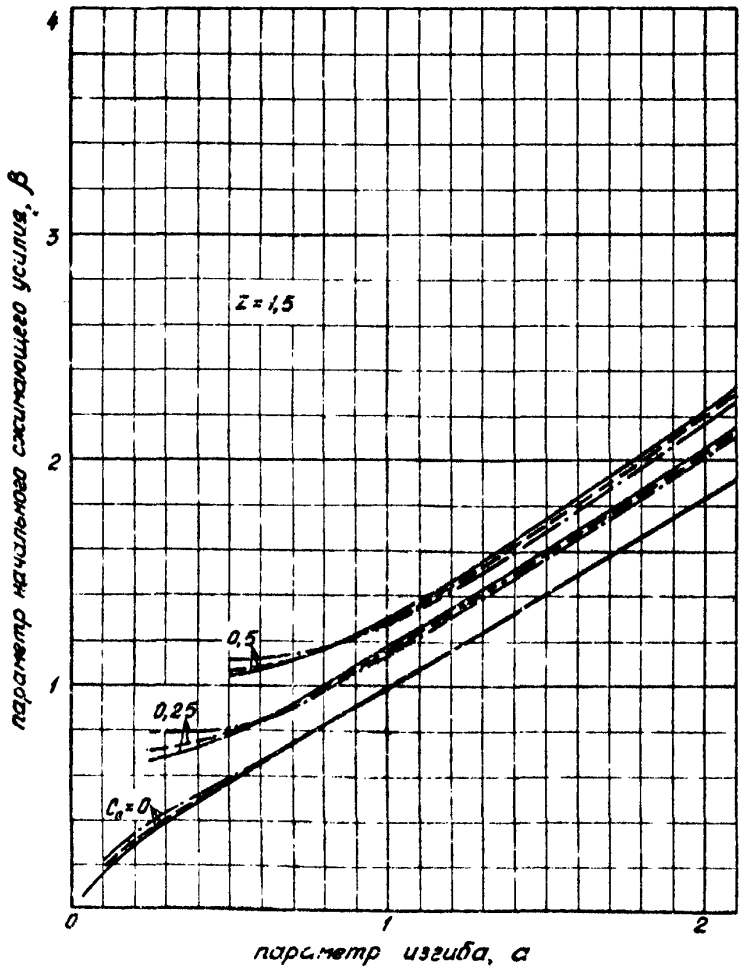

Рис.П.5.35. График для определения параметра α при $z = 1,5$.

——— $a_0 = 0,05$, – – – – $a_0 = 0,1$; —·— $a_0 = 0,2$

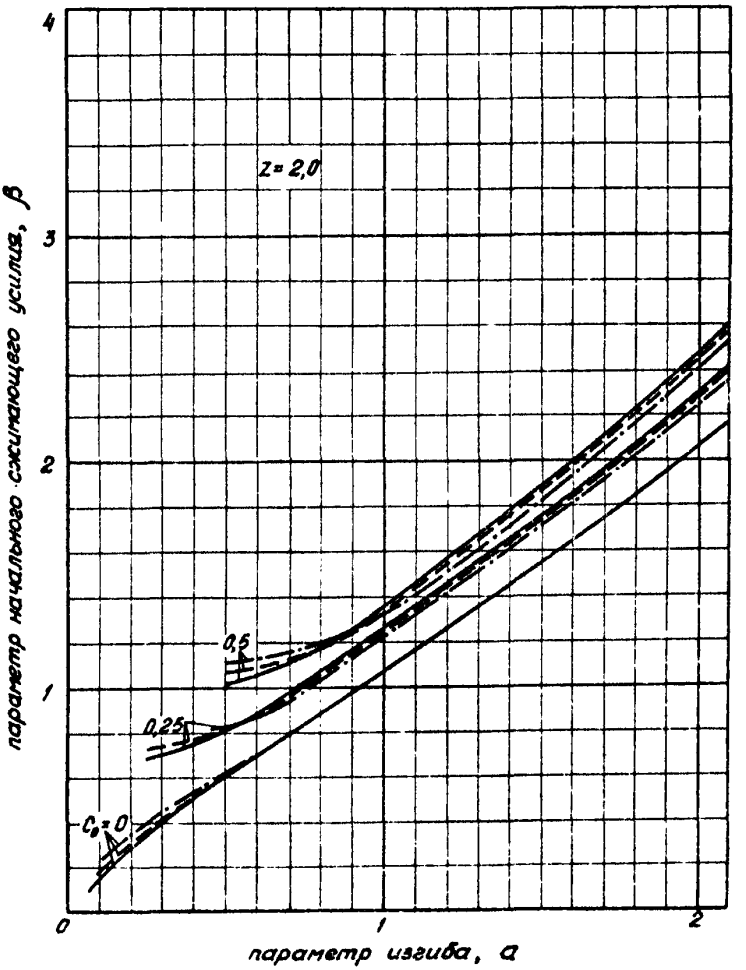

Рис.П.5.36. График для определения параметра α при $z = 2$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; —·— $a_0 = 0,2$

