

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВНИИСПТнефть

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

РД 39-30-168-79

Уфа 1979

**Министерство нефтяной промышленности**  
**ВСЕОБЩИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ,**  
**ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**  
**"ВНИИСПТнефть"**

**УТВЕРЖДЕН**

**первым заместителем Министра**  
**В.Н.Кремлевым**  
**17 апреля 1978г.**

**У К А З А Н И Я**  
**ПО МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА И ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ**  
**ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПЕРЕСЕЧЕННОМ**  
**РЯБИМЫХ МЕСТНОСТИ**  
**РД 38-30-168-79**

**1978**

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

В настоящей редакции Указания учтены замечания и предложения институтов ВНИИСТ, Гипротрубопровод, Пжгипро нефтепровод, Гипротмненнефтегаз и др. отраслевых институтов, а также ведущих предприятия 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. Довадкиной и инженера Р.А. Фаткуллиной.

Замечания и предложения просим направлять по адресу:  
450055, г. Уфа-55, проспект Октября, 144/3, ВНИИСПНефть, 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 1.10.79г.

Срок действия до 1.10.84г.

Вводится 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, крутозагнутыми и холодногнутыми коленами, прямыми вставками и свободным кагибом. Кроме расчетной части даны оптимальные по уровню напряжений конструкции подземных трубопроводов на пересеченном рельефе местности.

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

1.2. Указания разработаны в развитие главы СНиП П-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 обсыпках, в торфяных и вечномёрзлых грунтах.

1.5. При расчёте и проектировании 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 пропускки очистных и разделительных устройств и для сварных и крутозагнутых колен составляет  $R > 5D_n$ ,

где  $D_n$  - наружный диаметр трубопровода.

1.9. Радиус кривизны холодногнутых колен составляет  $R = (30 + 35)D_n$ . В табл. I приведены значения радиусов кривизны холодногнутых колен для некоторых диаметров трубопроводов.

1.10. Радиус кривизны упругоискривлённых участков трубопровода в дол. см быть таким, чтобы продолвшее усилие и суммарные напри-

Таблица I

Радиусы кривизны холодногнутих 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 от изгиба, внутреннего давления и температурного перепада не превышали заданного предела, определяемого в соответствии с п.3.1 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**

2.1. 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, просадка и пучения грунта, давление оползающих грунтов.

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

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

$$\sigma_{кц}^n = \frac{\rho D_{вн}}{2\delta}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - рабочее (нормативное) давление в трубопроводе, кгс/см<sup>2</sup>;

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

$\delta$  - 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

$$\sigma_{пр} = 0,15 \frac{\rho D_{вн}}{\delta} \quad (2)$$

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

$$\sigma_{пр} = 0,25 \frac{\rho D_{вн}}{\delta}. \quad (3)$$

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

$$N_{ор} = (1 - 2\mu) \rho F_{св}, \quad (4)$$

где  $F_{св}$  - площадь сечения трубы в свету, см<sup>2</sup>, определяемой по формуле

$$F_{св} = \frac{\pi D_{вн}^2}{4} \quad (5)$$

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

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

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

$E$  - модуль упругости материала труб (для стали

$$E = 2,1 \cdot 10^6), \text{ кгс/см}^2;$$

$F$  - площадь стенки поперечного сечения трубы,  $\text{см}^2$ ;

$\Delta t$  - расчетный температурный перепад, т.е. разность между температурой металла труб при укладке и в процессе эксплуатации,  $^{\circ}\text{C}$ .

2.7. Изгиб действующего подземного трубопровода производится фиктивным усилием

$$N_g = \alpha E F \Delta t + (1 - 2\mu) P F c_b. \quad (7)$$

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

$$\sigma_{н.р.} = \pm \frac{E D_n}{2\rho}, \quad (8)$$

где  $\rho$  - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см ;

$D_n$  - наружный диаметр трубопровода, см.

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

$$q_{прод} = \gamma_n \frac{\pi D_{вн}^3}{4}, \quad (9)$$

где  $\gamma_n$  - объемный вес транспортируемой нефти или нефтепродукта,  $\text{кгс/см}^3$ .

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

$$q = q_{тр} + q_{дон} + 0,8 \left[ \gamma_{сп} D_n (h + 0,1 D_n) + \gamma_{р} (h + 0,5 D_n)^2 \text{tg}(0,7 \varphi_{рр}) + \frac{c_{сп}(h + 0,5 D_n)}{\cos(0,7 \varphi_{рр})} \right], \quad (10)$$

где  $q_{тр}$  - вес I см трубопровода с продуктом, кг/см;

$q_{дан}$  - вес грузов или удерживающая способность анкерных устройств, отнесенная к одному погонному сантиметру трубопровода, кгс/см;

$\gamma_{гр}$  - расчётный объёмный вес грунта засыпки над трубопроводом, кгс/см<sup>3</sup>;

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

$C$  - расчётное сцепление грунта, кгс/см<sup>2</sup>;

$h$  - глубина заложения трубопровода до верха трубы, см.

2.11. Сопротивление продольным перемещениям трубопровода определяется по формуле

$$P = Q_8 [(q_{гр} + q_{дан}) \operatorname{tg} \varphi_{гр} + 2\gamma_{гр} C_N \pi D_N^2 \operatorname{tg} \varphi_{гр} + 0,6 \pi D_N C_{гр}], \quad (II)$$

где  $C_N$  - 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 <sup>3</sup>	$\varphi_{гр}$ , град.	$C_{гр}$ , кгс/см <sup>2</sup>
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

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

$$\sigma_{np}^N \leq \psi_3 \frac{C}{K_N} R_s^N, \quad (12)$$

где  $\sigma_{np}^N$  - максимальные суммарные продольные напряжения, определяемые в соответствии с п.4.І и п.6.І ;

$\psi_3$  - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях ( $\sigma_{np}^N > 0$ ), принимаемый равным единице, при сжимающих ( $\sigma_{np}^N < 0$ ), определяемый по формуле

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left( \frac{\sigma_{кч}^N}{C \cdot R_s^N} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{кч}^N}{C \cdot R_s^N}, \quad (13)$$

$R_s^N$  - нормативное сопротивление металла труб, кг/см<sup>2</sup>, принимаемое равным минимальному значению предела текучести  $\sigma_T$  по государственным стандартам и техническим условиям на трубы ;

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

$K_N$  - 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  $\sigma_{np}^N < 0$  следует производить проверку устойчивости трубы.

3.3. Проверка устойчивости стенки трубы производится на условия

$$\sigma_{np}^N \leq m \sigma_{кр}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{кр}$  - критическое напряжение, кг/см<sup>2</sup>, 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 ;	IV
б) диаметром 1200 мм и более	III
Для транспортирования нефти или нефтепродуктов :	
а) диаметром менее 700 мм ;	IV
б) диаметром 700 мм и более	III

Таблица 4

## Значения коэффициента надёжности

Условный диаметр трубопровода, мм	Значение коэффициента надёжности, $K_n$			
	Для газопроводов в зависимости от внутреннего давления $P$ , кгс/см <sup>2</sup>			Для нефтепроводов и нефтепродуктопроводов
	$P \leq 55$	$55 < P \leq 75$	$75 < P \leq 100$	
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

$$S_{кр} = \left( \frac{8,268}{D_n - \delta} + 0,85 \right) R_2^2, \quad (15)$$

$m$  - коэффициент условия работы трубопровода, принимаемый равным 0,9 для трубопроводов III и IV категорий, 0,75 для I и II категорий и 0,6 для категорий B.

3.4. Проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении производится из условия

$$N_0 \leq m N_{0кр}, \quad (16)$$

где  $N_{0кр}$  - 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 значенных продольного сжимающего усилия меньше критических происходят продольные и поперечные перемещения трубопровода. Толщина слоя грунта над трубопроводом после перемещений должна быть не менее предусмотренной СНиП П-45-75. Исходя из этого, при указанных условиях глубина заложения трубопровода до верха трубы на изогнутом участке определяется по формуле

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

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 П-45-75,

принимаемая не менее:

при диаметре менее 1000 мм - 0,8 м;

при диаметре 1000 мм и более - 1 м;

в неочечных Жаркенах, считая от нижних отметок межбарханных оснований - 1 м;

в скальных грунтах при отсутствии проседа 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

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

где  $[V]$  - предельно-допускаемое, по эксплуатационным и технологическим условиям, поперечное перемещение трубопровода, м.

гическим условиям, поперечное перемещение трубопровода, см.

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

$$[V] = m (h - h^n). \quad (19)$$

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

$$\sigma_{\text{пр.н}} \leq \psi_2 \frac{R_1^n m}{K_1 K_N}, \quad (20)$$

где  $\sigma_{\text{пр.н}}$  - продольное осевое напряжение от расчётных нагрузок и воздействий, кгс/см<sup>2</sup>, определяемое согласно п.3.8 ;

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

$K_1$  - коэффициент безопасности по материалу, определяемый в соответствии со СНиП П-45-75 и принимаемый значениями на интервале 1,34 + 1,55 ;

$\psi_2$  - коэффициент, учитывающий двухосное напряжённое состояние металла труб, при растягивающих продольных напряжениях ( $\sigma_{\text{пр.н}} > 0$ ) принимается равным единице, при сжимающих ( $\sigma_{\text{пр.н}} < 0$ ) определяется по формуле

$$\psi_2 = \sqrt{1 - 0,75 \left( \sigma_{\text{кч}} \frac{K_1 K_N}{R_1^n m} \right)^2} - 0,5 \sigma_{\text{кч}} \frac{K_1 K_N}{R_1^n m}. \quad (21)$$

где  $\sigma_{\text{кч}}$  - кольцевые напряжения от расчётного внутреннего давления, кгс/см<sup>2</sup>, определяемые по формуле

$$\sigma_{\text{кч}} = \frac{n P D_{\text{вн}}}{2\delta}, \quad (22)$$

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

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

$$\sigma_{пр.н} = -\alpha E \Delta t + 0,15 \frac{p D_{вн}}{\delta} \quad (25)$$

#### 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) возникает в середине изогнутого участка. Если поворот выполнен двумя коленами с прямой вставкой между ними: (рис. П.5.1.в, рис. П.5.1.г), небольшие 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

$$\sigma_{пр.д.г}^N = \frac{N}{F} \pm \frac{M_{д.г}}{W} \quad (24)$$

где  $\sigma_{пр.д}^N$  - продольные напряжения в середине прямой вставки, кгс/см<sup>2</sup>;

$\sigma_{пр.г}^N$  - продольные напряжения в сечениях сопряжения прямой вставки с коленами, кгс/см<sup>2</sup>;

$N$  - 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<sup>3</sup>.

4.4. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле

$$M_{a1} = \omega_{a1} \sqrt[3]{q(EJ \operatorname{tg} \varphi)^2}, \quad (25)$$

где  $J$  - момент инерции сечения трубопровода, см<sup>4</sup> ;

$\varphi$  - половина угла поворота трубопровода, град. ;

$\omega_{a1}$  - 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

$$N = \frac{\rho \pi D_{a1}^2}{4} \sqrt[3]{EJ \left( \frac{\kappa q}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^2}, \quad (26)$$

где  $\kappa$  - 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

$$v_{a1} = \tilde{v}_{a1} \sqrt[3]{\frac{EJ}{q} \cdot \operatorname{tg}^4 \varphi}, \quad (27)$$

где  $\tilde{v}_{a1}$  - 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

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

где  $\alpha$  - безразмерный параметр изгиба, определяемый в соответствии с п.4.8.

Параметр  $\alpha$  может иметь значения в интервале  $0 < \alpha < 4,49$ .

4.8. Безразмерный параметр изгиба  $\alpha$  определяется по графикам на рис.П.5.8 + рис.П.5.20 или решением уравнения

$$\beta = 0,18515 + 0,79952\alpha - 0,21052\alpha^2 - 0,14653\alpha^3 + 0,42639\alpha^4 + 0,23451\alpha^5 + z(0,53221 - 1,40940\alpha + 2,93494\alpha^2 + 0,58275\alpha^3 - 1,20971\alpha^4 - 0,38304\alpha^5) \quad (29)$$

где  $\beta$  - безразмерный параметр начального сжимающего усилия, определяемый по формуле

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

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

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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (при известных  $\beta$  и  $C_0$ ), то принимают

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{Z - Z_1}{Z_2 - Z_1} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (32)$$

Так, например, имеем:  $\beta = 1,0$ ,  $C_0 = 0,2$ ,  $Z = 0,4$ . График для определения  $\alpha$  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  $\alpha_1 = 1,10$  а при  $Z_2 = 0,5$  имеем  $\alpha_2 = 1,04$ . Тогда

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

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

$$\omega_0 = 0,01267 + 0,10933a - 0,3484C_0 + 0,09517a^2 - 0,15055C_0a + 0,14766C_0^2, \quad (33)$$

где  $C_0$  - безразмерный параметр длины прямой вставки, определяемый по формуле

$$C_0 = \frac{C_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{KQ}{EJtg\varphi}}, \quad (34)$$

где  $C_1$  - длина прямой вставки, см ;

$K$  - 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  $K$  определяется по графику на рис. П.5.3 или по формуле

$$K = 0,01795 + 0,61641a + 0,65487C_0 + 0,00923a^2 - 0,02872C_0a + 0,44409C_0^2. \quad (36)$$

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

$$\tilde{V}_0 = 0,03307 - 0,1145a + 0,03114C_0 + 0,0892a^2 + 0,11283C_0a + 0,23934C_0^2. \quad (37)$$

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  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  и  $\tilde{\nu}$  определяются по графикам на рис.П.5.3+рис.П.5.20 или по формулам

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

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

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

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

Параметры  $\beta$  и  $Z$  определяются по формулам (30) и (31).

4.15. Характер перемещений подвешенного 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  $Z \ll 0,1$ .

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

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

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.II. Он равен максимуму кривых зависимостей параметра изгиба от параметра начального сжимающего усилия на указанных рисунках. Здесь  $C_2$  определяется по формуле ( 34 ),  $K$  по формулам ( 36 ) и ( 41 ) для  $\alpha$  берётся то значение, где кривые по графикам на рис. П.5.8+рис. П.5.II имеют максимум.

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

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

4.19. В области  $Z > 0,1$  потеря общей устойчивости трубопровода в продольном направлении не происходит. Перемещения трубопровода монотонно увеличиваются с ростом сжимающего усилия  $N^0$ . 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  $l \leq 0,6C_2$ , то на изогнутом участке имеется один угол поворота. Здесь расчёт и проверка условия  $l \leq 0,6C_2$  выполняются по формулам для углов поворота, выполненных только сварными или крутозагнутыми коленами. Если  $0,6C_2 < l \leq 1,2C_2$ , то и при выполнении поворота несколькими прямыми вставками на изогнутом участке будет два угла поворота и одна прямая вставка. Здесь проверка условия  $0,6C_2 < l \leq 1,2C_2$  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 кругозагнутой колен использовать холодногнутое 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 ВСТАЖКАМИ

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  $\omega_{a_1}$  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  $\bar{V}_{a_1}$  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  $\alpha$  определяется в соответствии с п. 5.6.

5.6. Безразмерный параметр изгиба  $\alpha$  определяется по графиком на рис. П.5.26+рис.П.5.38 или решением уравнения

$$\begin{aligned} \beta = & 0,59813 + 0,17207a + 1,05654c_0 + 0,07348a_0 + \\ & + Z(1,19061a - 0,74538c_0 - 0,48605a_0 - \\ & - 1,33728) , \end{aligned} \quad ( 45 )$$

где параметр  $\beta$  определяется по формуле (30) и параметр

определяется по формуле (31).

Если отсутствует график с найденным по формуле (31) значением  $\alpha$ , 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

$$\omega_0 = -0,10073 + 0,34442\alpha - 0,52752c_0 - 0,43902\alpha_0, \quad (46)$$

где  $c_0$  определяется по формуле (34);

$$\alpha_0 = x_0 \sqrt{\frac{Kq}{EJtg\varphi}}; \quad (47)$$

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

$R$  - радиус кривизны колена, см.

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

$$\omega_1 = -0,05585 + 0,28068\alpha - 0,26005c_0 - 0,34226\alpha_0. \quad (49)$$

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

$$K = 0,02015 + 0,61008\alpha + 1,06415c_0 + 0,10210\alpha_0. \quad (50)$$

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

$$\bar{v}_0 = -0,01002 + 0,07761\alpha - 0,06941c_0 - 0,08504\alpha_0. \quad (51)$$

5.11. Безразмерный параметр прогиба для оечений сопряжения прямого вставки с коленами определяется по графикам на рис.П.5.25 или по формуле

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

5.12. При выполнении полорста холодногнутом коленом продольное из рязание, изгибающий момент, продольное усилие и прогиб определяются по формулам (24), (25), (26) и (27), а безразмерные параметры  $a$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  и  $\bar{v}$  определяются по графикам на рис.П.5.21 + рис.П.5.38 или по формулам

$$\begin{aligned} \beta &= 0,053792 + 0,64892a - 4,47482a_0 - 0,15335a^2 - \\ &- 0,00211a \cdot a_0 + 7,67712a_0^2 + z ( 0,73537 - \\ &- 2,35922a + 5,32465a_0 + 0,83378a^2 - 0,84890a \cdot a_0 - \\ &- 5,01950a_0^2 ) ; \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \omega &= - 0,00266 + 0,12712a - 0,16428a_0 + 0,09395a^2 - \\ &- 0,19104a_0 \cdot a - 0,03199a_0^2 ; \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \kappa &= - 0,04225 + 0,70335a + 0,54566a_0 - 0,03867a^2 - \\ &- 0,20948a_0 \cdot a - 0,15422a_0^2 ; \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \bar{v} &= 0,00278 - 0,03162a + 0,03001a_0 + 0,05406a^2 - \\ &- 0,02602a \cdot a_0 - 0,06008a_0^2 . \end{aligned} \quad (56)$$

Параметры  $\beta$  и  $z$  определяются по формулам (30) и (31).

5.13. Потери общей устойчивости трубопровода в продольном направлении происходит при значениях  $z < 0,1$ . В этой области необходимо проверить общую устойчивость трубопровода согласно п.3.4.

5.14. Начальное сжимающее усилие, при котором наступит 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  $L_0$  определяется по формуле (34),  $\alpha_0$  — по формуле (47),  $K$  — по формуле (50) и (55), для  $\alpha$  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 холодными колоннами, если на изогнутом участке один или два угла поворота. При этом, если  $l \leq 1,2(\alpha_0 + 0,5C_g)$ , то на изогнутом участке имеется один угол поворота. Здесь расчёт и проверка условия  $l \leq 1,2(\alpha_0 + 0,5C_g)$  выполняются по формулам для углов поворота, выполненных только холодными теми колоннами.

Если  $1,2(\alpha_0 + 0,5C_g) < l \leq 1,2(\alpha_0 + C_g)$ , то на изогнутом участке имеется два угла поворота. Здесь расчёт и проверка условия  $1,2(\alpha_0 + 0,5C_g) < l \leq 1,2(\alpha_0 + C_g)$  выполняются по формулам для углов поворота, выполненных двумя холодными колоннами с

прямой вставкой между ними.

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

## 6. РАСЧЁТ УПРУГОСКРИВЛЁННЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

6.1. Максимальные поперечные перемещения и продольные напряжения при выполнении поворота упругим изгибом трубы (рис. П.5.1 д) возникают в середине изогнутого участка.

6.2. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе определяется по формуле

$$\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}} = \frac{N}{F} \pm \left( \frac{M}{W} + \frac{ED_{\text{н}}}{2\rho} \right), \quad (57)$$

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

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

где  $\omega$  - безразмерный параметр изгибающего момента, определяемый в соответствии с п.6.8;

$A_0$  - амплитуда начального упругого прогиба, см, определяемая в соответствии с п.6.10.