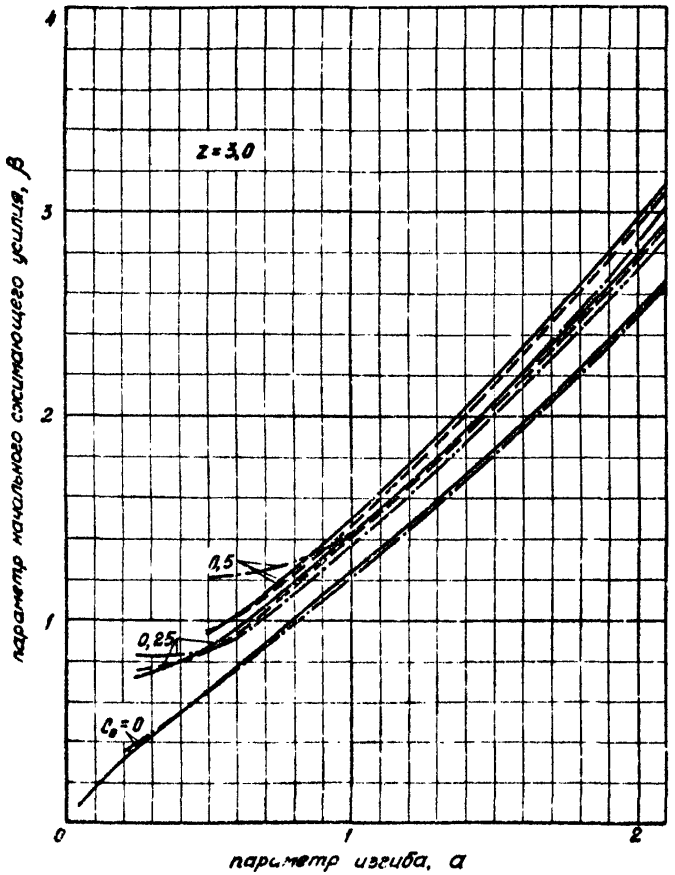

Рис.П.5.37. График для определения параметра α при $z = 3$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; —·—·— $a_0 = 0,2$

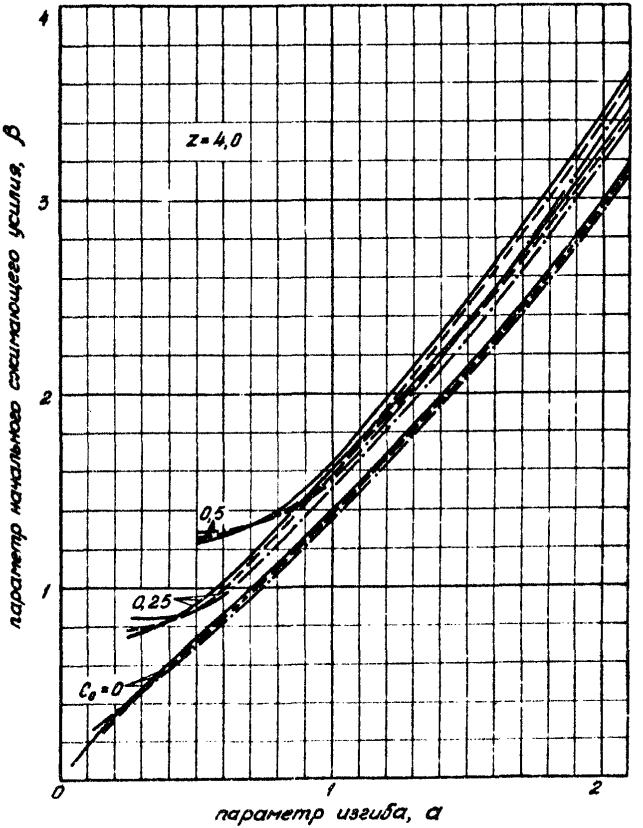

Рис.П.5.38. График для определения параметра α при $z = 4$.

——— $a_0 = 0,05$; – – – – $a_0 = 0,1$; —·—·— $a_0 = 0,02$

П.5.3. Номограммы для расчёта углов поворота, выполненных свободным изгибом трубопровода

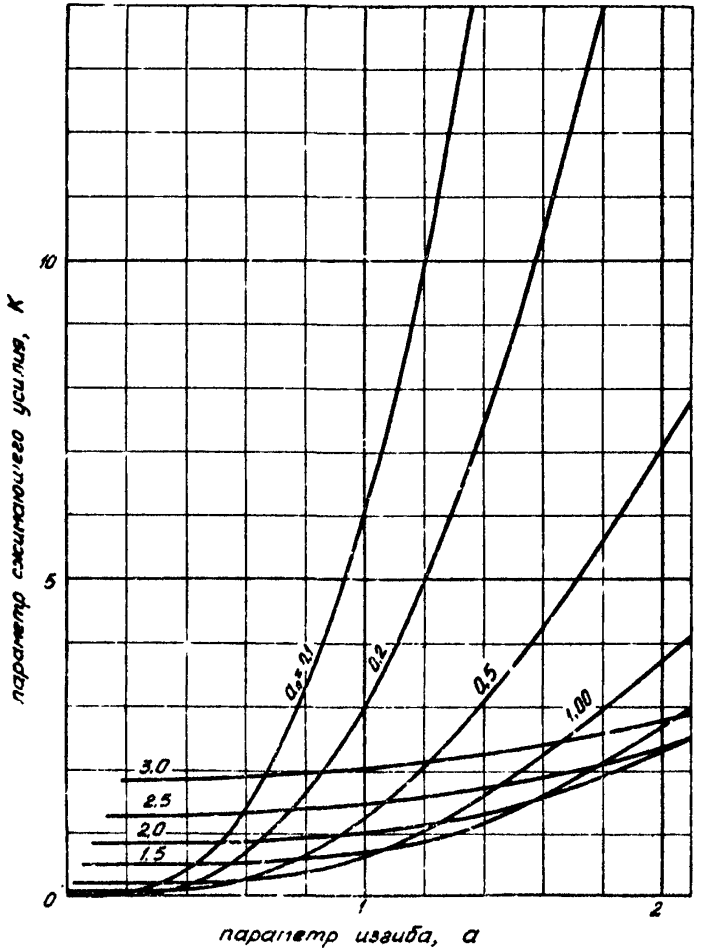

Рис.П.5.39. Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

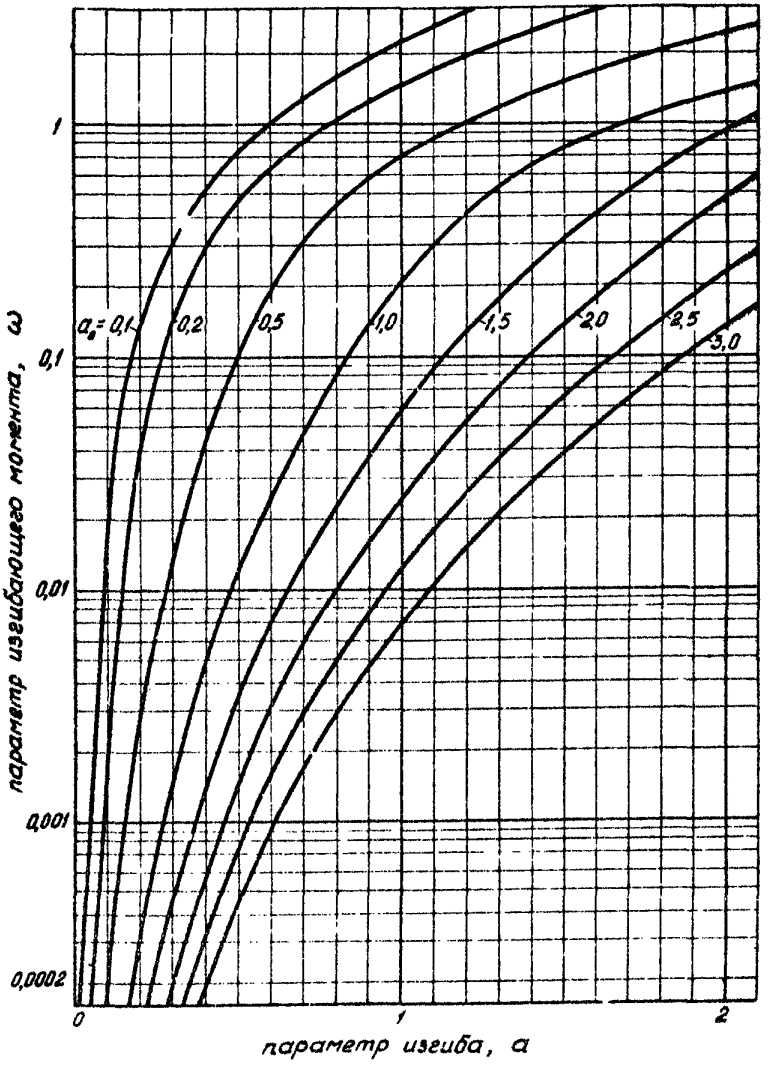

Рис.П.5.40. График для определения параметра изгибающего момента.