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

$$N = \rho \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4} - \sqrt{k \frac{EJ}{A_0} q}. \quad (59)$$

6.5. Максимальные поперечные перемещения трубопровода определяются по формуле

$$V = A_p \cdot \bar{V}, \quad (60)$$

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

6.6. Длина изогнутого участка трубопровода определяется по формуле

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

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

6.7. Безразмерный параметр изгиба  $\alpha$  определяется по графикам на рис.П.5.42+рис.П.5.50 или решением уравнения

$$\begin{aligned} \beta = & -0,09384 + 2,77552\alpha - 1,98347\alpha_0 - 0,45166\alpha^2 - \\ & - 0,09809\alpha_0\alpha + 0,58858\alpha_0^2 + Z(1,82039 + 0,13395\alpha - \\ & - 1,19675\alpha_0 + 0,02651\alpha^2 + 0,09894\alpha_0\alpha + 0,14492\alpha_0^2), \end{aligned} \quad (62)$$

где

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

$$Z = \frac{\pi A_0}{4} \sqrt{\frac{2PF}{J}} \sqrt[4]{\left(\frac{A_2}{q}\right)^3 \frac{1}{EJ}}. \quad (64)$$

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

$$\begin{aligned} \omega = & 0,12273 + 0,81659\alpha - 0,61916\alpha_0 + 0,36318\alpha^2 - \\ & - 0,67499\alpha_0\alpha + 0,30721\alpha_0^2, \end{aligned} \quad (65)$$

где  $\alpha_0$  - безразмерный параметр длины волны начального упругого прогиба, определяемый по формуле

$$\alpha_0 = \frac{l_0}{2} \sqrt[4]{K \frac{q}{EJ} \cdot \frac{1}{A_0}}, \quad (66)$$

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

$$K = 0,35188 + 1,18905a - 1,53659a_0 + 1,40264a^2 - 1,76410a_0a + 1,06997a_0^2 : \quad (67)$$

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

$$\bar{V} = -0,03404 - 0,01412a + 0,09661a_0 + 0,04111a^2 + 0,01069a_0a - 0,04166a_0^2 . \quad (68)$$

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  $a$  берется 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 заделки 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

$$C_{opt} = 2C_{сжат} \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \frac{EJ}{q} \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \quad (71)$$

где  $C_{opt}$  — 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 П-45-75 должна быть не менее диаметра трубопровода и не менее 250 мм.

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

$$C_{opt} = \begin{cases} 0,0514a^2 + 0,3858a & \text{при } a \leq 2,7, \\ 0,7346a^2 - 5,8768a + 11,9286 & \text{при } a > 2,7, \end{cases} \quad (72)$$

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

$$C_{\text{опт}}^{\text{н}} \begin{cases} 0,0514a^2 + 0,3858a - 0,4555a_0 & \text{при } a \leq 2,7+2a_0, \\ 0,7346a^2 - 5,8768a - 2,7320a_0^2 + 4,6904a_0 + 11,69286 & \text{при } a > 2,7+2a_0. \end{cases} \quad (73)$$

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  $0,6C_{\text{опт}} < l \leq 1,2C_{\text{опт}}$

Проверка условия  $0,6C_{\text{опт}} < l \leq 1,2C_{\text{опт}}$  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  $1,2(x_0 + C,5C_{\text{опт}}) < l \leq 1,2(x_0 + C_{\text{опт}})$ . Проверка условия  $1,2(x_0 + 0,5C_{\text{опт}}) < l \leq 1,2(x_0 + C_{\text{опт}})$  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 эверным или крутозагнутым коленом.

1) Устанавливаются значения исходных величин:  $D_N$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $R_1^N$ ,  $R_2^N$ ,  $K_N$ ,  $c$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $h^N$ ,  $h$ ,  $P$ ,  $\Delta t$ ,  $\varphi$ ,  $q_{тр.}$ ,  $q_{дот.}$ ,  $\delta_{зр}$ ,  $\varphi_{зр}$ ,  $c_{зр}$ .

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  $\beta$  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  $\alpha$ .

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

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 под  $c_0 = 0$  или по формуле (42) находится параметр прогиба  $\tilde{\nu}$ .

13) Вычисляется изгибающий момент по формуле (25).

14) Вычисляется продольное усилие по формуле (26).

15) Вычисляется продольное напряжение по формуле (24).

16) Вычисляется поперечные перемещения трубопровода по формуле (27).

17) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода по

формуле (28).

18) Если  $Z \leq 0,1$ , то вычисляется параметр  $\beta_{np}$  по формуле (44) и  $N_{np}$  по формуле (43).

19) Производится проверка прочности трубопровода из условий (12) и (20).

20) Производится проверка устойчивости стенки трубы из условия (14).

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

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

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

24) Если  $l \leq 0,6C_2$ , то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими коленами и прямыми вставками.

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

1) Устанавливаются значения исходных величин:  $D_n$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $R_1^N$ ,  $R_2^N$ ,  $K_n$ ,  $c$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $h^N$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\Delta t$ ,  $C_1$ ,  $\varphi$ ,  $q_{np}$ ,  $q_{доп}$ ,  $\beta_{np}$ ,  $C_{np}$ .

2) Вычисляется начальное усилие  $N_0$  по формуле (?).

3) Вычисляется сопротивление поперечным и продольным перемещениям трубопровода по формулам (10) и (11).

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

5) Вычисляются параметры  $\beta$  и  $Z$  по формулам (30) и (31).

6) Принимается  $C_0 = 0$  и по графикам рис.П.5.8+рис.П.5.20 находится параметр изгиба  $\alpha$ .

7) По графику рис.П.5.3 при  $C_0 = 0$  или по формуле (4I) 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  $\alpha$ .

10) По графику рис.П.5.3 или по формуле (4I) находится  $K$ , используя при этом последние значения  $\alpha$  и  $C_0$ .

11) Повторяется п.п.8.10 до тех пор, пока разность между предыдущими и последними значениями  $C_0$  не будет менее 0,01.

12) По графикам рис.П.5.4 и рис.П.5.5 или по формулам (35), (34) находятся параметры  $\omega_0$  и  $\omega_1$ .

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

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.II или по формуле (44) и  $N_{0кр}$  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 условий (18).

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

21) Если  $0,6C_0 < l < 1,2C_0$ , 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:  $D_N, \delta, J, F, W, R_1^N, R_2^N, K_N, C, m, n, h^N, h, \rho, \Delta t, \varphi, R, q_{тр}, q_{вон}, \gamma_{ср}, \varphi_{ср}, C_{ср}$ .

2) Вычисляются  $N_0, q$  и  $\rho$  по формулам (7), (10) и (11).

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

4) Вычисляются параметры  $\beta$  и  $z$  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  $\alpha$ .

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.5.36 находится параметр  $\alpha$ .

9) По графику рис.П.5.21 (при  $c_0 = 0$ ) или по формуле (55) находится  $K$ , используя при этом последние значения  $\alpha$  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  $\omega$  и  $\bar{v}$ .

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

дения 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  $N_{кр}$  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  $l \leq 1,2(x_0 + 0,5C_s)$ , то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими колесами и прямыми вставками.

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

1) Устанавливаются значения исходных величин:  $D_n$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $R'_1$ ,  $R'_2$ ,  $K_n$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $h''$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\Delta t$ ,  $\varphi$ ,  $R$ ,  $C_b$ ,  $\varphi_{тр}$ ,  $\varphi_{дан}$ ,  $\delta_{кр}$ ,  $\varphi_{кр}$ ,  $C_{кр}$ .

2) Вычисляются  $N_0$ ,  $q$  и  $\rho$  по формулам (7), (10) и (11).

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

4) Вычисляются параметры  $\beta$  и  $Z$  по формулам (30) и (31).

5) Принимаются  $C_0 = 0$  и  $C_0 = 0$  и по графикам рис.П.5.8+рис.П.5.20 находится параметр  $\alpha$ .

6) По графику рис.П.5.3 при  $a_0 = 0$  и  $c_0 = 0$  или по формуле (4I) 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.5.2I 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  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ ,  $\bar{v}_0$  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 условия (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 (16).

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

продольном направлении.

19) Если  $I,2(x_0 + 0,5C_0) < l \leq I,2(x_0 + C_0)$ , то данный алгоритм может быть использован для расчёта трубопроводов на поворотах, выполненных несколькими коленами и прямыми вставками.

8.5. Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

1) Устанавливаются значения исходных величин:  $D_H$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $R_1^H$ ,  $R_2^H$ ,  $K_H$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $h^H$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\Delta t$ ,  $L_0$ ,  $\rho$ ,  $q_{тр}$ ,  $q_{дон}$ ,  $\gamma_{вр}$ ,  $\varphi_{вр}$ ,  $C_{вр}$ .

2) Вычисляются  $N_0$ ,  $q$  и  $\rho$  по формулам (7), (10) и (11).

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

4) Вычисляются  $A_0$ ,  $\beta$  и  $Z$  по формулам (63), (64) и (69).

5) Принимается  $\alpha_0 = 0,1$  и по графикам рис.П.5.42+рис.П.5.50 находится параметр изгиба  $\alpha$ .

6) По графику рис.П.5.39 при  $\alpha_0 = 0,1$  или по формуле (67) находится параметр  $K$ .

7) Вычисляется параметр  $\alpha_0$  по формуле (66).

8) Используя последнее значение  $\alpha_0$ , по графикам рис.П.5.42+рис.П.5.50 находится параметр  $\alpha$ .

9) По графику рис.П.5.39 или по формуле (67) находится  $K$ , используя при этом последние значения  $\alpha$  и  $\alpha_0$ .

10) Повторяются п.п.7+9 до тех пор, пока разность между предыдущим и последним значениями  $\alpha_0$  не будет менее 0,01.

11) По графикам рис.П.5.40 и рис.П.5.41 или по формулам (65) и (68) находятся  $\omega$  и  $\bar{V}$ .

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

13) Вычисляется длина изогнутого участка по формуле (61).

14) По графикам рис.П.5.42+рис.П.5.50 определяется параметр

$\beta_{кр}$ .

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

16) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении из условия (16).

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.

### 9. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАЦИОНАЛЬНОЙ РАЗБИВКИ ПОВОРОТОВ

Разбивка углов поворота производится в следующей последовательности.

1) Устанавливаются значения исходных величин:  $D_n$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $R_2^m$ ,  $K_n$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $h^m$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\Delta t$ ,  $\varphi$ ,  $q_{mp}$ ,  $q_{dcm}$ ,  $\gamma_{cp}$ ,  $C_{cp}$ .

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

3) Вычисляются сопротивления поперечным и продольным перемещениям трубопровода по формулам (10) и (11).

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

5) Вычисляются параметры  $\beta$  и  $z$  по формулам (30) и (31).

6) Принимаются  $a_0 = 0$  и  $c_0 = 0$  и по графикам рис.П.5.8+ рис.П.5.20 находится параметр изгиба  $a$ .

7) Определяется параметр  $K$  при  $a_0 = 0$  и  $c_0 = 0$  по рис.П.5.3 или по формуле (41).

8) Вычисляется параметр  $a_0$  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  $\alpha_0$  и  $C_{0,опт}$  определяется параметр  $\alpha$  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  $\alpha$ ,  $\alpha_0$  и  $C_{0,опт}$ , 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  $C_{0,опт}$  не будет менее 0,01.

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

14) Определяются параметры  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ ,  $\bar{V}_0$  и  $\bar{V}_1$  по графиком рис.П.5.4+рис.П.5.7 или по формулам (33), (34), (37) и (38) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагну-  
тых колен и по графиком рис.П.5.22+рис.П.5.25 или по формулам (46), (49), (51), (52) при конструировании поворота с использова-  
нием 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 графиком рис.П.5.8+рис.П.5.17 или по формуле (44) при конструировании поворота с использованием сварных или крутозагнутых колен и по графиком рис.П.5.26+рис.П.5.29 или по формуле (44) при конст-

руировании поворота с использованном холодногогнутых 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  $z \ll 0,1$  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  $1,2(x_0 + 0,5 C_{опт}) < l \leq 1,2(x_0 + C_{опт})$ , то данный алгоритм справедлив для рациональной разбивки поворотов с использованием нескольких холодногогнутых колен и прямых вставок.

## 10. РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВ1"ЕС-1022"

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

10.2. Входной информацией для эксплуатации программы являются исходные данные:  $D_n$ ,  $\delta$ ,  $J$ ,  $F$ ,  $W$ ,  $P_{вн}$ ,  $q_{тр}$ ,  $q_{доп}$ ,  $R$ ,  $h$ ,  $\delta_{зр}$ ,  $C_{зр}$ ,  $\varphi_{зр}$ ,  $R_s^N$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $K_n$ , тип грунта (песчаный или глинистый), код варианта конструкции поворота трубопровода (сварное или крутозагнутое колено, сварные или крутозагнутое колена с прямой вставкой между ними, холодногогнутое колено, два холодногогнутое 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  $\Delta t$ ,  $2\varphi$ ,  $\rho$  и  $l_0$ , а для всех их возможных значений для рассчитываемого магистрального трубопровода.

10.4. Выходной информацией являются:  $\sigma_{np0}^n$ ,  $\sigma_{np1}^n$ ,  $\sigma_{np}^n$ ,  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V$ ,  $(\psi_2 \frac{C}{K_n} R_2^n)$ ,  $\sigma_{кр}$ ,  $N_{кр}$ ,  $N_0$ ,  $N$ ,  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M$ ,  $\sigma_{кн}$ ,  $\rho$ ,  $q$ ,  $\sigma_0$ .

10.5. При выполнении поворота с использованием прямой вставки 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 ВНИИСПНефть.

## II. РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦВМ "НАИРИ-2"

II.1. Программа решения задачи записывается на алгоритмическом языке и в такой записи вводится в машину.

II.2. для обозначения величины на машине имеются специаль-

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

$D_{2n} - \phi$ ;  $\delta - \sigma$ ;  $J - и$ ;  $F - ч$ ;  $W - ш$ ;  $R_2^* - и_1$ ;  
 $K_n - и_2$ ;  $C_2 - и_3$ ;  $m - m$ ;  $h^* - ц_1$ ;  $h - ц_2$ ;  $P - g$ ;  
 $\Delta t - t$ ;  $\varphi - f$ ;  $C_0 - c_1$ ;  $R - r_1$ ;  $l_0 - l_0$ ;  $g - r_2$ ;  
 $(Q_{np} + Q_{дон}) - л_1$ ;  $\gamma_{zp} - л_2$ ;  $\varphi_{zp} - л_3$ ;  $l_{zp} - c_2$ ;  $a - a$ ;  
 $N_0 - \pi_1$ ;  $q - y$ ;  $C_n - z$ ;  $p - p$ ;  $\beta$ /определяемый по формуле (30),(31) / -  $\delta_1$ ;  $\beta$ /определяемый через безразмерные параметры  $a$ ,  $a_0$ ,  $C_0$  / -  $\delta_2$ ;  $Z - Z$ ;  $K - x$ ;  $C_2 - c_0$ ;  
 $\tilde{V} - и$ ;  $\alpha_0 - o$ ;  $\tilde{V}_0 - и_0$ ;  $\tilde{V}_1 - и_1$ ;  $\omega - x$ ;  $\omega_0 - x_0$ ;  
 $\omega_1 - x_1$ ;  $\sigma_{np}^* - z$ ;  $\sigma_{np}^* - z_0$ ;  $\sigma_{np}^* - z_1$ ;  $\psi - u$ ;  $l - l$ ;  
 $V_0 - и_0$ ;  $V_1 - и_1$ ;  $(m \sigma_{np}) - и_2$ ;  $(\varphi_2 \frac{C}{K_n} R_2^*) - и_2$ ;  
 $[W] - и_2$ ;  $m N_{сnp} - \pi_2$ ;  $A_0 - и_2$ ;  $\tilde{V}_{10} - и_2$ ;  $\delta_1 = \sigma_1$  (шаг изменения  $a$ )

При составлении программы для обозначения типа грунта используются буквы  $\phi$  и  $\delta$ . При песчаном грунте обозначено  $\delta = I$  и  $\phi = 0$ , а при глинистом -  $\delta = 0$  и  $\phi = I$ .

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

$\phi$   $\delta$   $m$   $ч$   $ш$   $и_1$   $и_2$   $и_3$   $m$   $ц_1$   $ц_2$   $g$   $t$   $л_1$   $л_2$   
 $л_3$   $c_2$   $z$   $\delta$

Кроме того вводятся:

1) 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:

$$f \quad r_1 \quad c_1$$

5) при выполнении поворота свободным изгибом трубопровода:

$$l_0 \quad r_2$$

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,  $(\psi_s \frac{C}{R_s} R_s^N)$ ,  $m\sigma_{кр}$ ,  $[V]$  и  $mN_{о,кр}$ . 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 А.Б. Программирование для цифровой вычислительной машины "Наирн". 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 I - 46 - 73. Издание ЦИТИ ВНИИСтр, 1974.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение I

ПРИМЕРЫ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА РАСЧЁТА  
ТРУБОПРОВОДА

П.1.1. Расчёт трубопровода на прочность и устойчивость.

Пример I. Нефтепровод диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 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  $6^\circ$ . Внутреннее давление в трубопроводе равно  $50 \text{ кгс/см}^2$ , а температурный перепад составляет  $60^\circ\text{C}$ . Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны  $140600 \text{ см}^4$ ,  $3906 \text{ см}^3$  и  $223 \text{ см}^2$ . Вес трубы с продуктом  $5,0 \text{ кгс/см}$ . Предел текучести материала трубы  $3600 \text{ кгс/см}^2$ , временное сопротивление  $5200 \text{ кгс/см}^2$ .

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

Согласно табл.3 нефтепровод относится к III-категории. Для трубопроводов III-категории имеем  $c = 1$ ,  $K_N = 1$  и  $m = 0,9$ . Согласно СНиП П-45-75 принимаем  $n = 1,15$ ,  $K_1 = 1,4$ .

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1) Поворот выполнен сварным или крутозагнутым коленом.

По формуле (7) начальное сжимающее усилие

$$N_0 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 223 \cdot 60 + (1 - 2 \cdot 0,3) \cdot 50 \cdot 3850 = 414145 \text{ кгс}$$

Здесь по (5)

$$F_{c0} = \frac{3,14 \cdot 70^2}{4} = 3850 \text{ см}^2.$$

Согласно (10) и (11)

$$\begin{aligned} q &= 50 + 0,8[0,0012 \cdot 72(80 + 0,11 \cdot 72) + 0,0012(80 + 0,5 \cdot 72) \cdot 2 \cdot 10^6] = \\ &= 14,81 \text{ кгс/см}. \end{aligned}$$

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

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

$$c_N = 0,46.$$

По формуле (13)

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

Здесь  $\sigma_{N4}^N = \frac{50 \cdot 70^2}{2 \cdot 1} = 1750 \text{ кгс/см}^2.$

Несущая способность грубопровода по формуле (12)

$$\psi_B \frac{c}{K_N} R_s^N = 0,665 \cdot 3600 = 2390 \text{ кгс/см}^2.$$

По формуле (15)

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

По (20)  $\psi_B \frac{R_s^N m}{K_1 K_N} = 3243 \text{ кгс/см}^2.$

По формулам (30) и (31)

$$\beta = 414145 \sqrt[3]{\frac{1}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600} \left( \frac{0,0524}{14,81} \right)^2} = 1,445.$$

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

По графику рис.П.5.II при  $c_0 = 0$  имеем  $\sigma = 2,134.$

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

$$\omega = 0,69084, \quad \kappa = 1,294, \quad \check{V} = 0,2415.$$

Тогда согласно (25)

$$M = 0,69084 \sqrt[3]{14,81(2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600 \cdot 0,0524)^2} = 10579167 \text{ кгс}\cdot\text{см}.$$

По формуле (26)

$$N = 50 \cdot \frac{3,14 \cdot 70^2}{4} - \sqrt[3]{2,1 \cdot 10^6 \left( \frac{1,294 \cdot 14,81}{0,0524} \right)^2} = -148052 \text{ кгс}.$$

По формуле (24) продольные сжимающие напряжения

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

Продольные растягивающие напряжения

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

Имеем  $3372 > 2390 \text{ кгс/см}^2$ , т.е. условие (I2) не выполняется и прочность трубопровода не обеспечена. По формуле (23)  $\sigma_{пр-N} = -1452 \text{ кгс/см}^2$ . На прямолинейных участках прочность обеспечена, т.к. имеем  $1452 < 3243 \text{ кгс/см}^2$ . Устойчивость стенки трубы не обеспечена, т.к. условие (I4) не выполняется:

$$3373 > 0,9 \cdot 3479 = 3130 \text{ кгс/см}^2.$$

Общая устойчивость трубопровода в продольном направлении обеспечена, т.к. имеем  $z > 0,1$ . Проверка (I6) не требуется.