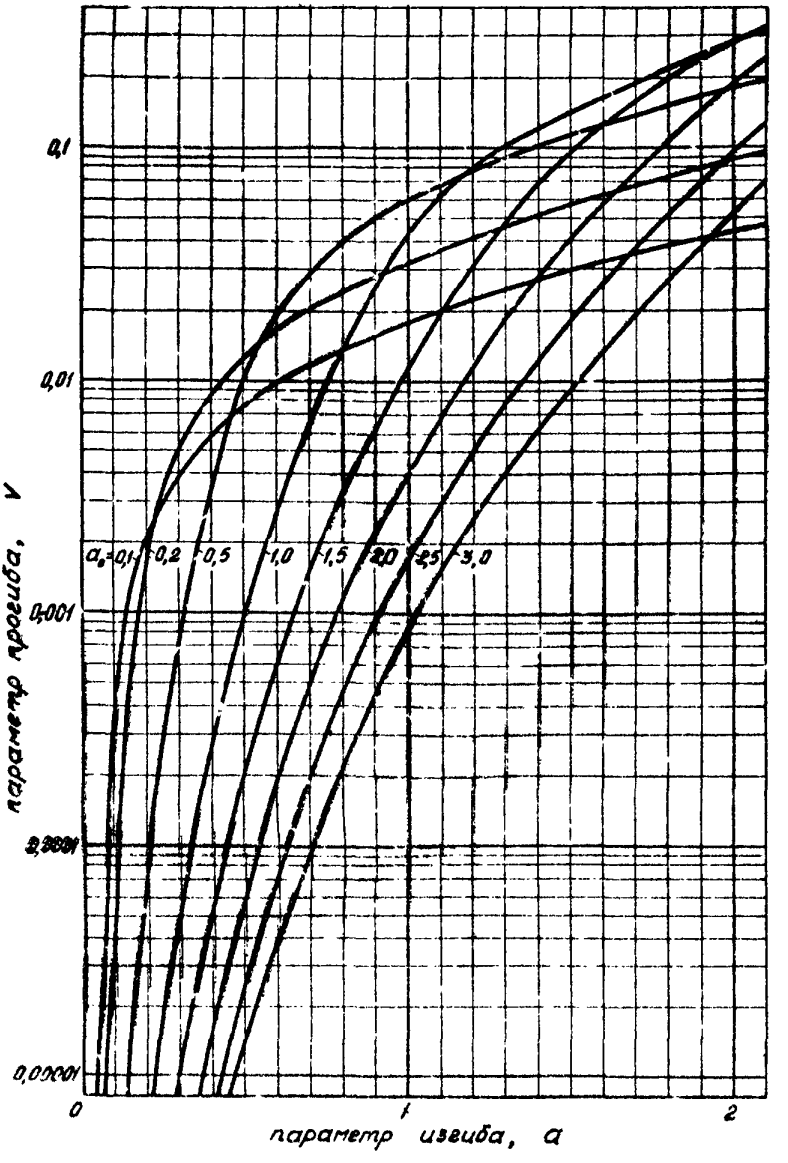

Рис.П.5.41. График для определения параметра прогиба.

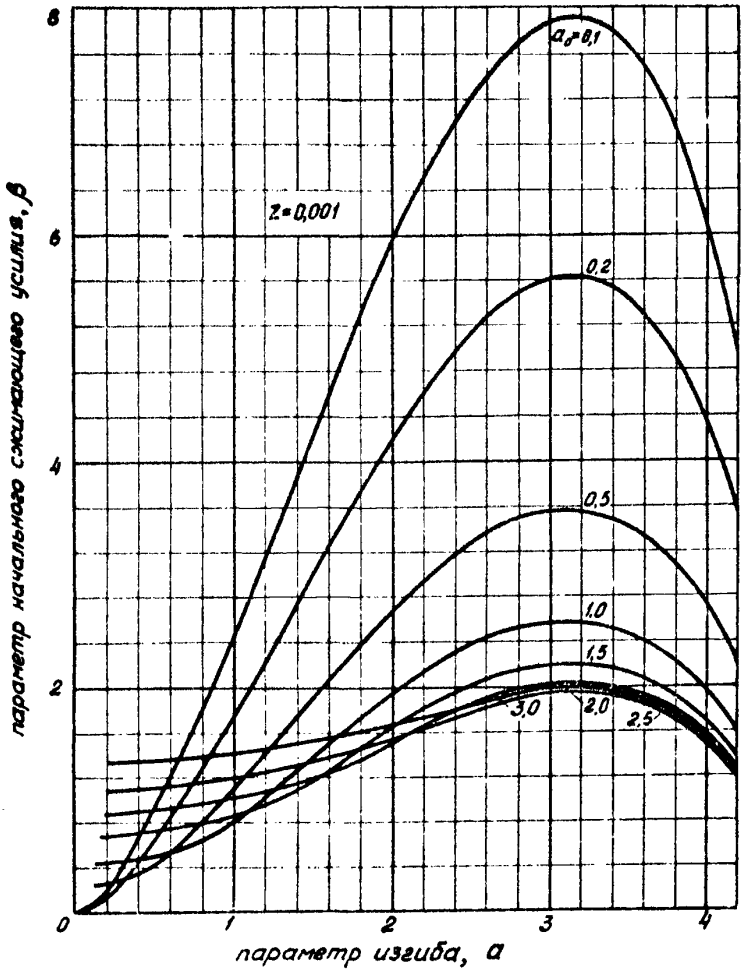

Рис.П.5.42. График для определения параметра α при $z = 0{,}001$.

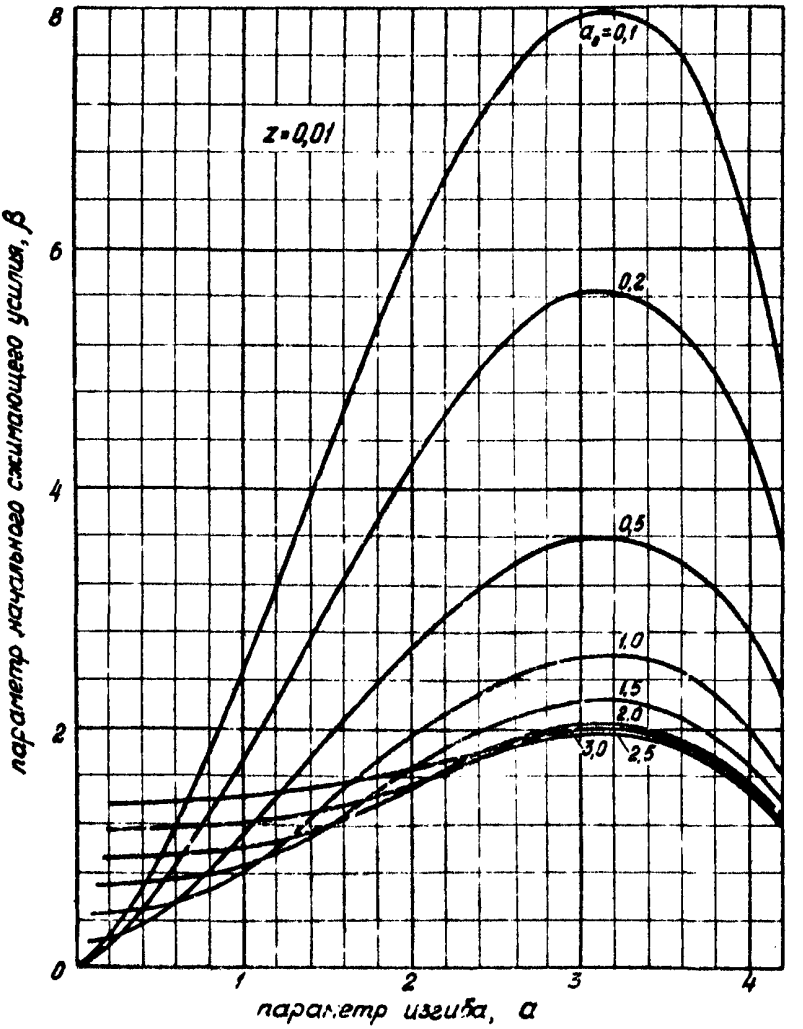

Рис.П.5.43. График для определения параметра α при $z = 0{,}01$.

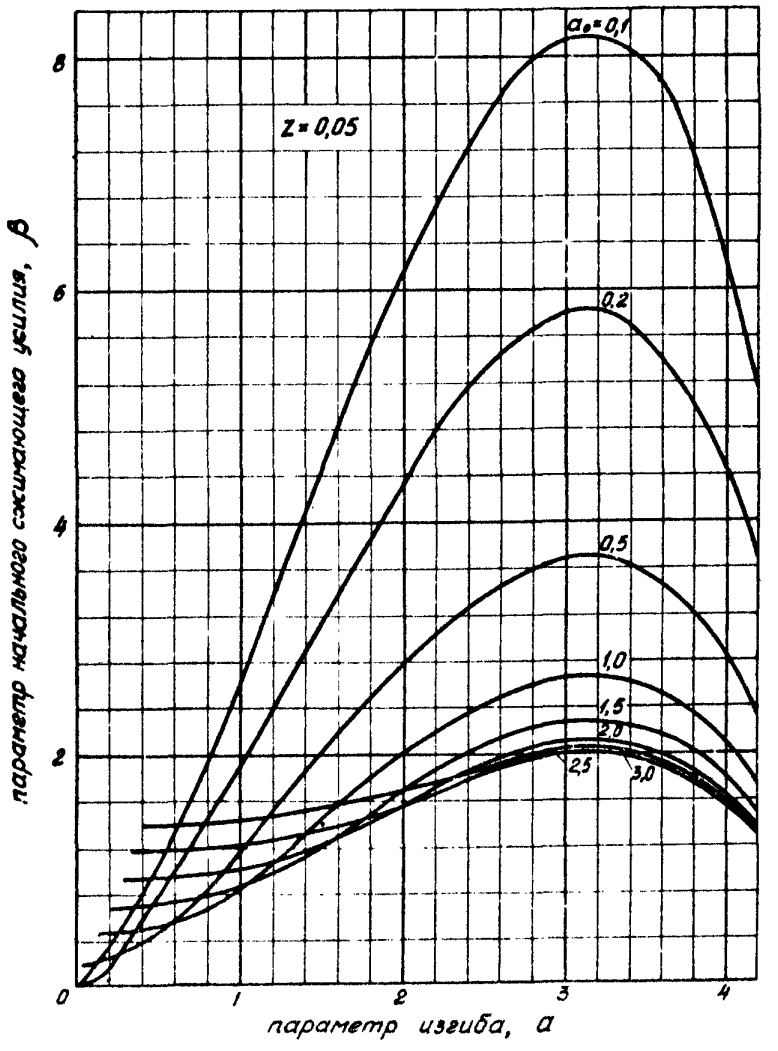

Рис.П.5.44. График для определения параметра a при $z = 0,05$.