По формуле (27)

$$V = 0,2415 \sqrt[3]{\frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600}{14,81} \cdot 0,0524^4} = 12,8 \text{ см}.$$

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

Определим длину изогнутого участка по формуле (28)

$$l = 2,134 \sqrt[3]{\frac{I}{1,294} \cdot \frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600}{14,81} \cdot 0,0524} = 1985 \text{ см.}$$

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

Параметр  $a_0$  по формуле (47)

$$a_0 = 131 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,294 \cdot 14,81}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600 \cdot 0,0524}} = 0,129.$$

Здесь по (48)  $k_0 = 2500 \cdot 0,0524 = 131 \text{ см.}$

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  $a = 2,134$ ,  $K = 1,297$ ,  $a_0 = 0,141$ . Расность 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  $M = 942760 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -148541 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{\text{кр}}^M = -3080 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $\sigma_{\text{кр}}^N = 1748 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $V = 12,6 \text{ см}$ . По (28) длина изогнутого участка  $l = 2167 \text{ см}$ .

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 стенок труб 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-

ных вставок или увеличить глубину заложения трубопровода.

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

Длина прямой вставки II м .

По формуле (34), используя найденное выше значение  $K$  для случая исполнения поворота сварным или крутозагнутым коленом, вычислим параметр  $C_0$  .

$$\text{Итак } C_0 = \frac{1100}{2} \sqrt{\frac{1,294 \cdot 14,81}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600 \cdot 0,0524}} = 0,605 .$$

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)  $C_0 = 0,628$ . При новом приближении имеем  $\alpha = 1,387$ ,

$K = 1,510$ ,  $C_0 = 0,634$ . Разность между предыдущим и последним значениями  $C_0$  менее 0,01 и по этому приближение 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  $M_0 = 663638$  кгс·см,  $M_1 = 2785363$  кгс·см и  $N = -184854$  кгс.

По формулам (24) и (27) максимальные напряжения и прогиб трубопровода:  $\sigma_{np0}^N = -1000$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{np1}^N = -1542$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_0 = 3,4$  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 II м .

По формулам (34) и (47), используя значение  $K$  для случая исполнения поворота сварным или круговым коленом, находим  $a_0 = 0,135$  и  $c_0 = 0,581$ .

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)  $a_0 = 0,148$  и  $c_0 = 0,596$ . При новом приближении имеем  $a = 1,447$ ,  $K = 1,526$ ,  $a_0 = 0,149$ ,  $c_0 = 0,598$ . Разность между предыдущим и последним значениями  $c_0$  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  $\omega_0 = 0,02152$ ,  $\omega_1 = 0,1493$ ,  $\bar{V}_0 = 0,0566$  и  $\bar{V}_1 = 0,0509$ .

По формулам (24), (25), (26) и (27) находим  $M_0 = 327159$  кгс·см,  $M_1 = 2269152$  кгс·см,  $N = -187512$  кгс,  $\sigma_{\text{доп}}^N = -925$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{\text{доп}}^M = -1422$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_0 = 3,0$  см и  $V_1 = 2,7$  см. По (28)  $l = 1273$  см.

Согласно п.п.3.1, 3.3, 3.7, 5.12 прочность, устойчивость отенки 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)

$$A_0 = \frac{5000^2}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 60000} = 21,1 \text{ см.}$$

Согласно (63) и (64) имеем

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

$$z = \frac{3,14 \cdot 21,1}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot 6,05 \cdot 225}{140600} \cdot \sqrt{\left(\frac{21,1}{14,81}\right)^2 \cdot \frac{1}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 140600}}} = 0,1$$

Вычислениями по формулам (57) + (70) и по графикам на рис.П.5.39+рис.П.5.50 находим  $\sigma_{np}^N = -2254 \text{ кгс/см}^2$ ,

$N_{0, np} = 933234 \text{ кгс}$ . 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 II 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  $6^\circ$ . Внутреннее давление равно  $45 \text{ кгс/см}^2$ , температурный перепад составляет  $60^\circ\text{C}$ . Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны  $43900 \text{ см}^4$ ,  $8704 \text{ см}^3$  и  $349 \text{ см}^2$ . Вес трубы с продуктом  $10 \text{ кгс/см}$ . Предел текучести материала трубы  $3600 \text{ кгс/см}^2$ .

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

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

Согласно п.3.3 имеем  $m = 0,9$ .

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1) Поворот выполнен сварным или кругозагнутом коленом.

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

По формулам (12), (13) и (15)  $\psi_s = 0,587$ ,  $\psi_s \frac{C}{K_u} R_s^N = 2115 \text{ кгс/см}^2$  и  $\sigma_{np}^N = 3384 \text{ кгс/см}^2$ .

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

Вычислениями или по соответствующим графикам находим  $\omega = -0,3748$ ,

$K = 0,917$ ,  $\tilde{V} = 0,06907$ ,  $M = 14990748 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -243665 \text{ кгс}$ . Продольные сжимающие напряжения  $\sigma_{np}^N = -2420 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ .

Прогиб  $V = 4,4 \text{ см}$ . Длина изогнутого участка  $l = 2369 \text{ см}$ .

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 40 м.

Вычислениями и по соответствующим графикам находим  $a = 1,428$ ,  $a_0 = 0,168$ ,  $K = 0,922$ ,  $\omega = 0,2967$  и  $\bar{V} = 0,0675$ .  
Находим  $M = 11868753 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -245850 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{np}^N = -2068 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $V = 4,3 \text{ см}$  и  $l = 2271 \text{ см}$ .

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

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

Длина прямой вставки 14 м.

Вычислениями и по графикам находим  $a = 0,941$ ,  $\omega_0 = 0,0269$ ,  $\omega_1 = 0,10762$ ,  $\bar{V}_0 = 0,0219$ ,  $\bar{V}_1 = 0,0188$ ,  $C_0 = 0,408$ ,  $K = 0,995$ . Тогда имеем  $M_0 = 1075905 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $M_1 = 4304718 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -276710 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{np_0}^N = -917 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $\sigma_{np_1}^N = -1287 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $V_0 = 1,4 \text{ см}$ ,  $V_1 = 1,2 \text{ см}$  и  $l = 1615 \text{ см}$ .

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

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

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

Вычислениями и по графикам находим  $a = 0,991$ ,  $a_0 = 0,173$ ,  $C_0 = 0,354$ ,  $K = 1,002$ ,  $\omega_0 = 0,0087$ ,  $\omega_1 = 0,0703$ ,  $\bar{V}_0 = 0,0173$ ,  $\bar{V}_1 = 0,0157$ . Тогда имеем  $M_0 = 346243 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $M_1 = 2813307 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -279635 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{np_0}^N = -841 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $\sigma_{np_1}^N = -1125 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ,  $V_0 = 1,1$ ,  $V_1 = 1,0 \text{ см}$  и  $l = 1516 \text{ см}$ .

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость

трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

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

По формуле (69)

$$A_0 = \frac{5000^2}{2.3,14^2 \cdot 90000} = 14,1 \text{ см.}$$

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

Вычислениями по формулам (57) + (70) и по графикам на рис. II.5.39 + рис. II.5.50 находим  $\sigma_{np}^n = -2097 \text{ кгс/см}^2$ ,

$N_{0,kr} = 2682482 \text{ кгс}$ . 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 обрезающей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, равный  $6^\circ$ . Внутреннее давление равно  $40 \text{ кгс/см}^2$ , температурный перепад составляет  $60^\circ\text{C}$ . Геометрические характеристики трубы:  $J = 964700 \text{ см}^4$ ,  $W = 15810 \text{ см}^3$ , и  $F = 530 \text{ см}^2$ . Вес трубы с продуктом  $13 \text{ кгс/см}$ . Предел текучести материала трубы  $3600 \text{ кгс/см}^2$ .

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

Согласно табл. 3 нефтепровод относится к III-категории. Тогда имеем  $C = 1$ ,  $K_n = 1$  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)  $N_0 = 979911 \text{ кгс}$ ,  $q = 53,47 \text{ кгс/см}$  и  $\rho = 19,72 \text{ кгс/см}$ . По формулам (12) и (15)

$\psi_3 \frac{C}{K_N} R_2^N = 2244 \text{ кгс/см}^2$  и  $\sigma_{кр} = 3405 \text{ кгс/см}^2$ . По формулам (30) и (31)  $\beta = 1,044$   $z = 0,449$ . Вычислениями и по соответствующим графикам находим  $\omega = 0,36005$ ,  $K = 0,895$ ,  $\tilde{V} = 0,065$ ,  $M = 25923425 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -425036 \text{ кгс}$ . Продольные напряжения  $\sigma_{пр}^N = -2442 \text{ кгс/см}^2$ . Прогиб  $V = 5,0 \text{ см}$ . Длина изогнутого участка  $l = 2114 \text{ см}$ .

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 холодногогнутым коленом.

Радиус кривизны колена 50 м.

Вычислениями и по соответствующим графикам находим

$a = 1,584$ ,  $a_0 = 0,241$ ,  $K = 0,902$ ,  $\omega = 0,2498$  и  $\tilde{V} = 0,0584$ .  
Находим  $M = 17988377 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -429560 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{пр}^N = -1948 \text{ кгс/см}^2$ ,  $V = 4,5 \text{ см}$  и  $l = 2104 \text{ см}$ .

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 12 м.

Вычислениями и по графикам находим  $a = 0,919$ ,  $\omega_0 = 0,026$ ,  $\omega_1 = 0,1041$ ,  $\tilde{V}_0 = 0,0208$ ,  $\tilde{V}_1 = 0,0169$ ,  $C_0 = 0,398$ ,  $K = 0,970$ . Тогда имеем  $M_0 = 1883171 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $M_1 = 7493736 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ,  $N = -473069 \text{ кгс}$ ,  $\sigma_{пр}^N = -1012 \text{ кгс/см}^2$ ,  $\sigma_{пр}^N = -1367 \text{ кгс/см}^2$ ,  $V_0 = 1,6 \text{ см}$ ,  $V_1 = 1,3 \text{ см}$  и  $l = 1369 \text{ см}$ .

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

Радиус кривизны колена 50 м, длина прямой вставки 5 м.

Вычислениями и по графикам находим  $a = 0,991$ ,  $a_0 = 0,249$ ,

$C_p = 0,319$ ,  $K = 0,984$ ,  $\omega_0 = 0,00183$ ,  $\omega_1 = 0,0531$ ,  $\tilde{V}_0 = 0,014$ ,  
 $\tilde{V}_1 = 0,0129$ . Тогда имеем  $M_0 = 132362$  кгс·см,  $M_1 = 3819919$  кгс·см,  
 $N = -481717$  кгс,  $\sigma_{np0}^N = -917$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{np1}^N = -1151$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 $V_0 = 1,1$  см,  $V_1 = 1,0$  см и  $l = 1467$  см.

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

Радиус упругого изгиба оси трубопровода 1000 м, длина волны начального прогиба 50 м.

По формуле (69) имеем  $A_0 = 12,7$  см. Согласно (63) и (64) находим  $\beta = 0,424$  и  $Z = 0,029$ .

Вычислениями по формулам (57) + (70) и по графикам на рис.П.5.39 + рис.П.5.50 находим  $\sigma_{np}^N = -2288$  кгс/см<sup>2</sup>,

$N_{окр} = 4621276$  кгс. Прогиб незначителен.

Устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Условие (12) не выполнено. С целью снижения напряжений можно увеличить радиус упругого изгиба трубопровода.

Так, например, при  $\rho = 1200$  м и  $l_0 = 50$  м имеем  $A_0 = 10,6$  см,  $\beta = 0,387$  и  $Z = 0,023$ . Продольные напряжения

$$\sigma_{np}^N = -2074 \text{ кгс/см}^2.$$

Прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

П.1.2. Рациональная разбивка угла поворота.

Нефтепровод диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 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 90°. Внутреннее давление в трубопроводе равно 50 кгс/см<sup>2</sup>, а температурный перепад составляет 70°C. Геометрические характеристики трубы:  $J = 140600$  см<sup>4</sup>,  $W = 3906$  см<sup>3</sup> и  $F = 223$  см<sup>2</sup>. Вес трубы с продуктом 5,0 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см<sup>2</sup>.

Характеристики грунта: объёмный вес  $\gamma_{op} = 0,0012$  кгс/см<sup>3</sup>, угол внутреннего трения  $\varphi_{op} = 23^\circ$ , сцепление  $c_{op} = 0$ .

Согласно табл.3 нефтепровод относится III-категории. Для трубопроводов III-категории имеем  $C = I$  и  $K_u = I$ .

1) Поворот конструируется с использованием сварных или крутозагнутых колен.

Начальное ожимающее усилие по формуле (7)  $N_0 = 47341$  кгс. Сопротивления поперечным и продольным перемещениям по (10) и (11)  $q = 14,81$  кгс/см и  $p = 8,05$  кгс/см. Несущая способность трубопровода  $2390$  кгс/см<sup>2</sup> и критическое напряжение  $3479$  кгс/см<sup>2</sup>.

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

По графику рис.П.5.13 при  $C_0 = 0$  имеем  $a = 1,945$ .

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

Оптимальная длина прямой вставки равна

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

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

По формулам (24), (25), (26) и (27) имеем  $M_0 = 1721320$  кгс·см,  $M_1 = 5859954$  кгс·см,  $N = -177918$  кгс,  $\sigma_{пр}^n = -1239$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{пр}^h = -2298$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_0 = 15,93$  см и  $V_1 = 13,02$  см. *по (38)  $l = 1730$  см.*

Согласно п.п.3.1, 3.3, 4.15 прочность, устойчивость стенки трубы и общая устойчивость трубопровода обеспечены. Глушину 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)  $C_{\text{опт}} = 0,900$  и  $a_0 = 0,215$ .

По графику рис.П.5.34  $a = 2,060$ . Находим  $K = 2,240$ ,  
 $C_{\text{опт}} = 0,910$ ,  $a_0 = 0,221$ . При новом приближении  $a = 2,066$ ,  
 $K = 2,245$ ,  $C_{\text{опт}} = 0,915$  и  $a_0 = 0,222$ . Разность между предыду-  
щими и последними значениями  $C_{\text{опт}}$  менее 0,01 в приближении  
заканчиваем. Оптимальная длина прямой вставки  $C_{\text{опт}} = 1025$  см.

По графикам рис.П.5.22 + 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,  $\sigma_{\text{пр}2}^N = -1003$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 $\sigma_{\text{пр}1}^N = 2097$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_0 = 14,67$  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.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦМ ЭС-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<sup>2</sup>. Геометрические характеристики трубы:  $J = 443900 \text{ см}^4$ ,  $W = 8704 \text{ см}^3$ ,  $F = 349 \text{ см}^2$ . Вес трубы с продуктом 10 кгс/см. Предел текучести материала трубы 3600 кгс/см<sup>2</sup>.

Характеристика грунта:  $\delta_{гр} = 0,0012 \text{ кгс/см}^3$ ,  $\varphi_{гр} = 25^\circ$  и  $c_{гр} = 0$ .

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

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

Выполним расчёт для различных способов осуществления поворота трубопровода.

1. Поворот выполнен оверным 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<sup>2</sup>.

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

несущая способность трубопровода

(для случаев  $\delta_{гр} < 0$  и  $\delta_{гр} > 0$

по формуле (17)), кгс/см<sup>2</sup>

2115 3600

кольцевое напряжение, кгс/см<sup>2</sup>

2041

Сопротивление продольным перемещениям трубопровода, кгс/см

15,25

сопротивление поперечным перемещениям трубопровода, кгс/см

27,21

критическое напряжение (по формуле (I4)), кгс/см<sup>2</sup> 3050

3) Печатаются результаты расчёта:

Вариант I.

Температурный перепад, °C	40
угол поворота, град.	3
продольное напряжение, кгс/см <sup>2</sup>	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:

$\alpha = 0,509$ ,  $\kappa = 0,338$ ,  $Z = 0,121$ ,  $\beta^*$  (по формуле (30)) = 0,492.

$\beta$  (по формуле (39)) = 0,493.

Прочность обеспечена (условие (I2)).

Устойчивость обеспечена (условие (I6)).

Устойчивость стенки трубы обеспечена (условие (I4)).

Вариант 2.

Температурный перепад, °C	40
угол поворота, град	9
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 1867
прогиб, см	4,4
начальное сжимающее усилие, кгс	492599
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 51584
изгибающий момент, кгс·см	14963624

Безразмерные параметры  $\alpha = 1,181$ ,  $\kappa = 0,768$ ,  $Z = 0,912$ .

$\beta^* = 1,024$ ,  $\beta = 1,024$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 3.

Температурный перепад, °C	40	
угол поворота, град	15	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 2662	2931
прогиб, см	II,7	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	46970	
изгибающий момент, кгс·см	24338613	
Безразмерные параметры	$\alpha = 1,306,$	$\kappa = 0,844,$ $z = 2,343,$

$\beta^* = 1,443, \beta = 1,443.$

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 4.

Температурный перепад, °C	60	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 1346	386
прогиб, см	0,3	
начальное сжимающее усилие, кгс	668495	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 302167	
изгибающий момент, кгс·см	4179243	
Безразмерные параметры	$\alpha = 0,800,$	$\kappa = 0,527,$ $z = 0,121,$

$\beta^* = 0,667, \beta = 0,667.$

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 5.

Температурный перепад, °C	60	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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  $\alpha = 1,736$ ,  $\kappa = 1,092$ ,  $z = 0,912$ ,

$$\beta^* = 1,389, \beta = 16390.$$

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 6.

Температурный перепад, °C	60
угол поворота, град	15
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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  $\alpha = 1,783$ ,  $\kappa = 1,118$ ,  $z = 2,343$ ,

$$\beta^* = 1,958, \beta = 1,959.$$

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 7.

Температурный перепад, °C	60
угол поворота, град	3
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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  $\alpha = 1,141$ ,  $\kappa = 0,743$ ,  $z = 0,121$ ,  
 $\beta^* = 0,843$ ,  $\beta = 0,844$ .

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 8.

Температурный перепад, °C	80	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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  $\alpha = 2,289$ ,  $\kappa = 1,363$ ,  $z = 0,912$ ,  
 $\beta^* = 1,755$ ,  $\beta = 1,756$ .

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

Вариант 9.

Температурный перепад, °C	80	
угол поворота, град	15	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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  $\alpha = 2,208$ ,  $\kappa = 1,327$ ,  $z = 2,345$ ,  
 $\beta^* = 2,473$ ,  $\beta = 2,474$ .

Прочность не обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена.

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

1) В машину вводятся исходные данные согласно п.п.10.3 и 10."

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

несущая способность трубопровода, кгс/см <sup>2</sup>	2115	3600
кольцевое напряжение, кгс/см <sup>2</sup>	2041	
сопротивление продольным перемещениям трубопровода, кгс/см	15,25	
сопротивление поперечным перемещениям трубопровода, кгс/см	27,21	
критическое напряжение, кгс/см <sup>2</sup>	3050	

3) Печатаются результаты расчёта.

Вариант I.

Температурный перепад, °C	40	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения ( $\sigma_{\text{пр}}^N$ и $\sigma_{\text{пр}}^N$ ), кгс/см <sup>2</sup>	- 406	- 441
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	- 138384	
изгибающий момент ( $M_0$ и $M_1$ ), кгс.см	85795	386055

Безразмерные параметры  $a = 0,353$ ,  $c_0 = 0,108$ ,  $a_0 = 0,076$ ,  
 $\kappa = 0,342$ ,  $z = 0,121$ ,  $\beta^* = 0,492$ ,  $\beta = 0,493$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 2.