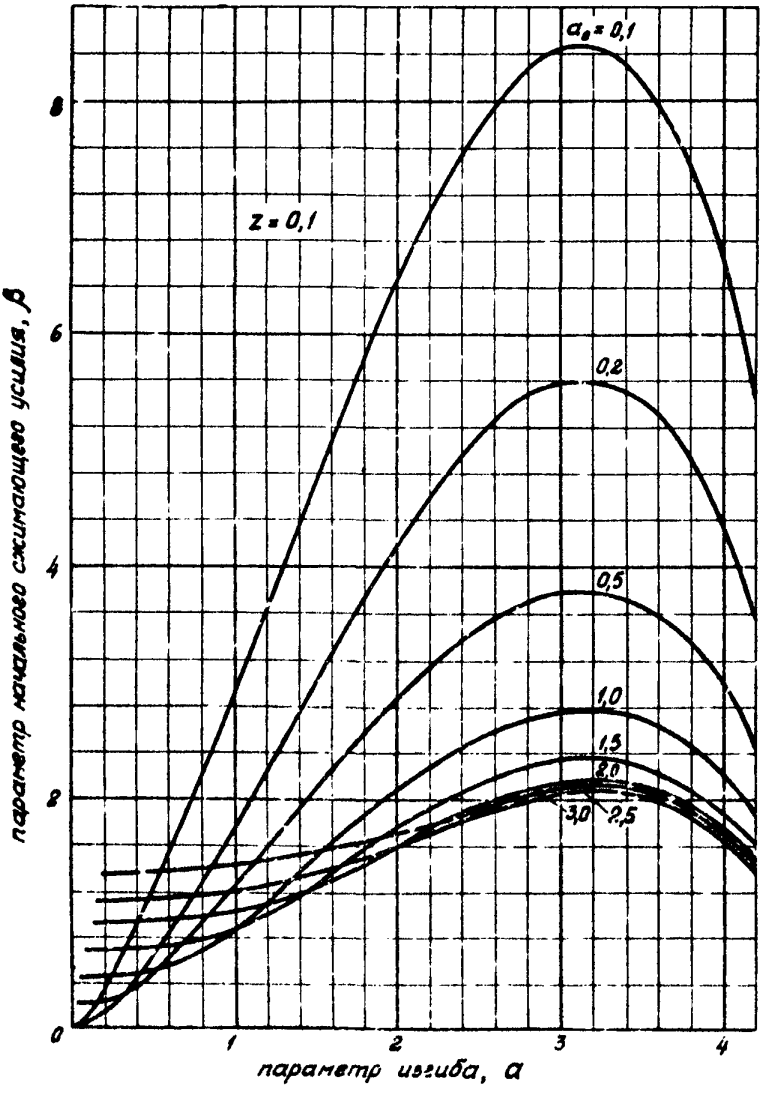

Рис.П.5.45. График для определения параметра α при $z = 0,I$.

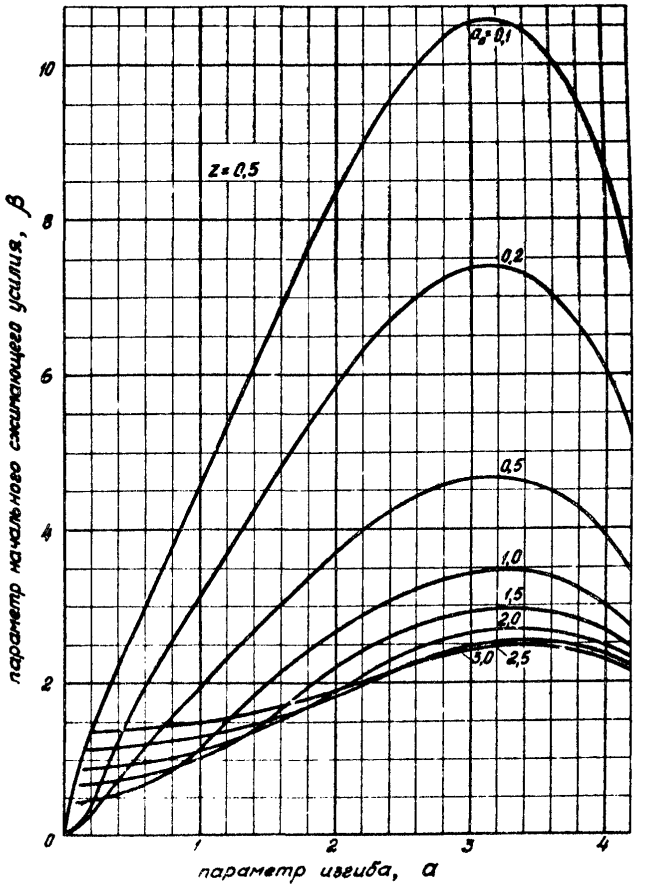

Рис.П.5.46. График для определения параметра α при $z = 0,5$.

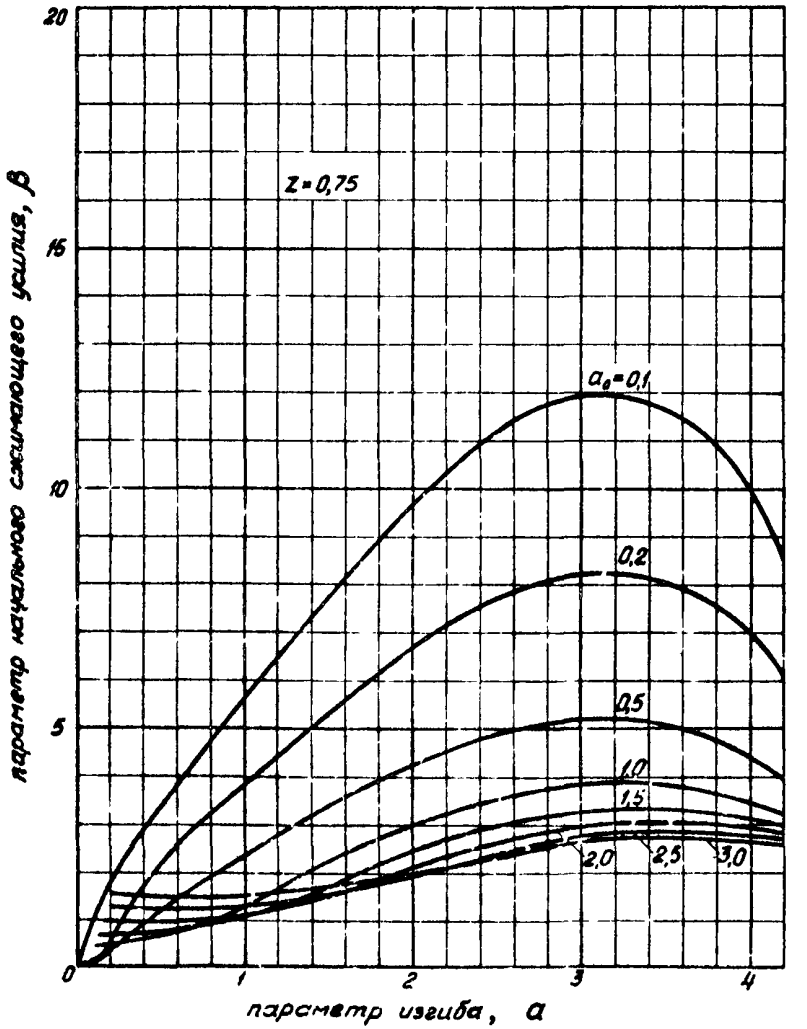

Рис.П.5.47. График для определения параметра a при $z = 0,75$.

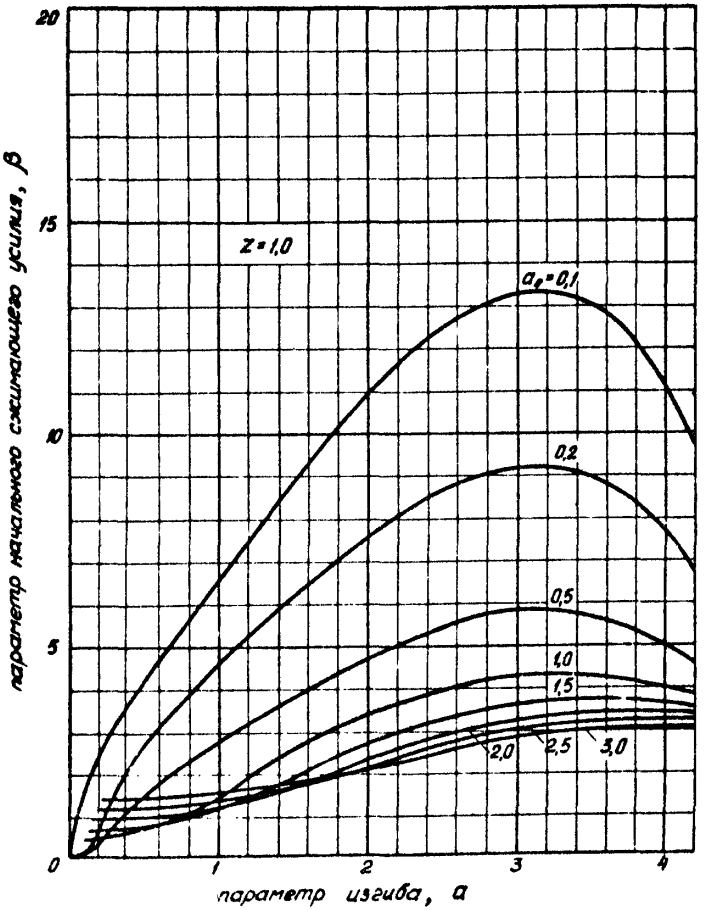

Рис.П.5.48. График для определения параметра a при $z = 1$.