Температурный перепад, °C	40	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 229	- 560
прогиб, см	1,2	1,2
длине прямой вставки, см	834	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 93795	
изгибающий момент, кгс·см	172064	2534596

Безразмерные параметры  $\alpha = 0,900$ ,  $C_0 = 0,290$ ,  $\alpha_0 = 0,218$ ,

$K = 0,892$ ,  $Z = 0,912$ ,  $\beta^* = 1,024$ ,  $\beta = 1,023$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 3.

Температурный перепад, °C	40	
угол поворота, град	15	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 115	- 577
прогиб, см	4,3	4,2
длине прямой вставки, см	1172	
начальное сжимающее усилие, кгс	492599	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 27895	
изгибающий момент, кгс·см	306445	4330313

Безразмерные параметры  $\alpha = 1,181$ ,  $C_0 = 0,374$ ,  $\alpha_0 = 0,337$ ,

$K = 1,174$ ,  $Z = 2,343$ ,  $\beta^* = 1,443$ ,  $\beta = 1,444$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

## Вариант 4.

Температурный перепад, °C	60	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 905	- 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  $\alpha = 0,541$ ,  $\alpha_0 = 0,183$ ,  $\alpha_1 = 0,088$ ,  
 $\kappa = 0,536$ ,  $\lambda = 0,121$ ,  $\beta^* = 0,667$ ,  $\beta = 0,667$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

## Вариант 5.

Температурный перепад, °C	60	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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	5201497

Безразмерные параметры  $\alpha = 1,316$ ,  $\alpha_0 = 0,483$ ,  $\alpha_1 = 0,250$ ,  
 $\kappa = 1,344$ ,  $\lambda = 0,912$ ,  $\beta^* = 1,389$ ,  $\beta = 1,390$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 6.

Температурный перепад, °C	60	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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	8:69751

Безразмерные параметры  $a = 1,627$ ,  $c_0 = 0,591$ ,  $a_0 = 0,378$ ,  
 $\kappa = 1,662$ ,  $z = 2,343$ ,  $\beta^* = 1,958$ ,  $\beta = 1,956$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

Вариант 7.

Температурный перепад, °C	80	
угол поворота, град	3	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 1404	- 1533
прогиб, см	0,2	0,2
длина прямой вставки, см	577	
начальное сжимающее усилие, кгс	844391	
продольное усилие на изогнутом участке, кгс	- 479319	
изгибающий момент, кгс·см	270218	1385931

Безразмерные параметры  $a = 0,748$ ,  $c_0 = 0,273$ ,  $a_0 = 0,099$ ,  
 $\kappa = 0,756$ ,  $z = 0,121$ ,  $\beta^* = 0,843$ ,  $\beta = 0,841$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

## Вариант 8.

Температурный перепад, °C	80	
угол поворота, град	9	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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	
нагибающий момент, кгс·см	481761	8649418

Безразмерные параметры  $\alpha = 1,734$ ,  $C_0 = 0,698$ ,  $\alpha_0 = 0,276$ ,  
 $\kappa = 1,818$ ,  $z = 0,912$ ,  $\beta^* = 1,755$ ,  $\beta = 1,754$ .

Прочность обеспечена.

Устойчивость обеспечена.

Устойчивость стенки трубы обеспечена.

## Вариант 9.

Температурный перепад, °C	80	
угол поворота, град	15	
продольные напряжения, кгс/см <sup>2</sup>	- 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	
нагибающий момент, кгс·см	544455	13803202

Безразмерные параметры  $\alpha = 2,047$ ,  $C_0 = 0,818$ ,  $\alpha_0 = 0,410$ ,  
 $\kappa = 2,137$ ,  $z = 2,343$ ,  $\beta^* = 2,473$ ,  $\beta = 2,474$ .

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

ал

i = в м ц о г л ж в а в̄ й ж з н и

1. Введём  $\phi$  б и ч ш м,  $m_2$   $m_3$  т ц<sub>1</sub> ц<sub>2</sub> g t л<sub>1</sub> л<sub>2</sub> л<sub>3</sub> с<sub>2</sub> ш s t o<sub>1</sub>

2. Допустим  $a = 0$   $c_0 = 0,0001$

3. Вычислим  $y = l_1(0,8l_2(\phi+2\sigma)(c_2 + \sigma(\phi/2 - 0,39(\phi+2\sigma))) +$   
 $+ (0,8l_2(c_2 + \sigma + \phi/2))^2 \text{tg } 0,7l_3) + 0,8c_2(c_2 + \sigma + \phi/2) / \cos 0,7l_3$

4. Вычислим  $\pi_1 = 25,2 \text{ ct} + 0,3141 g \phi^2$

5. Вычислим  $v = \pi(-0,2926(\exp((1/3)\ln(c_2/(\phi+2\sigma)))) +$   
 $+ (0,6483\sqrt{(c_2/(\phi+2\sigma))}) + 0,05) + s(-0,4733/\exp((1/3)\ln$   
 $(c_2/(\phi+2\sigma)))) + (0,8335\sqrt{(c_2/(\phi+2\sigma))}) + 0,09$

6. Вычислим  $p = 0,8l_1 \text{tg } l_3 + 5,024l_2 v(\phi+2\sigma)^2 \text{tg } l_3 + 1,5072c_2(\phi+2\sigma)$

7. Вычислим  $\delta_1 = \pi_1 \exp((1/3)\ln(\text{tg}^2 f / 2I \cdot 10^6 \text{ и } y^2))$

8. Вычислим  $Z = \sqrt{(2p \text{tg}^2 f / \text{и}) \cdot \exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^6 \text{ и } \text{tg} f / y))}$

9. Вставим  $a = v + C,25$

10. Вычислим  $x = c_0 - (((a - c_0) \cos a - \sin a - \text{tg } c_0) / (1 - \cos a + \sin a \text{tg } c_0))$

11. Вычислим  $c_0 = (c_1 / 2) (\exp(((1/3)\ln(xy / 2I \cdot 10^6 \text{tg} f)))$

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

12. Вычислим  $\eta_0 = (a / \exp((4/3)\ln x)) ((1 + a \sin c_0) ((x - c_0) \sin a -$   
 $- 1) / (a \cos a \cdot \cos c_0) + (a/2) + (1/a) + 2c_0^2 - x + c_0/2a)$

13. Вычислим  $\eta_1 = (a / \exp((4/3)\ln x)) (((\cos c_0 + v \sin c_0) /$   
 $(a \cos a \cdot \cos c_0)) (((x - c_0) \sin a - 1) - a/2 - 1/a - 2c_0 - x))$

14. Вычислим  $\delta_2 = (\exp((2/3)\ln x)) + Z (\sqrt{(\eta_1 + (\sqrt{(\eta_0 - \eta_1)^2}) +$   
 $+ (((9,8596/16c_0)(\exp((1/3)\ln x)) ((2(\eta_0 - \eta_1)^2) + (\eta_1^2 c_0 / a))))$

15. Если  $\delta_2 - \delta_1 < 0$  идти к 9

16. Вставим  $a = a - 0,0001$

17. Вычислим  $x$

18. Вычислим  $\sigma_0$ . При выполнении поворота только сверхным или круговым коленом  $\sigma_0$  - не вычисляется, остаётся постоянным, равным  $\sigma_0 = 0,0001$ .

19. Вычислим  $y_1$

20. Вычислим  $y_0$

21. Вычислим  $\beta_2$

22. Если  $\beta_1 - \beta_2 < 0$  идти к 16

23. Вычислим  $x_0 = (1/\exp((2/3)\ln x))((x - \sigma_0)\sin a - 1)/(\cos a \cdot \cos \sigma_0) + 1)$

24. Вычислим  $x = (1/(\exp((2/3)\ln x))(((x - \sigma_0)\sin a - 1)/\cos a + 1)$

25. Вычислим  $b_0 = (\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 u)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/ч + x_0(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I \cdot 10^5 u tg f)))/ш$

26. Вычислим  $b_1 = (\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 u)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/ч + x(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I \cdot 10^5 u tg f)))/ш$

27. Вычислим  $n_0 = y_0(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 u tg f / y)))$

28. Вычислим  $n_1 = y_1(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 u / y)))(\exp((4/3)\ln(tg f)))$

29. Вычислим  $n_2 = (m_2 m_1 / m_2)(\sqrt{(1 - 0,75(g \psi m_2 / 20 m_2 m_1)^2)}) - (0,5 g \psi m_2 / 20 m_2 m_1)$

30. Вычислим  $\kappa_2 = m(2,9285z^2 + 1,0270z + 1,3505)(\sqrt{(\exp(1/3)\ln(2I \cdot 10^5 u(y/tg f)^2))})$

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

32. Вычислим  $n_1 = ((8,26 \sigma / (\psi + \sigma)) + 0,85) m, m)$

33. Вычислим  $n_2 = m(c_2 - c_1)$

34. Печатаем с 4 знаками  $b_0, b_1, n_2, n_1$

35. Печатаем с 4 знаками  $n_0, n_1, n_2, l$

36. Печатаем с 4 знаками  $\kappa_1, \kappa_2, y, p$

37. Идти к 1

38. Кончим

исполним 1.

### 11.3.2. Программе расчёта поворота трубопровода, оформленного холодногогнутом коленом и прямой вставкой

ап

 $i = \text{з м ц с г л ж б в в й ж х н}$ 

- I. Введём  $\phi$  б и ч ш м,  $m_2 m_3 m_4$  ц,  $c_2 g t$  л,  $l_2 l_3 c_2$  ж з ф  
г, с,
  2. Допустим  $a = 0,25$   $c_0 = 0,0001$   $e = 0,0001$
  3. Вычислим  $y = l_1(0,8l_2(\phi+2\sigma)(c_2+\sigma(\phi/2 - 0,39(\phi+2\sigma))) +$   
 $+ (0,8l_2(c_2+\sigma+\phi/2))^2 \text{tg } 0,7l_3) + 0,8c_2(c_2+\sigma+\phi/2)/\cos \sigma, 7l_3)$
  4. Вычислим  $\pi_1 = 25,2ct + 0,514I_0g\phi^2$
  5. Вычислим  $z = \psi(-0,2926(\exp((1/3)\ln(c_2/(\phi+2\sigma)))) + (0,6483\sqrt{(c_2/(\phi+2\sigma))} + 0,05) +$   
 $z(-0,4733/\exp((1/3)\ln(c_2/(\phi+2\sigma)))) + (0,8335\sqrt{(c_2/(\phi+2\sigma))} + 0,09)$
  6. Вычислим  $p = 0,8l_1 \text{tg } l_3 + 5,024l_3 a(\phi+2\sigma)^2 \text{tg } l_3 + 1,5072c_2(\phi+2\sigma)$
  7. Вычислим  $\beta_1 = \pi_1(\exp((1/3)\ln(\text{tg}^2 f / 2I \cdot 10^5 \text{ну}^2)))$
  8. Вычислим  $Z = (\sqrt{2p\alpha(\text{tg}^2 f) / \text{ум}})(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 \text{м}(\text{tg} f)/y)))$
  9. Вычислим  $x = (a - \text{tg } a + c_0(2 - 1/\cos a) - \text{tg } c_0(1 + c_0 \sin a)/\cos a) / (1 +$   
 $+(\sin(a - \sigma)) / \sigma - \text{tg } a(\cos(a - \sigma)) / \sigma + (\text{tg } c_0 / \sigma)(1 - \cos(a - \sigma)) / \sigma)$
  10. Вставим  $a = a + 0,25$
  11. Вставим  $c_0 = (c_1/2)(\exp((1/3)\ln(xy/2I \cdot 10^5 \text{м} \text{tg} f)))$
  12. Вычислим  $o = r_1(\exp((1/3)\ln(xy/2I \cdot 10^5 \text{м}))) (\exp((2/3)\ln(\text{tg} f)))$
- При вычислении поворота одним холодногогнутом коленом  $c_0$  - не вычисляется, остаётся постоянным, равным  $c_0 = 0,0001$
13. Вычислим  $x$
  14. Вычислим  $\eta_1 = (a / (\exp((4/3)\ln x))) (((\cos c_0 + a \sin c_0) / (a(\cos a$   
 $(\cos c_0))) (1 - \cos(a - \sigma) / \cos a) + (1 + a^2/2 - 1/\cos a - c_0 \text{tg } a + 2ac_0 - a \text{tg } c_0 /$   
 $\cos a - ac_0 \text{tg } a \text{tg } c_0)) / x$
  15. Вычислим  $\eta_0 = (I / (\exp((1/3)\ln x))) (\cos(a - \sigma)(1 + a \sin c_0) / \sigma \cos a$   
 $\cos c_0 - I / \sigma \cos c_0 - a + \sigma/2a - a \text{tg } c_0 / \sigma + (I/x)(1 + a^2/2 - 1/\cos a \cos c_0 -$

$$-c_0 \operatorname{tg} \alpha / (x \cos c_0) - \operatorname{ctg} c_0 / \cos (\alpha - c_0) \operatorname{tg} \operatorname{ctg} c_0 - c_0^2 / 2 \alpha \cos \alpha \cos c_0 - \\ - 2 \alpha c_0 / (\cos \alpha \cos c_0))$$

16. Вычислим  $b_2 = (\exp((2/3) \ln x)) + z (\sqrt{(y_1 + (y_0 - y_1)^2}) + (((9,8596 / \\ 16 c_0) (\exp((1/3) \ln x)) ((2(y_0 - y_1)^2) + (y_1^2 c_0 / \alpha))))$

17. Если  $b_2 - b_1 < 0$  идти к 10

18. Вставим  $\alpha = \alpha - 0,001$

19. Вычислим  $x$

20. Вычислим  $c_0$

21. Вычислим  $\alpha = \gamma_1 (\exp((1/3) \ln (yx/2I \cdot 10^5 m))) (\exp((2/3) \ln (\operatorname{tg} f)))$

При выполнении поворота одним холоднотнутым коленом  $C_0$  - не вычисляется, остается постоянным, равным  $C_0 = 0,0001$

22. Вычислим  $y_1$

23. Вычислим  $y_0$

24. Вычислим  $b_2$

25. Если  $b_1 - b_2 < 0$  идти к 18

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

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

28. Вычислим  $x_2 = (\exp((1/3) \ln (2I \cdot 10^5 m))) (\exp((2/3) \ln (xy / \\ \operatorname{tg} f))) / \alpha + x_0 (\exp((1/3) \ln y)) (\exp((2/3) \ln (2I \cdot 10^5 m \operatorname{tg} f))) / m$

29. Вычислим  $x_1 = (\exp((1/3) \ln (2I \cdot 10^5 m))) (\exp((2/3) \ln (xy / \\ \operatorname{tg} f))) / \alpha + x (\exp((1/3) \ln y)) (\exp((2/3) \ln (2I \cdot 10^5 m \operatorname{tg} f))) / m$

30. Вычислим  $n_0 = y_0 (\exp((1/3) \ln (2I \cdot 10^5 m \operatorname{tg} f / y)))$

31. Вычислим  $n_1 = y_1 (\exp((1/3) \ln (2I \cdot 10^5 m \operatorname{tg} f / y)))$

32. Вычислим  $m_2 = (m_2 m_1 / m_2) (\sqrt{(1 - 0,75 (q \psi m_2 / 2 \sigma m_2 m_1)^2)}) - \\ - (0,5 q \psi m_2 / 2 \sigma m_2 m_1)$

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

34. Вычислим  $l = (\alpha (\exp(1/3) \ln (2I \cdot 10^5 m (\operatorname{tg} f) / xy)))$

35. Вычисляем  $m_1 = (((8,26\sigma / (\phi + \sigma)) + 0,85)m_1, m)$

36. Вычисляем  $n_2 = m (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$

37. Печатаем с 4 знаками  $\varepsilon_0$   $\varepsilon_1$   $m_1$   $m_2$

38. Печатаем с 4 знаками  $n_0$   $n_1$   $n_2$   $l$

39. Печатаем с 4 знаками  $\pi_1$   $y$   $r$

40. Идти к I

41. Кончаем

Исполним I

**П.3.3. Программа расчета поворота трубопровода, оформленного свободным изгибом трубопровода**

ал

$i = \text{а м ц о г л л } \pi \text{ в } \tilde{v} \text{ й ж ь н ы б}$

I. Введём  $\phi$   $\sigma$   $\varepsilon$   $m_1$   $m_2$   $m$   $\varepsilon_1$   $\varepsilon_2$   $g$   $t$   $l_1$   $l_2$   $l_3$   $c_2$   $\sigma$   $\varepsilon$   $l_0$   $r_2$

2. Допустим  $a = 0,1$   $o = 0,0001$   $\sigma = 0,005$   $x = 0,1$   $k = 0$

3. Вычислим  $\pi_1 = 25,2 \text{ чт} + 0,31416 \text{ гф}^2$

4. Вычислим  $n_3 = ((l_0^2) / (19,7392r_2))$

5. Вычислим  $\beta_1 = ((\pi_1 / (2I \cdot 10^5 \text{ н})) (\sqrt{(2I \cdot 10^5 \cdot n_3 / y)}))$

6. Вычислим  $Z = 0,7854 n_3 (\sqrt{((2rc/m) (\exp((I/4) \ln((n_3/y)^3 (I / (2I \cdot 10^5 \text{ н}))))))})$

7. Вставим  $a = a + 0,1$

8. Если  $a - o > 0$  идти к I4

9. Вычислим  $o = (l_0 / 2) (\exp((I/4) \ln((xy) / (2I \cdot 10^5 \text{ н} \cdot k))))$

10. Вычислим  $x = 2((a - (tg a)) (3,1416^2 - o^2)) / ((3,1416 (\cos(3,1416a / o))) (3,1416 (tg a) - o (tg(3,1416a/o))))$

11. Вычислим  $y = ((I/x) (1 + (a^2/2) - (I/(\cos a)))) + (0,5) (\cos(3,1416(a/o))) + ((o^2 / (2(3,1416^2 - o^2))) (1 - ((3,1416/o)^2 (\cos(3,1416(a/o))) / (\cos a))))$

12. Вычислим  $\beta_2 = (\sqrt{x}) + Z \sqrt{((\exp((I/4) \ln x)) / a) (n^2 + (2n (\sin(3,1416 a / (2o))))^2)}$

13. Если  $a - o < 0$  ити к 19

14. Вычислим  $o = (l_0/2)(\exp(I/4)\ln((xy)/(2I \cdot 10^5 n_3 n)))$

15. Вычислим  $x = (a - (tg a)) / (((4,9298(\cos(a-o)))/(9,8596-o^2)) \cdot ((tg(a-o)) - (tg a)))$

16. Вычислим  $y = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(\cos a)))) - (0,5) + ((o^2/(19,7392 - 2o^2))(I+((3,1416/o)^2((\cos(a-o))/(\cos a))))$

17. Вычислим  $n_3 = ((I/x)(I+(a^2/2)-(o^2/2)-((\cos o)/(\cos a)))) + ((9,8596/(19,7392 - 2o^2))(((\cos o)(\cos(a-o)))/(\cos a)) - I)$

18. Вычислим  $b_2 = (\exp(I/4)\ln x^2) + z(\sqrt{((\exp(I/8)\ln(x^2))/o)(\sqrt{((1+n_3)^2 + ((I4n)^2(o/a)(I-(o/a)+(I/6,2832)(\sin(6,2832 o/a)))) - I))})$

19. Вставим  $k = k + I$

20. Если  $k - 10 < 0$  ити к 7

21. Если  $b_2 - b_1 < 0$  ити к ?

22. Вставим  $a = a - b_1$

23. Если  $a - o > 0$  ити к 30

24. Вычислим  $o = (l_0/2)(\exp(I/4)\ln((xy)/(2I \cdot 10^5 n_3 n)))$

25. Вычислим  $x = 2((a - (tg a))(3,1416^2 - o^2)) / ((3,1416(\cos(3,1416 a/o)))(3,1416(tg a) - o(tg(3,1416 a/o))))$

26. Вычислим  $y = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(\cos a)))) + (0,5)(\cos(3,1416(a/o))) + (o^2/(2(3,1416^2 - o^2)))(I - ((3,1416/o)^2(\cos(3,1416(a/o)))/(\cos a))))$

27. Если  $n = 0$ , 00000001 < 0 ити к 47

28. Вычислим  $b_2 = (\sqrt{x}) + z\sqrt{((\exp(I/4)\ln x)/a)(n^2 + (2n_0(\sin(3,1416 a/(2o))))^2)}$

29. Если  $a - o < 0$  ити к 41

30. Вычислим  $o = (l_0/2)(\exp(I/4)\ln((xy)/(2I \cdot 10^5 n_3 n)))$

31. Вычислим  $x = (a - (tg a)) / (((4,9298(\cos(a-o)))/(9,8596-o^2)) \cdot ((tg(a-o)) - (tg a)))$

32. Вычислим  $y = ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(\cos a)))) - (0,5) + ((o^2/(19,7392 - 2o^2))(I+((3,1416/o)^2((\cos(a-o))/(\cos a))))$

33. Если  $\delta = 0,000001 \ll 0$  идти к 47

$$34. \text{Вычислим } \eta_g = ((I/x)(I+(a^2/2)-(o^2/2)-((\cos o)/(\cos a)))) + \\ + ((9,8596/(19,7392 - 2o^2))(((\cos o)(\cos(a-o))/(\cos a))-I))$$

$$35. \text{Вычислим } \theta_g = (\exp(I/4) \ln x^2) + Z(\sqrt{((\exp(0,8) \ln(x^2))/o)(\sqrt{ \\ ((I+\eta-\eta_g)^2 + (((I+\eta)^2(o/a)(I-(o/a)+I/6,2832)(\sin(6,2832 \\ o/a)))) - I))})$$

36. Если  $\sigma = 0,09 \ll 0$  идти к 40

37. Если  $a - \sigma < 0$  идти к 23

38. Идти к 57

39. Вставим  $a = a + \sigma_1$

40. Если  $a - \sigma > 0$  идти к 43

$$41. \text{Вычислим } \chi = (I/(\sqrt{x}))((I/(\cos a)) - I + ((4,9298x/(9,8596 - o^2)) \\ ((\cos(3,1416 a/o))/(\cos a)) - I))$$

42. Идти к 44

$$43. \text{Вычислим } \chi = (I/(\sqrt{x}))((I/(\cos a)) - I - ((4,9298x/(9,8596 - \\ - o^2))(((\cos(a-o))/(\cos a)) + I)))$$

$$44. \text{Вычислим } \xi = ((\sqrt{(2I \cdot 10^5 \text{ и } \chi y / \eta_g)}) - (0,7854 \text{ г } \phi^2) / \chi) - ((\pi_0 \\ (\sqrt{(2I \cdot 10^5 \text{ и } \eta_g \mu y))}) / \eta) + ((2I \cdot 10^5 (\phi + 2\sigma)) / (2\eta))$$

45. Если  $\theta_1 - \theta_2 < 0$  идти к 22

46. Идти к 49

$$47. \text{Вычислим } \xi = ((\pi_1 - 0,7854 \text{ г } \phi^2) / \chi) + ((2I \cdot 10^5 (\phi + 2\sigma)) / (2\eta_g))$$

48. Допустим  $\eta = 0$   $\chi = 0$

49. Вычислили  $\eta = \eta \cdot \eta_0$

$$50. \text{Вычислили } l = 2a(\exp(I/4) \ln(2I \cdot 10^5 \text{ и } \eta_g / \chi y))$$

51. Печатаем с 9 знаками  $\xi$   $\eta_g$   $\eta_1$

52. Печатаем с 9 знаками  $\eta$   $\eta_2$   $l$

53. Печатаем с 9 знаками  $\pi_1$   $y$   $p$

54. Допустим  $a = 2,5$   $\sigma = 0,1$

55. Идти к 23

$$56. \text{Вычислили } \pi_2 = \theta_2(\sqrt{(2I \cdot 10^5 \text{ и } y / \eta_g)})$$

57. Печатаем с 4 знаками  $\pi_2$   $\theta_2$

58.Идти к I

59.Кончаем

Испслним I

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

оп

I = а м ц о г I л ж б а ъ й ж з н ы

I. Введем  $\phi$  б и ч ш м<sub>1</sub> м<sub>2</sub> м<sub>3</sub> т ц<sub>1</sub> ц<sub>2</sub> g t л<sub>1</sub> л<sub>2</sub> л<sub>3</sub> о<sub>2</sub> щ а t o<sub>1</sub>2. Допустим  $a = 0$   $\sigma_0 = 0,0001$ 3. Вычислим  $u = l_1(0,8л_2(\phi+2\sigma)(ц_2+\sigma(\phi/2)-0,39(\phi+2\sigma)))+(0,8л_2(ц_2+\sigma+\phi/2)^2tg0,7л_3)+0,8c_2(ц_2+\sigma+\phi/2)/\cos0,7л_3)$ 4. Вычислим  $\pi_1 = 25,2ct + 0,3I4I g\phi^2$ 5. Вычислим  $v = \pi(-0,2926(\exp((I/3)\ln(ц_2/(\phi+2\sigma))))+(0,6483\sqrt{(ц_2/(\phi+2\sigma))}+0,05)+s(-0,4733/\exp((I/3)\ln(л_2/(\phi+2\sigma))))+(0,8335\sqrt{(ц_2/(\phi+2\sigma))}+0,09)$ 6. Вычислим  $p = 0,8л_1tg л_3+5,024л_2a(\phi+2\sigma)^2tg л_3+I,5072o_2(\phi+2\sigma)$ 7. Вычислим:  $b_1 = \pi_1 \exp((I/3)\ln(tg^2 f / (2I \cdot IO^5 и y^2)))$ 8. Вычислим  $z = \sqrt{(2pctg^3 f / \pi и) \exp((I/3)\ln(2I \cdot IO^5 и tg f / y))}$ 9. Вставим  $a = a + 0,25$ 10. Вычислим  $x = \sigma_0 - (((\sigma - \sigma_0) \cos a - \sin a - tg \sigma_0) / (I - \cos a + \sin a tg \sigma_0))$ 11. Если  $a - 2,7 \leq 0$  идти к I412. Вычислим  $\sigma_0 = 0,7346 a^2 - 5,8768a + 11,9286$ 

13. Идти к I5

14. Вычислим  $\sigma_0 = 0,05I4a^2 + 0,3858a$ 15. Вычислим  $h_1 = (a/\exp((4/3)\ln x))(((\cos \sigma_0 + a \sin \sigma_0) / (a \cos a \cos \sigma_0))(((x - \sigma_0) \sin a - I) - a/2 - I/a - 2\sigma_0 - x))$ 16. Вычислии  $h_0 = (a/\exp((4/3)\ln x))(I + a \sin \sigma_0)((x - \sigma_0) \sin a - I) / (a \cos a \cos \sigma_0) + (a/2) + (I/a) + 2\sigma_0 - x + \sigma_0^2/2a)$ 17. Вычислим  $h_2 = (\exp((2/3)\ln x)) + z(\sqrt{(h_1 + (\sqrt{(h_0 - h_1)^2} + ((9,8596/16\sigma_0)(\exp((I/3)\ln x))((2(h_0^2 h_1)^2 + (h_1^2 \sigma_0/a))))))$

18. Если  $b_2 - b_1 < 0$  идти к 9

19. Вставить  $a = a - 0,0001$

20. Вычислим  $x$

21. Если  $a - 2,7 \leq 0$  идти к 24

22. Вычислим  $c_0 = 0,7346a^8 - 5,8768a + 11,9286$

23. Идти к 26

24. Вычислим  $c_0 = 0,0514a^8 + 0,3858a$

25. Вычислили  $y_1$

26. Вычислили  $y_0$

27. Вычислили  $b_2$

28. Если  $b_1 - b_2 < 0$  идти к 19

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

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

31. Вычислили  $z_0 = (\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/\sqrt{4} + x_0(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I \cdot 10^5 m tg f)))/m$

32. Вычислили  $z_1 = (\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m)))(\exp((2/3)\ln(xy/tg f)))/\sqrt{4} + x(\exp((1/3)\ln y))(\exp((2/3)\ln(2I \cdot 10^5 m tg f)))/m$

33. Вычислили  $n_0 = y_0(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m tg^4 f/y)))$

34. Вычислили  $n_1 = y_1(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m/y)))(\exp(4/3)\ln(tg f))$

35. Вычислили  $m_2 = (m_3 m_1 / m_2)(\sqrt{(1 - 0,75(g \phi m_2 / 20 m_3 m_1)^2)})$   
 $(0,5g \phi m_2 / 20 m_3 m_1)$

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

37. Вычислили  $l = (a(\exp(1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m(tg f)/xy)))$

38. Вычислили  $m_1 = (((8,26\sigma/(\phi + \sigma)) + 0,85)m_1 m)$

39. Вычислили  $m_2 = m(c_2 - c_1)$

40. Вычислили  $c_1 = (2c_0)((\exp(1/3)\ln(2I \cdot 10^5 m(tg f)/xy)))$

41. Печатаем с 4 знаками  $z_0$   $z_1$   $m_2$   $m_1$

42. Печатаем с 4 знаками  $n_0$   $n_1$   $l$   $c_1$

43. Печатаем с 4 знаками  $\pi_1$   $y$   $p$

44.Идти к I

45.Кончаем

Испслим I.

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

ап

I = амцог l л ж в ь в̄ й ж ь ны

I. Введём  $\phi$  б и ч м<sub>1</sub> м<sub>2</sub> м<sub>3</sub> т ц<sub>1</sub> ц<sub>2</sub> g t л<sub>1</sub> л<sub>2</sub> л<sub>3</sub> о<sub>2</sub> ш  
s f r<sub>1</sub> o<sub>1</sub>

2. Допустим  $a = 0,25$   $c_0 = 0,0001$   $o = 0,0001$ 

3. Вычислим  $u = l_1(0,8l_2(\phi+2\sigma)(c_2+\sigma(\phi/2-0,39(\phi+2\sigma)))+(0,8l_2(c_2+\sigma+\phi/2)^2 \text{tg } 0,7l_3)+0,8o_2(c_2+\sigma+\phi/2)/\cos 0,7l_3)$

4. Вычислим  $\pi_1 = 25,2 \text{ ct} + 0,3141 g \phi^2$ 

5. Вычислим  $v = \psi(-0,2926(\exp((1/3)\ln(c_2/(\phi+2\sigma))))+(0,6483 \sqrt{c_2/(\phi+2\sigma)})+0,05) + s(-0,4733/\exp((1/3)\ln(c_2/(\phi+2\sigma)))) + (0,8335 \sqrt{c_2/(\phi+2\sigma)})+0,09$

6. Вычислим  $r = 0,8l_1 \text{tg } l_3 + 5,024l_3 a(\phi+2\sigma)^2 \text{tg } l_3 + 1,5072a_2/(\phi+2\sigma)$ 7. Вычислим  $b_1 = \pi_1 (\exp((1/3)\ln(\text{tg}^3 f / 2I \cdot 10^8 \text{ и } y^2)))$ 8. Вычислим  $z = (\sqrt{(2\rho c(\text{tg}^3 f)/\text{и}))(\exp((1/3)\ln(2I \cdot 10^8 \text{ и } (\text{tg} f)/y)))$ 

9. Вычислим  $x = (a - \text{tg } a + c_0(2 - I/\cos a) - \text{tg } c_0(I + o_0 \sin a)/\cos a)/(I + (\sin(a-o))/o - \text{tg } a(\cos(a-o))/o + (\text{tg } c_0/o)(I - (\cos(a-o))/o))$

10. Вставим  $a = a + 0,25$ 11. Если  $a - 2,7 - 2a_0 \leq 0$  идти к I412. Вычислим  $o_0 = 0,7346a^2 - 5,2768a - 2,7320a_0^2 + 4,6904a_0 + 11,9286$ 

13. Идти к I5

14. Вычислим  $o_0 = 0,0514a^2 + 0,3858a - 0,4555a_0$ 15. Вычислим  $o = r_1 (\exp((1/3)\ln(xy/2I \cdot 10^8 \text{ и}))) (\exp((2/3)\ln(\text{tg} f)))$ 

16. Вычислим x

17. Вычислим  $b_1 = (a/(\exp((4/3)\ln x))) ((\cos o_0 + a \sin o_0)/(\cos a))$

$$(\cos \alpha_0)) (I - \cos(\alpha - \alpha_0) / \cos \alpha) + (I + \alpha^2 / 2 - I / \cos \alpha - \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha + 2\alpha \alpha_0 - \alpha \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos \alpha - \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \alpha_0) / x$$

18. Вычислим  $\eta_0 = (I / (\exp((I/3) \ln x))) (\cos(\alpha - \alpha_0) (I + \alpha \sin \alpha_0) / \cos \alpha \cos \alpha_0 - I / \cos \alpha \cos \alpha_0 - \alpha + \alpha_0 / 2\alpha - \alpha \operatorname{tg} \alpha_0 / \alpha + (I/x) (I + \alpha^2 / 2 - I / \cos \alpha \cos \alpha_0 - \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha / (x \cos \alpha_0) - \alpha \operatorname{tg} \alpha_0 / \cos(\alpha - \alpha_0) \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \alpha_0 - \alpha_0^2 / 2\alpha \cos \alpha \cos \alpha_0 - 2\alpha \alpha_0 / (\cos \alpha \cos \alpha_0)))$

19. Вычислим  $\beta_2 = (\exp((2/3) \ln x)) + Z (\sqrt{(\eta_1 + (\eta_0 - \eta_1)^2)} + ((9,8596 / 16 \alpha_0) (\exp((I/3) \ln x)) ((2(\eta_0 - \eta_1)^2) + (\eta_1^2 \alpha_0 / \alpha))))$

20. Если  $\beta_2 - \beta_1 < 0$  идти к 10

21. Вставим  $\alpha = \alpha - 0,001$

22. Вычислили  $x$

23. Если  $\alpha - 2,7 - 2\alpha_0 \leq 0$  идти к 26

24. Вычислили  $\alpha_0 = 0,7346\alpha^2 - 5,8768\alpha - 2,7320\alpha_0^2 + 4,6904\alpha_0 + 11,9286$

25. Идти к 27

26. Вычислили  $\alpha_0 = 0,0514\alpha^2 + 0,3858\alpha - 0,4555\alpha_0$

27. Вычислили  $\alpha = \gamma_1 (\exp((I/3) \ln (yx / 2I \cdot 10^5 \text{ и}))) (\exp((2/3) \ln (\operatorname{tg} f)))$

28. Вычислили  $\eta_1$

29. Вычислили  $\eta_0$

30. Вычислили  $\beta_2$

31. Если  $\beta_1 - \beta_2 < 0$  идти к 21

32. Вычислили  $\alpha_0 = (I / \exp((2/3) \ln x)) ((I / \cos \alpha \cos \alpha_0) (I + \alpha_0 \sin \alpha) - (x / (\cos \alpha_0) \alpha) (\cos(\alpha - \alpha_0) / \cos \alpha) - I)$

33. Вычислили  $\alpha = (I / \exp((2/3) \ln x)) ((I + \alpha_0 \sin \alpha) / \cos \alpha - (x / \alpha) ((\cos(\alpha - \alpha_0) / \cos \alpha - I) - I)$

34. Вычислили  $\beta_0 = (\exp((I/3) \ln (2I \cdot 10^5 \text{ и}))) (\exp((2/3) \ln (xy / \operatorname{tg} f))) / \alpha + \alpha_0 (\exp((I/3) \ln y)) (\exp((2/3) \ln (2I \cdot 10^5 \text{ и} \operatorname{tg} f))) / \beta$

35. Вычислили  $\beta_1 = (\exp((I/3) \ln (2I \cdot 10^5 \text{ и}))) (\exp((2/3) \ln (xy / \operatorname{tg} f))) / \alpha + \alpha (\exp((I/3) \ln y)) (\exp((2/3) \ln (2I \cdot 10^5 \text{ и} \operatorname{tg} f))) / \beta$

36. Вычислили  $\eta_0 = \eta_0 (\exp((I/3) (\ln (2I \cdot 10^5 \text{ и} \operatorname{tg}^4 f / y))))$

37. Вычислили  $\eta_1 = \eta_1 (\exp((I/3) (\ln (2I \cdot 10^5 \text{ и} \operatorname{tg}^4 f / y))))$

38. Вычислим  $n_2 = (m_2 m_1 / m_2) (\sqrt{(1 - 0,75(\phi m_2 / 20 m_2 m_1)^2)}) -$   
 $- (0,5 \phi m_2 / 20 m_2 m_1)$

39. Вычислим  $\pi_2 = m(2,9285z^2 + 1,0270z + 1,3505)(\sqrt{(\exp(I/3) \ln$   
 $(2I \cdot 10^8 \text{ и } (y/tg f)^2)))$

40. Вычислим  $l = (\exp(I/3) \ln(2I \cdot 10^8 \text{ и } (tg f) / xy))$

41. Вычислим  $m_1 = (((8,266 / (\phi + 6)) + 0,85) m, m)$

42. Вычислим  $n_2 = m(c_2 - c_1)$

43. Вычислим  $c_1 = (2c_0)((\exp(I/3) \ln(2I \cdot 10^8 \text{ и } (tg f) / xy)))$

44. Печатаем с 4 знаками  $\beta_0 \quad \beta_1 \quad m_2 \quad m_1$

45. Печатаем с 4 знаками  $n_0 \quad n_1 \quad l \quad c_1$

46. Печатаем с 4 знаками  $\pi_1 \quad y \quad p$

47. Идти к I

48. Кончатся

Исполним I.

## Приложение 4

## ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ТРУБОПРОВОДА НА ЭЦМ "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  $12^{\circ}$ . Внутреннее давление в трубопроводе равно  $40 \text{ кгс/см}^2$ , а температурный перепад составляет  $50^{\circ}\text{C}$ . Геометрические характеристики трубы:  $J = 964700 \text{ см}^4$ ,  $W = 15810 \text{ см}^3$  и  $F = 530 \text{ см}^2$ . Вес трубы с продуктом 13 кгс/см. Предел текучести материала трубы  $3600 \text{ кгс/см}^2$ . Характеристики грунта: объёмный вес  $\gamma_{\text{гр}} = 0,0012 \text{ кгс/см}^3$ , угол внутреннего трения  $\varphi_{\text{гр}} = 23^{\circ}$ , сцепление  $c_{\text{гр}} = 0$ .

Согласно табл.3 нефтепровод относится к III-категории. Для трубопроводов III-категории имеем  $c = 1$ ,  $K_{\text{н}} = 1$  и  $m = 0,9$ . По СНиП П-45-75 имеем  $k^{\text{н}} = 1 \text{ м}$ .

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

1) Поворот выполнен сварным или кругозагнутым коленом.

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

Вводим в машину программу расчёта поворота трубопровода, оформленного сварными или кругозагнутыми 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:

$\gamma = -31,51$	$\mu_2 = 2244$	$\mu_1 = 3060$	$n = 15,6$	$n_2 = 18$
$l = 2818$	$\pi_1 = 846351$	$y = 33,47$	$p = 19,72$	

Таким образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{кр}}^{\text{н}} &= - 3151 \text{ кгс/см}^2, & \psi_s \frac{C}{K_n} R_s^{\text{н}} &= 2244 \text{ кгс/см}^2, \\ m\sigma_{\text{кр}} &= 3060 \text{ кгс/см}^2, & V &= 15,6 \text{ см}, & [V] &= 18 \text{ см}, \\ l &= 2818 \text{ см}, & N_0 &= 846351 \text{ кгс}, & q &= 33,47 \text{ кгс/см} & \text{и} \\ \rho &= 19,72 \text{ кгс/см}. \end{aligned}$$

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

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

Вводим программу расчёта поворота трубопровода, оформленного холоднотянутым коленом.