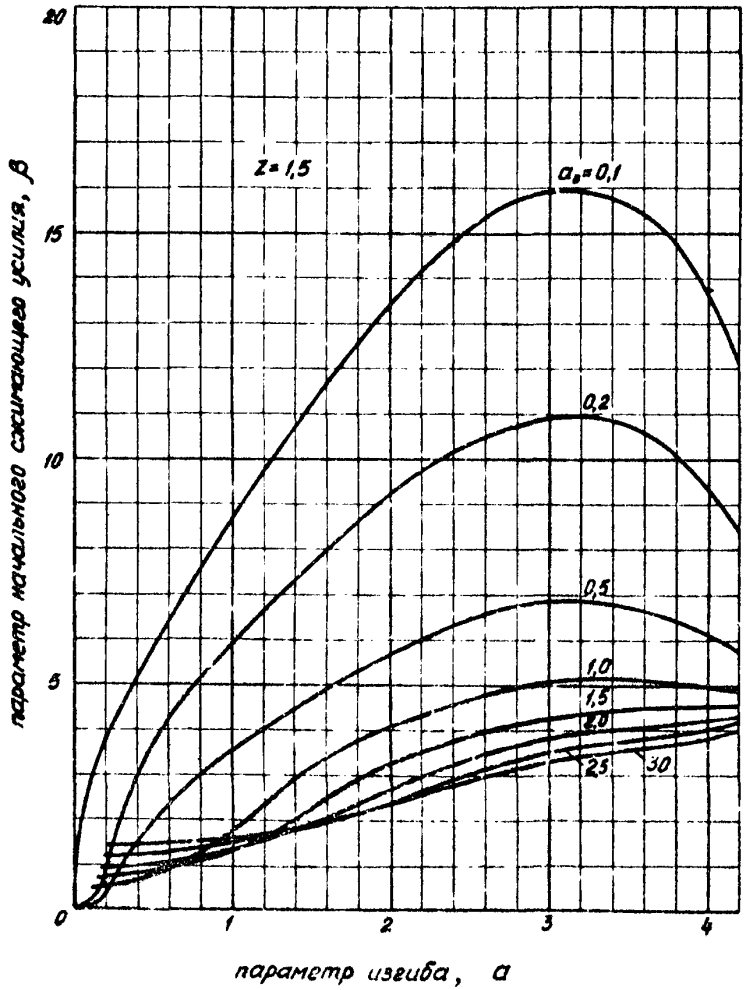

Рис.Д.5.49. График для определения параметра α при $z = 1{,}5$.

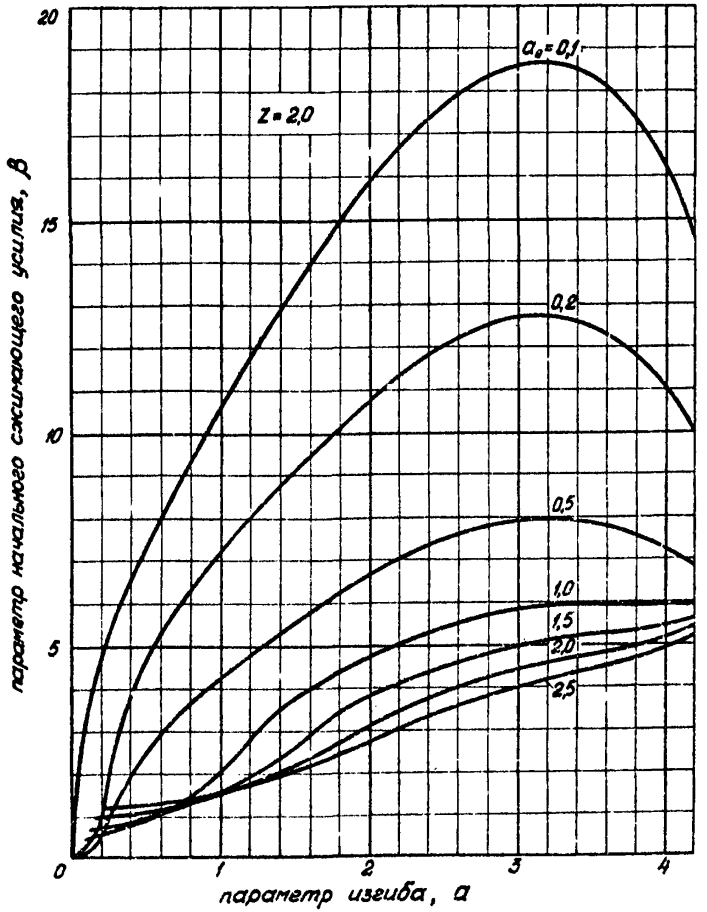

Рис.П.5.50. График для определения параметра a при $z = 2$.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1. Общие положения..... 3
2. Нагрузки и воздействия, возникающие при эксплуатации подземных трубопроводов..... 5
3. Проверка прочности, деформаций, устойчивости стенки трубы и общей устойчивости трубопровода в продольном направлении..... 8
4. Расчёт трубопровода на поворотах, выполненных сварными, крутозагнутыми коленами и прямыми вставками..... 13
5. Расчёт трубопровода на поворотах, выполненных холодногнутыми коленами и прямыми вставками..... 19
6. Расчёт упругоискривленных участков трубопроводов..... 23
7. Рациональная разбивка поворотов в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности..... 26
8. Графо-аналитический способ расчёта трубопровода..... 28
9. Графо-аналитический способ рациональной разбивки поворотов..... 35
10. Расчёт трубопровода на ЭЦВМ "ЕС-1022"..... 37
11. Расчёт трубопровода на ЭЦВМ "Наири-2"..... 38

Список литературы..... 41

Приложение 1. Примеры графо-аналитического способа расчёта трубопровода..... 44

Приложение 2. Примеры расчёта трубопровода на ЭЦВМ "ЕС-1022"..... 57

Приложение 3. Программы решения задачи на ЭЦВМ "Наири-2"..... 67

Стр.

Приложение 4. Примеры расчёта трубопровода на ЭЦВМ "Наири-2"..... 79

Приложение 5. Номограммы для определения напряжения и перемещения трубопровода..... 83

У К А З А Н И Я

ПО МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПЕРЕСЕЧЕННОМ РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ

РД 39-30-168-79

ВНИИСПТнефть

г. Уфа, просп. Октября, 144/3

Подписано к печати 16.08.79 ЦО3456

Формат 60х84/16. Уч.-изд.л. 6.1. Тираж 189 экз.

Заказ 170

Ротапринт ВНИИСПТнефти

gost.e-ecolog.ru