Вводим исходные величины:

II	9,2	I,	4	964700	530	I5810	3600	II	0,9	I00
I2C	40	50	I3	0,00I2	0,40I4	0	0	I	0,1047	6000

Машина печатает:

$\delta$	= - 1984	$\psi_2$	= 2244	$\psi_1$	= 3060	$n$	= 13,6	$n_2$	= 18
$l$	= 2249	$\pi_1$	= 846351	$y$	= 33,47	$\rho$	= 19,72.		

Таким образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{кр}}^{\text{н}} &= - 1984 \text{ кгс/см}^2, & \psi_s \frac{C}{K_n} R_s^{\text{н}} &= 2244 \text{ кгс/см}^2, \\ m\sigma_{\text{кр}} &= 3060 \text{ кгс/см}^2, & V &= 13,6 \text{ см}, & [V] &= 18 \text{ см}, \\ l &= 2249 \text{ см}, & N_0 &= 846351 \text{ кгс}, & q &= 33,47 \text{ кгс/см} & \text{и} \\ \rho &= 19,72 \text{ кгс/см}. \end{aligned}$$

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

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

Длина прямой вставки 17 м.

Вводим программу расчёта поворота трубопровода рассматриваем-

мой конструкции,

Вводим исходные величины:

II9,2 I,4 964700 530 I5810 3600 I I 0,9 IOO  
I20 40 50 I3 0,00I2 0,40I4 0 0 I 0,1047 I700

Машина печатает:

$\sigma_0 = -655$      $\sigma_1 = -1408$      $\sigma_2 = 2244$      $\sigma_1 = 3060$      $\sigma_0 = 6,9$   
 $n_1 = 5,8$      $n_2 = 18$      $l = 4156$      $\pi_1 = 846351$   
 $y = 33,47$      $p = 19,72.$

Таким образом:

$\sigma_{пр,0}^N = -655$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{пр,1}^N = -1408$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 $\psi \frac{c}{M} R_N^N = 2244$  кгс/см<sup>2</sup>,  $m\sigma_{кр} = 3060$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_0 = 6,9$  см,  
 $V_1 = 5,8$  см,  $[V] = 18$  см,  $l = 4156$  см,  $N = 846351$  кгс,  
 $q = 33,47$  кгс/см<sup>2</sup> и  $p = 19,72$  кгс/см<sup>2</sup>.

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:

II9,2 I,4 964700 530 I5810 3600 I I 0,9 IOO  
I20 40 50 I3 0,00I2 0,40I4 0 0 I 0,1047  
6000 I300.

Машина печатает:

$\sigma_0 = -559$      $\sigma_1 = -860$      $\sigma_2 = 2244$      $\sigma_1 = 3060$      $\sigma_0 = 4,6$   
 $n_1 = 4,2$      $n_2 = 18$      $l = 4615$      $\pi_1 = 846351$   
 $y = 33,47$      $p = 19,72.$

Таким образом:

$\sigma_{пр,0}^N = -559$  кгс/см<sup>2</sup>,  $\sigma_{пр,1}^N = -860$  кгс/см<sup>2</sup>,

$$\psi_s \frac{L}{R_N} R_s'' = 2244 \text{ кгс/см}^2, \quad m\sigma_{кр} = 3060 \text{ кгс/см}^2,$$

$$V_0 = 4,6 \text{ см}, \quad V_1 = 4,2 \text{ см}, \quad [V] = 18 \text{ см}, \quad l = 4615 \text{ см},$$

$$N_0 = 840351 \text{ кгс}, \quad Q = 33,47 \text{ кгс/см} \quad \text{и} \quad \rho = 19,72 \text{ кгс/см}.$$

Прочность, устойчивость стенки и общая устойчивость трубопровода обеспечены.

5) Поворот выполнен свободным изгибом трубопровода.

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

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:

$\sigma = -1922$	$\sigma_2 = 2244$	$\sigma_1 = 3060$	$\eta = 0,01$	$\eta_2 = 18$
$l = 150$	$\pi_1 = 979911$	$\pi_2 = 1807118$	$u = 33,47$	$\rho = 19,72$ .

Таким образом:

$$\sigma_{кр}'' = -19,22 \text{ кгс/см}^2, \quad \psi_s \frac{L}{R_N} R_s'' = 2244 \text{ кгс/см}^2,$$

$$m\sigma_{кр} = 3060 \text{ кгс/см}^2, \quad V = 0,01 \text{ см}, \quad [V] = 18 \text{ см}, \quad l = 150 \text{ см},$$

$$N_0 = 979911 \text{ кгс}, \quad mN_{0,кр} = 1807118 \text{ кгс}, \quad Q = 33,47 \text{ кгс/см} \quad \text{и}$$

$$\rho = 19,72 \text{ кгс/см}.$$

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

Приложение 5

НОМОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ  
И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

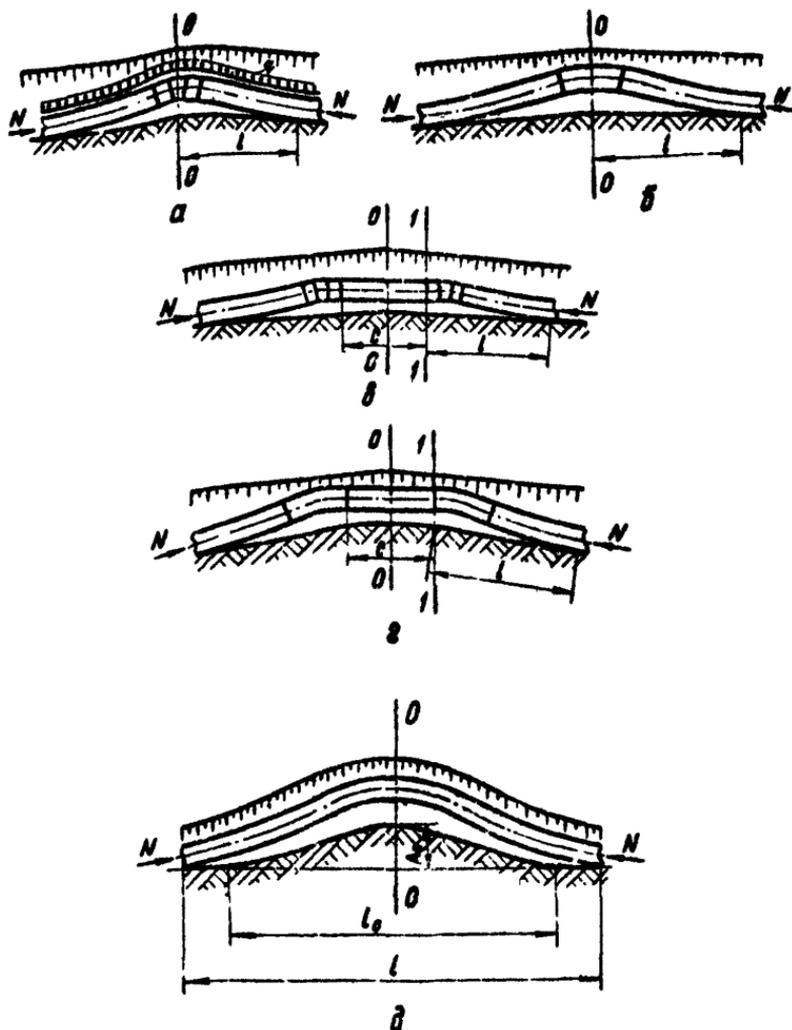


Рис. П5.1. Изгиб трубопровода на "выпуклом" рельефе местности при различных конструктивных углах поворота:

- а) Сварное колено; б) гладкое колено; в) прямая вставка со сварными коленами; г) прямая вставка с гладкими коленами; д) угругий изгиб.

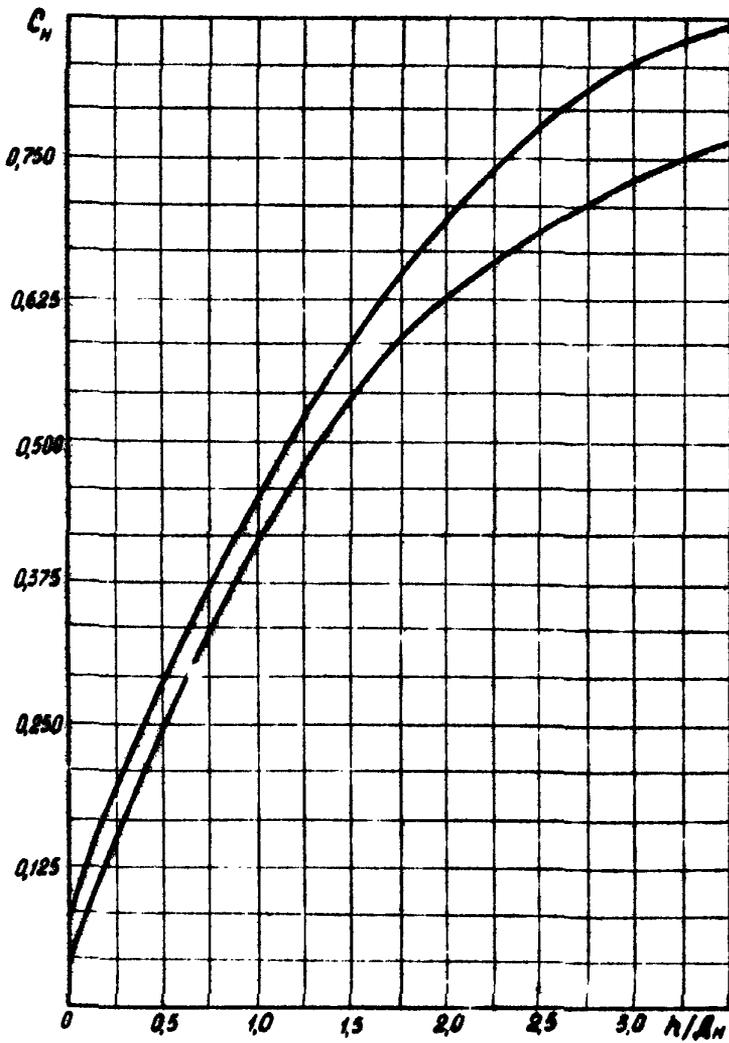


Рис. 11.5.2. График для определения коэффициента  $C_H$ :

1 - песчаные грунты; 2 - глинистые грунты.



**И.5.1. Номограммы для расчёта углов поворота,  
выполненных сварными, крутозагнутыми коленами  
и прямыми вставками**

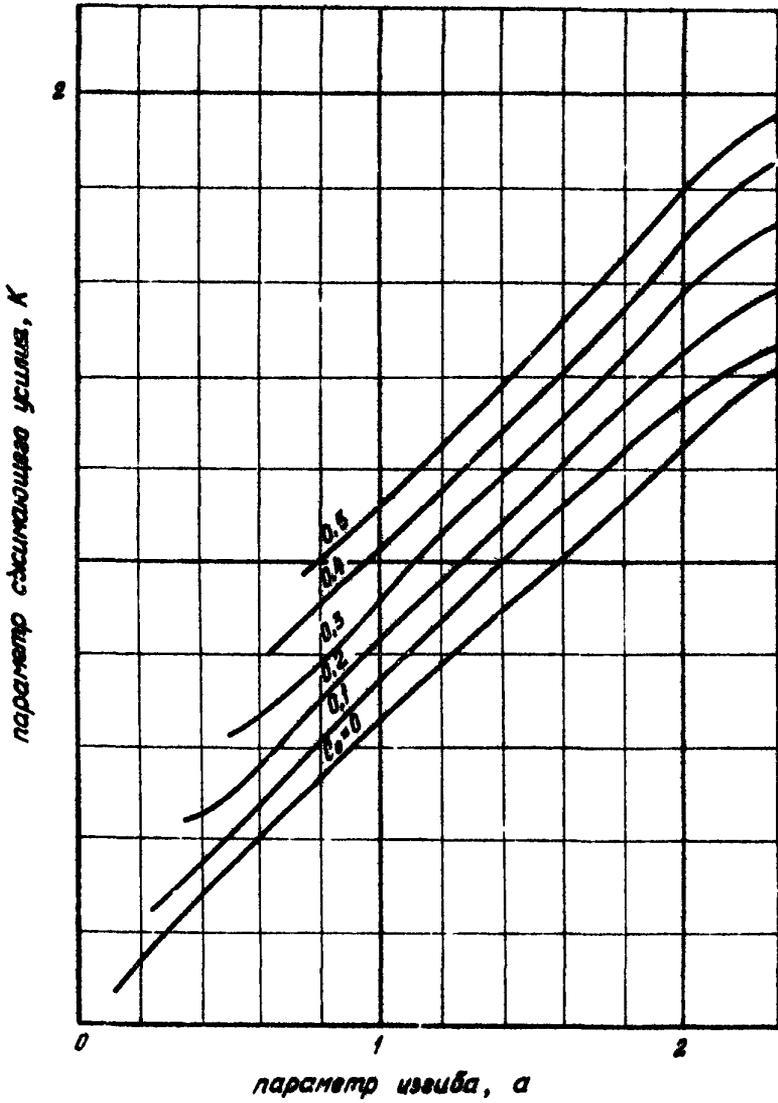


Рис.П.5.3.Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

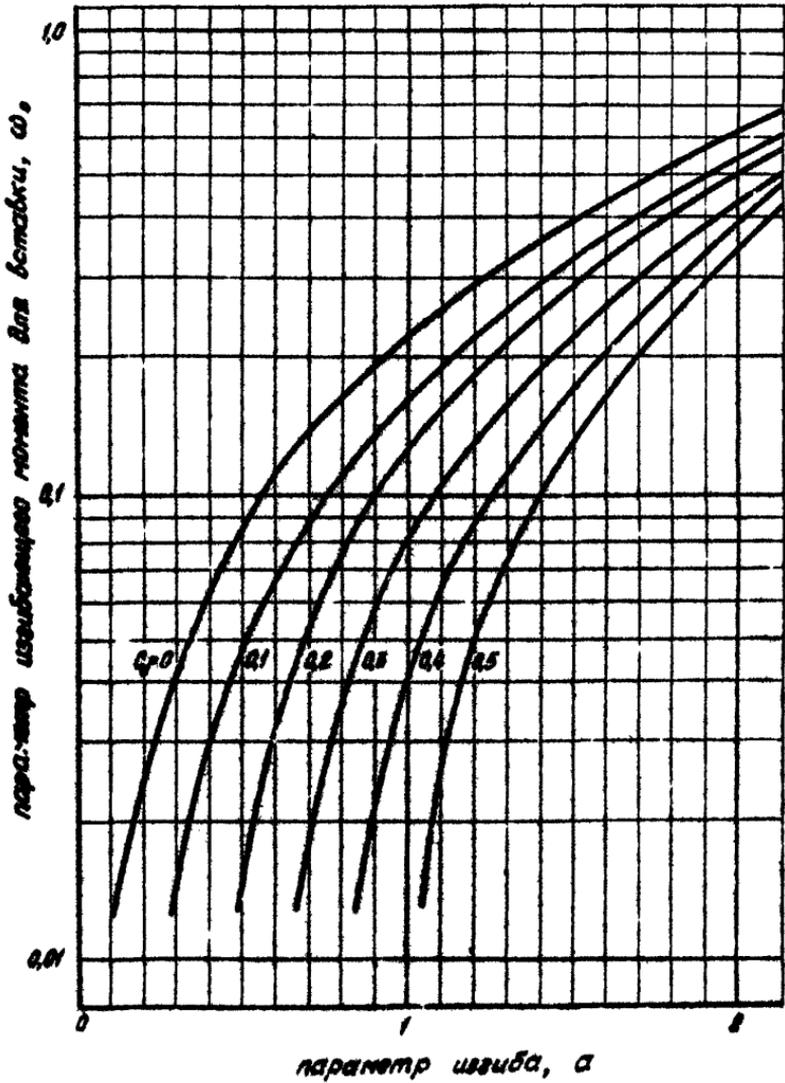


Рис.П.5.4. График для определения параметра изгибающего момента  $\omega_0$ .

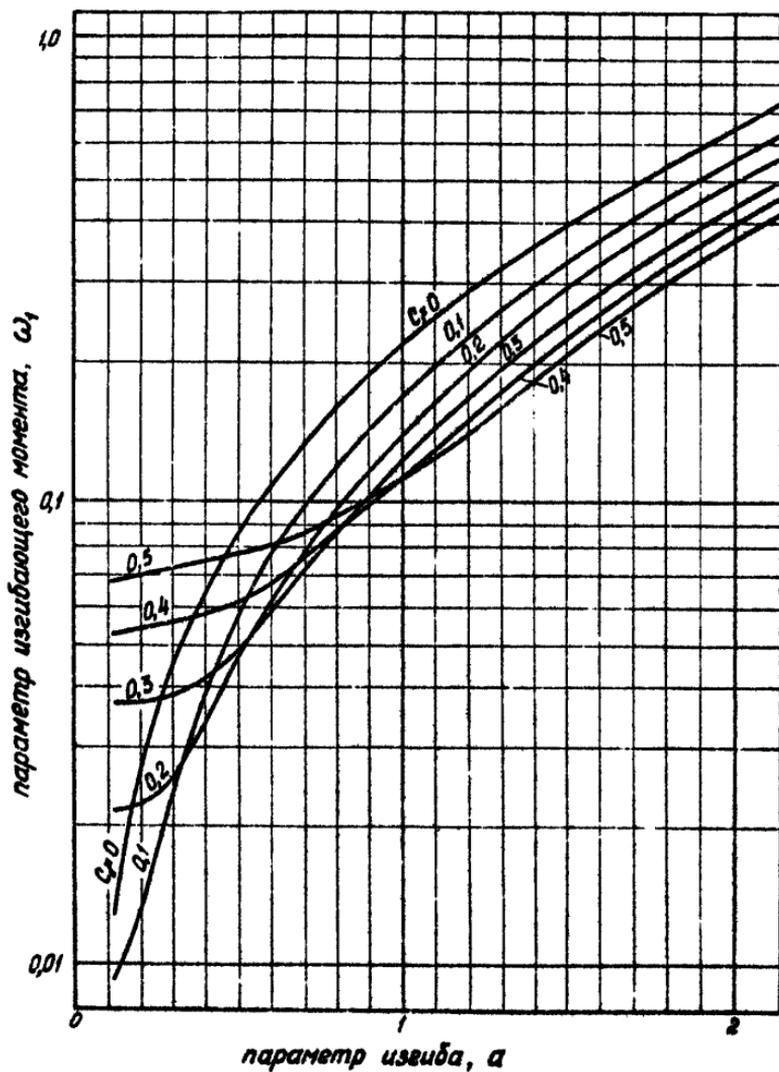


Рис.П.5.5.График для определения параметра изгибающего момента  $\omega_1$  .

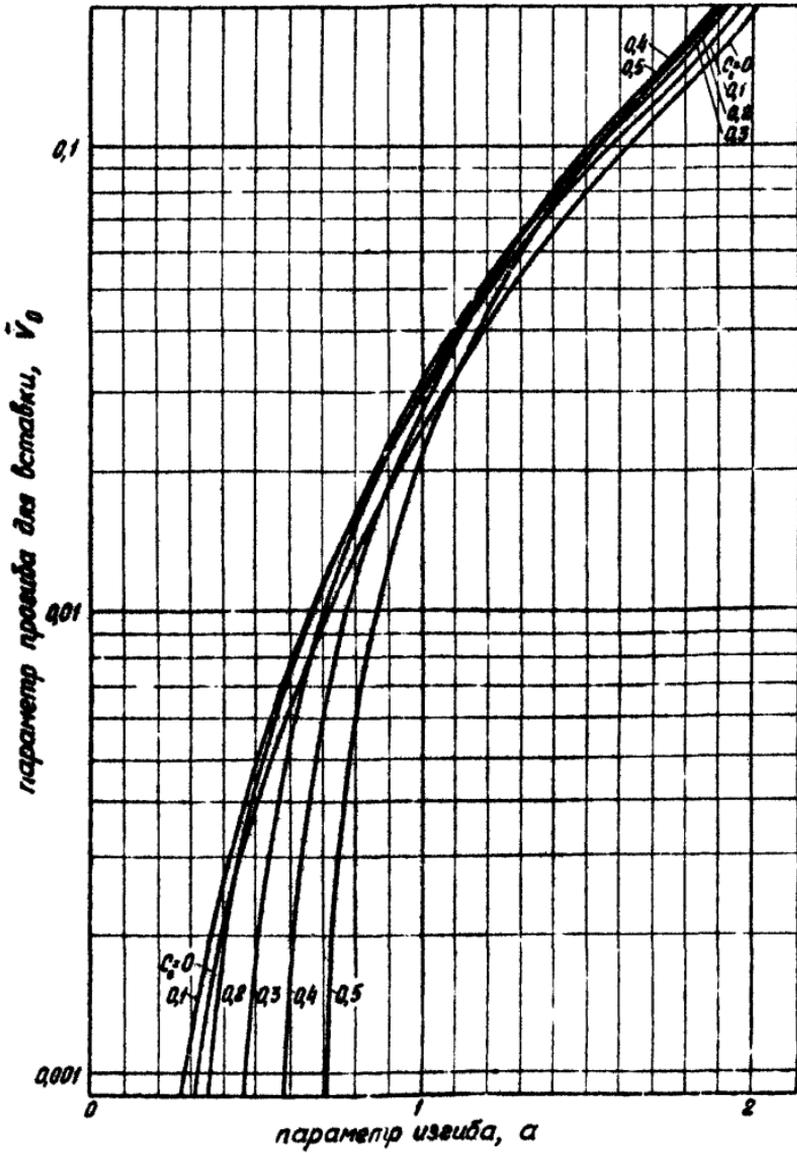


Рис. П.5.6. График для определения параметра прогиба  $\bar{V}_0$ .

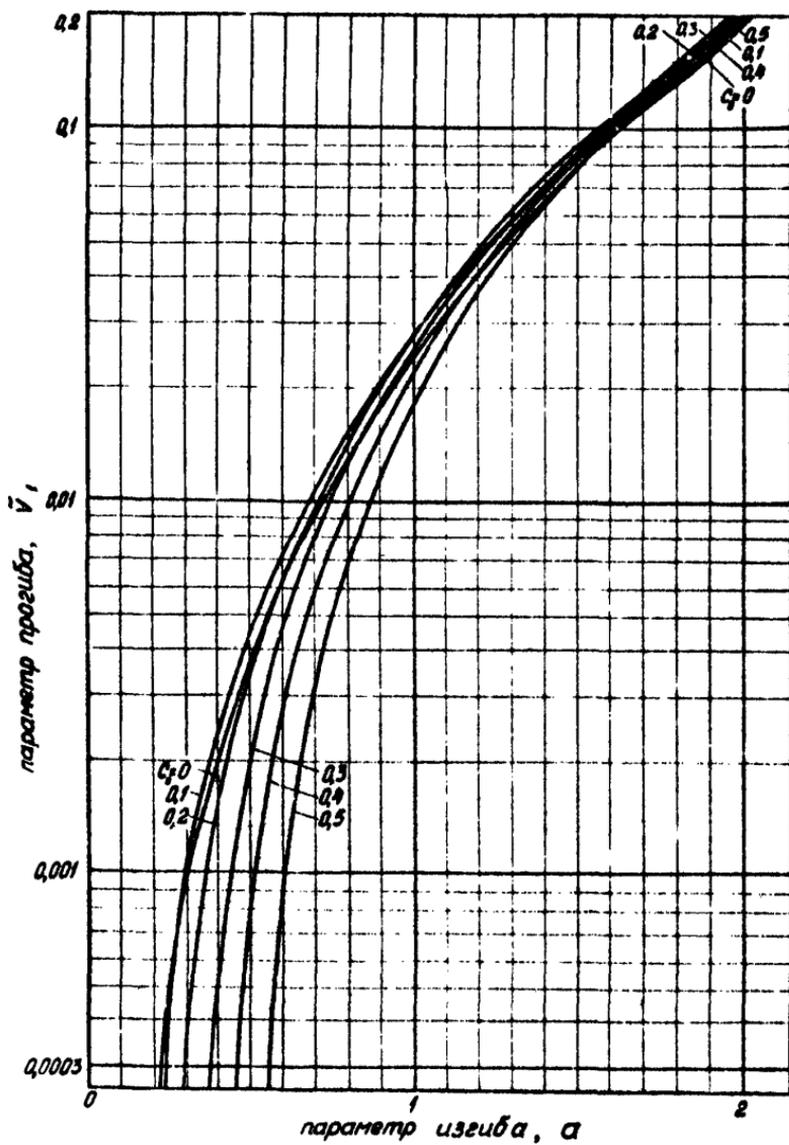


Рис.П.5.7.График для определения параметра прогиба  $V_i$ .

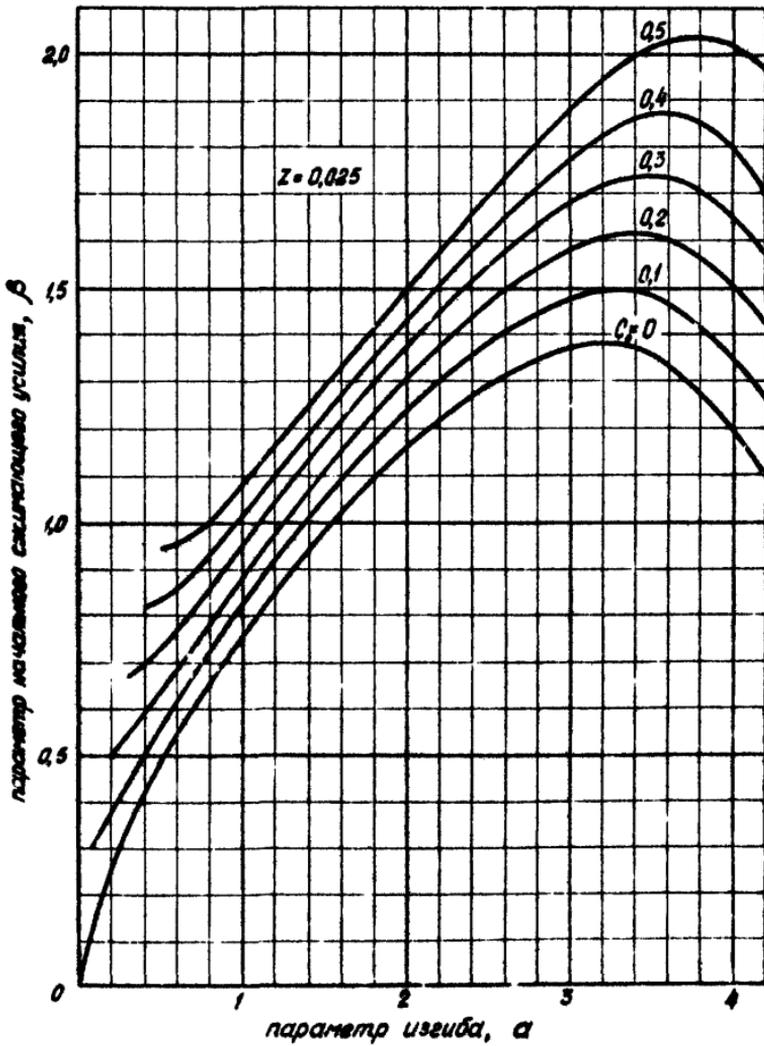


Рис. П.5.8. График для определения параметра  $C$  при  $z = 0,025$ .

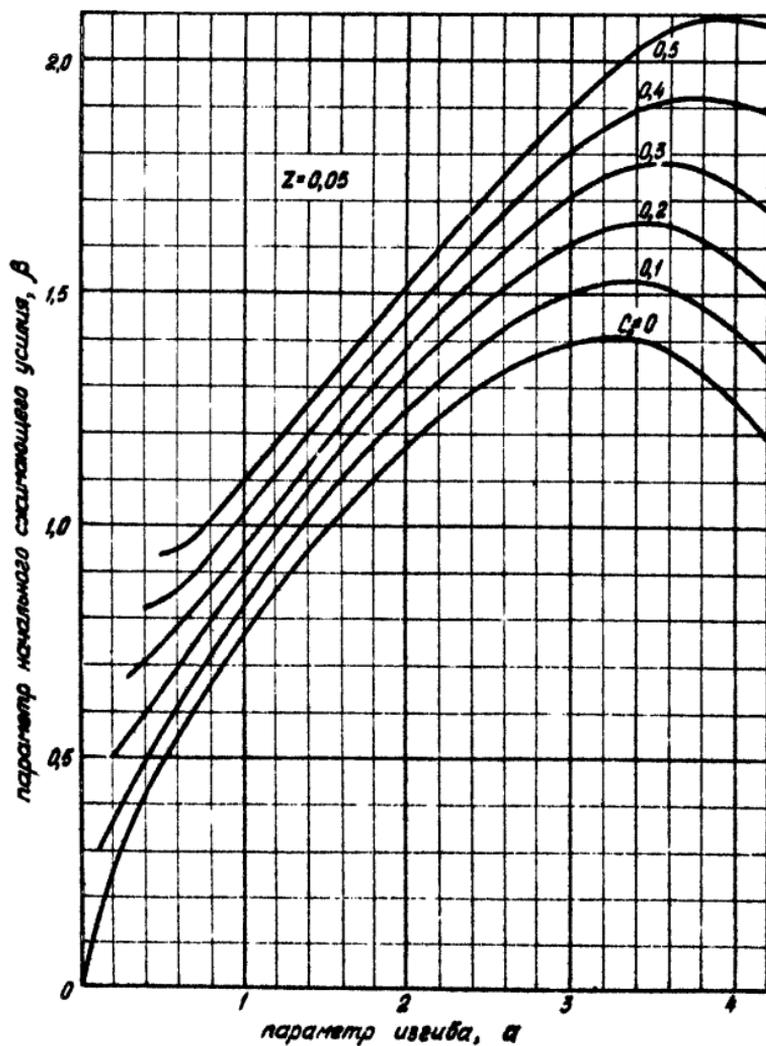


Рис. П.5.9. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,05$ .

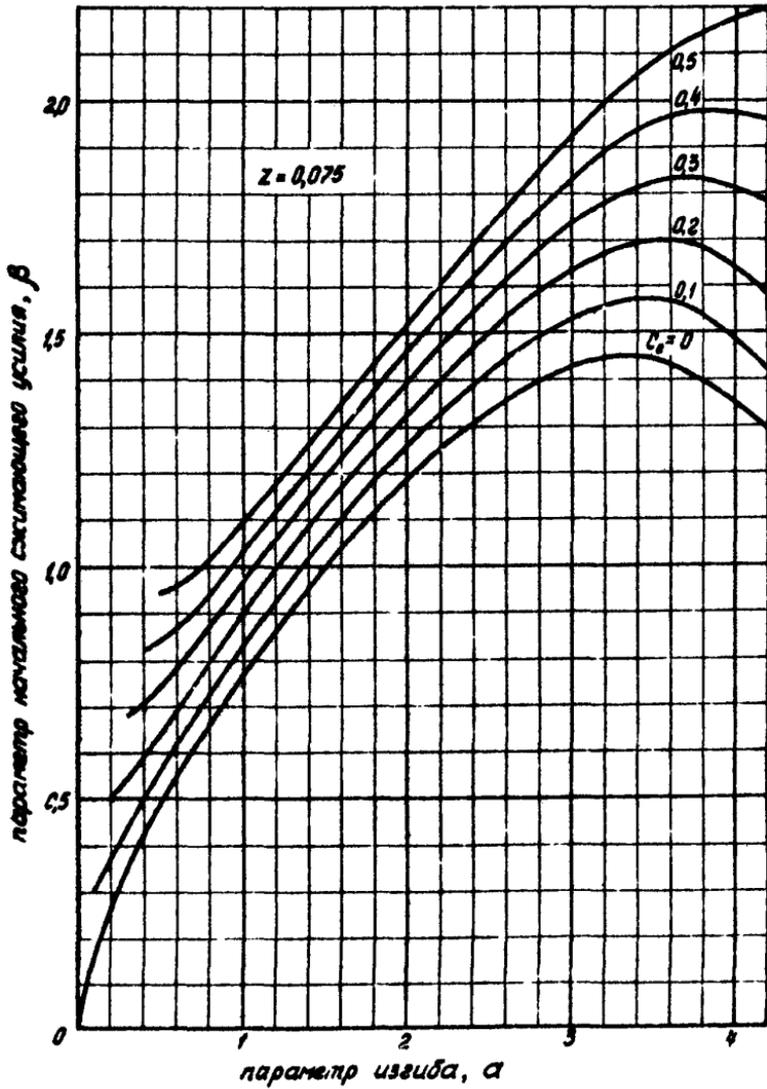


Рис. 5.10. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,075$ .

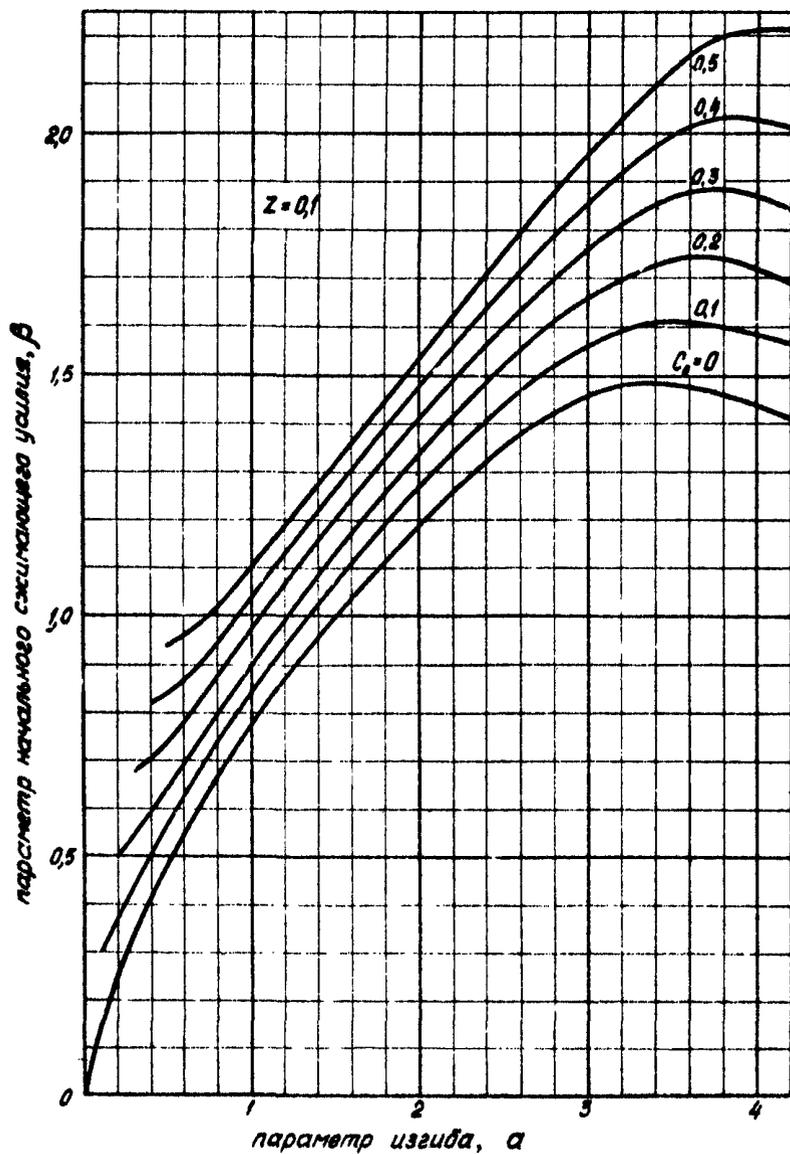


Рис. П.5.11. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,1$ .

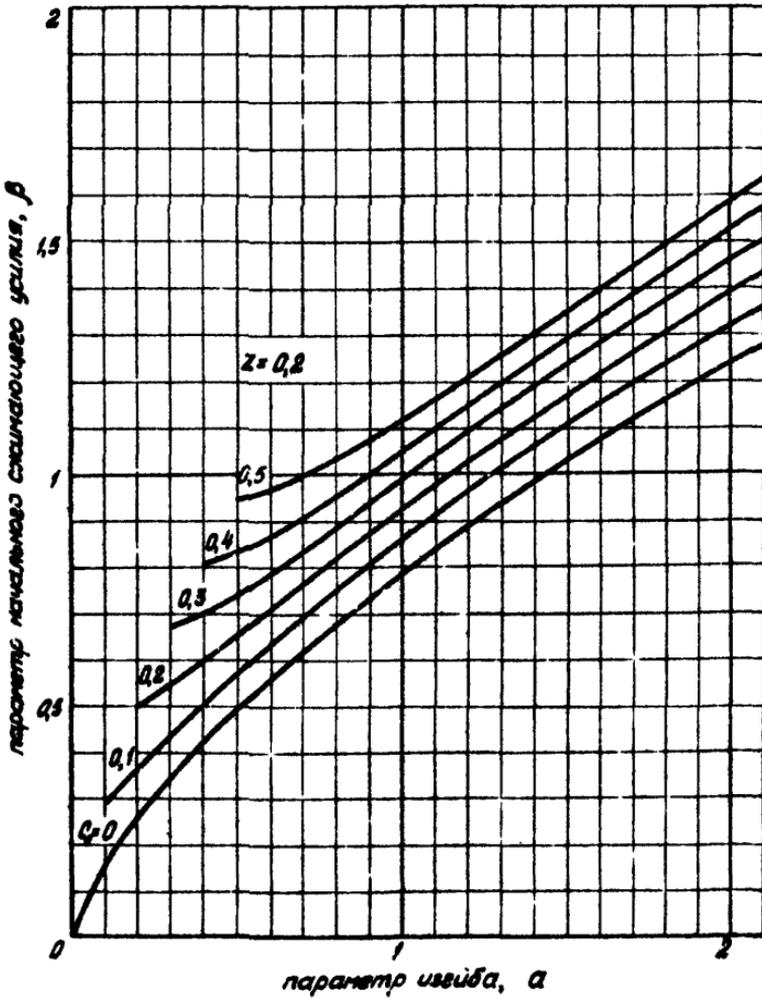


Рис.П.5.12. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,2$ .

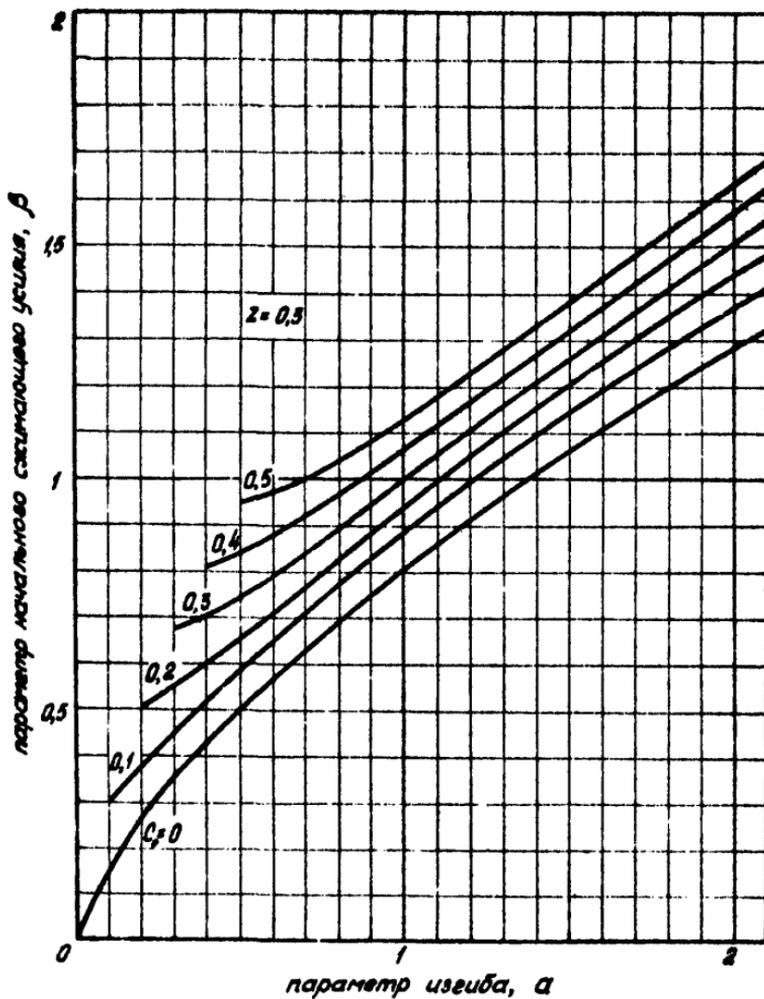


Рис. П.5.13. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,3$ .

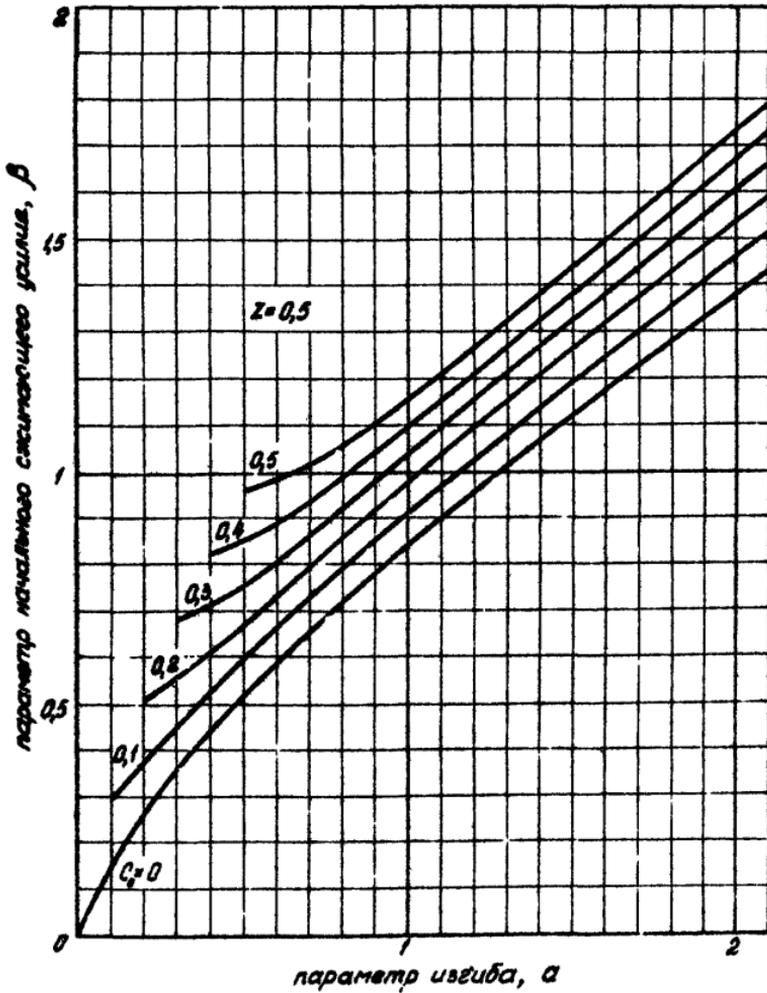


Рис.П.5.14. График для определения параметра  $a$  при  $z = 0,5$ .

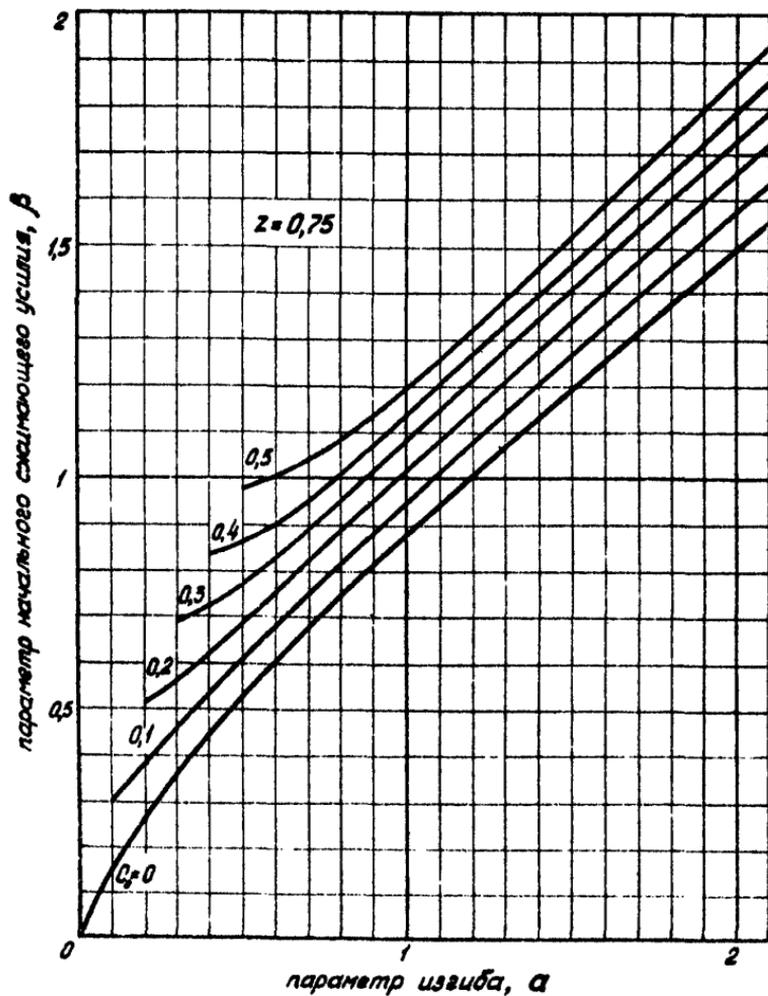


Рис.П.5.15. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,75$ .

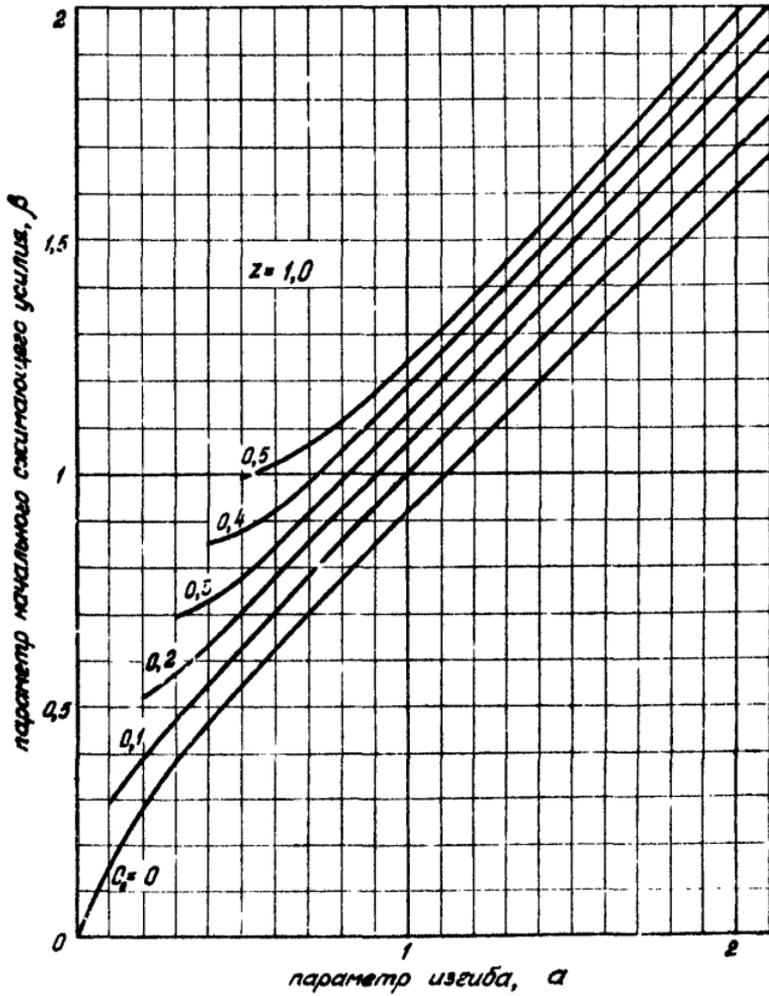


Рис.П.5.16. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 1$ .

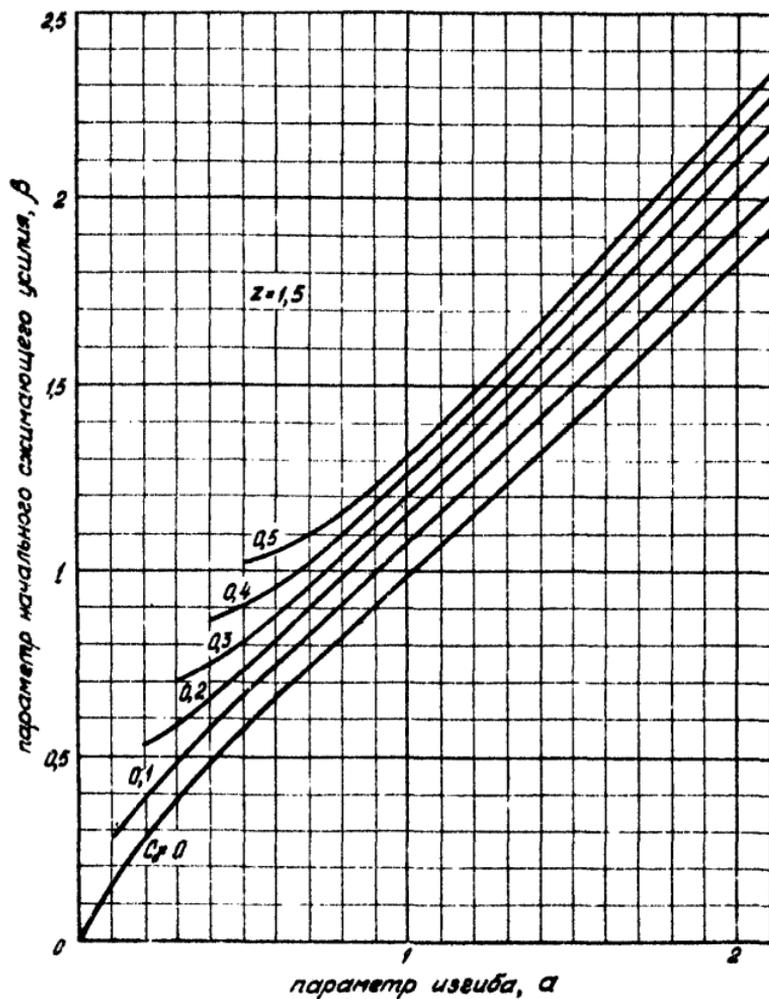


Рис. П.5.17. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 1,5$ .

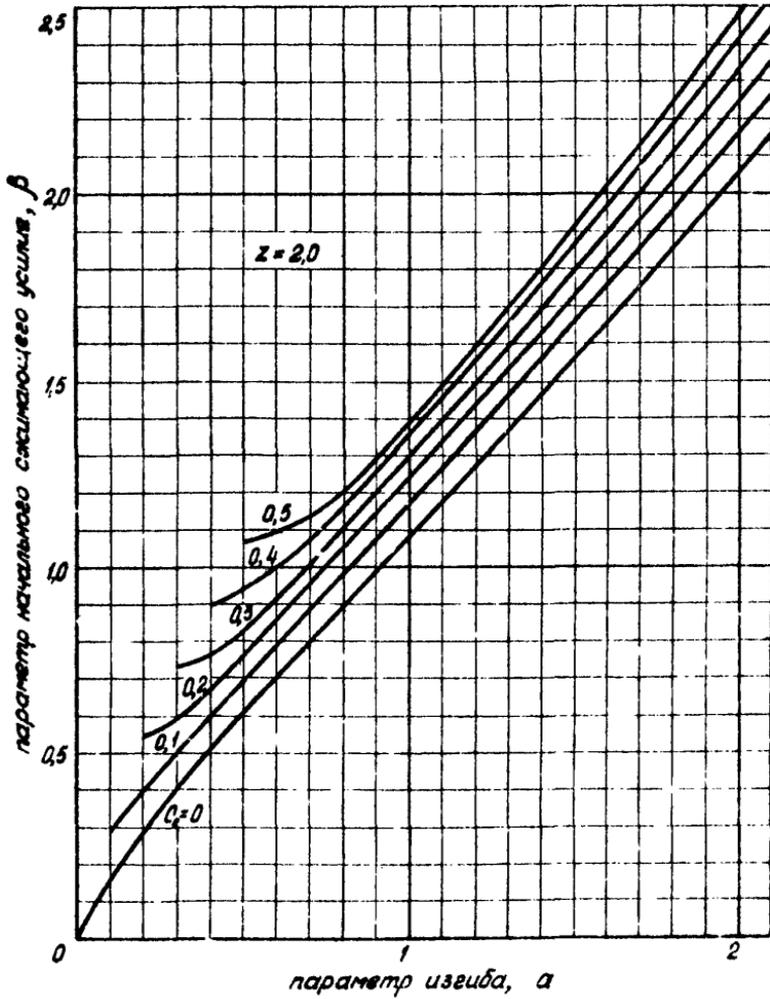


Рис.П.5.18. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 2$ .

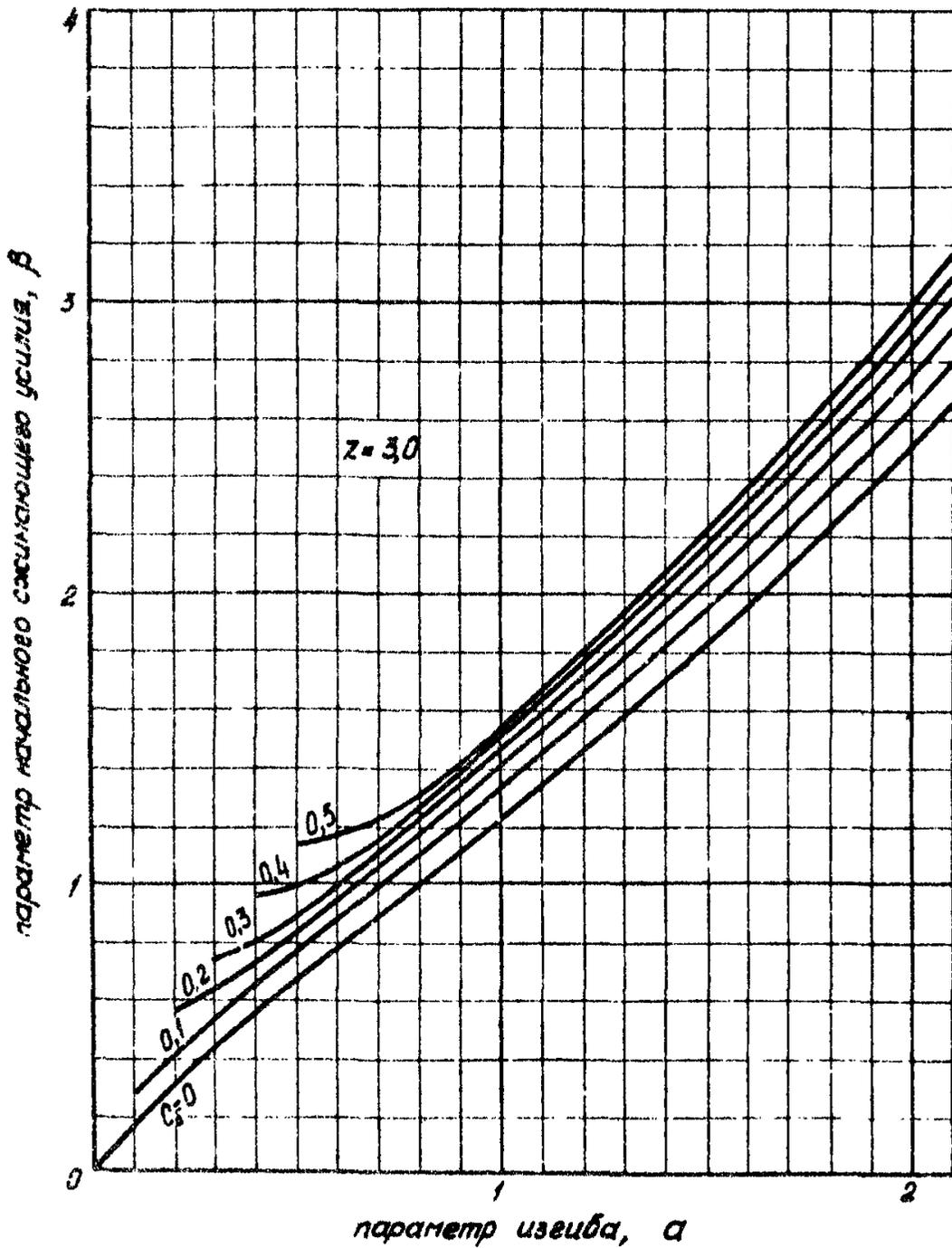


Рис. П.5.19. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 30$ .

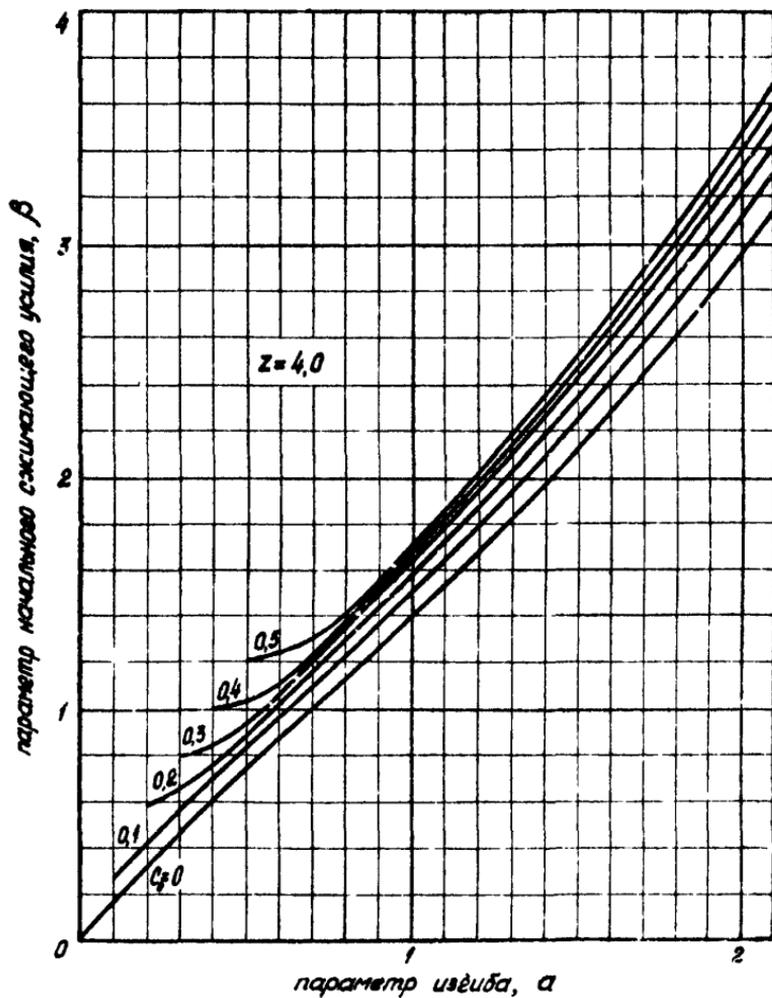


Рис.П.5.20. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 4$ .



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

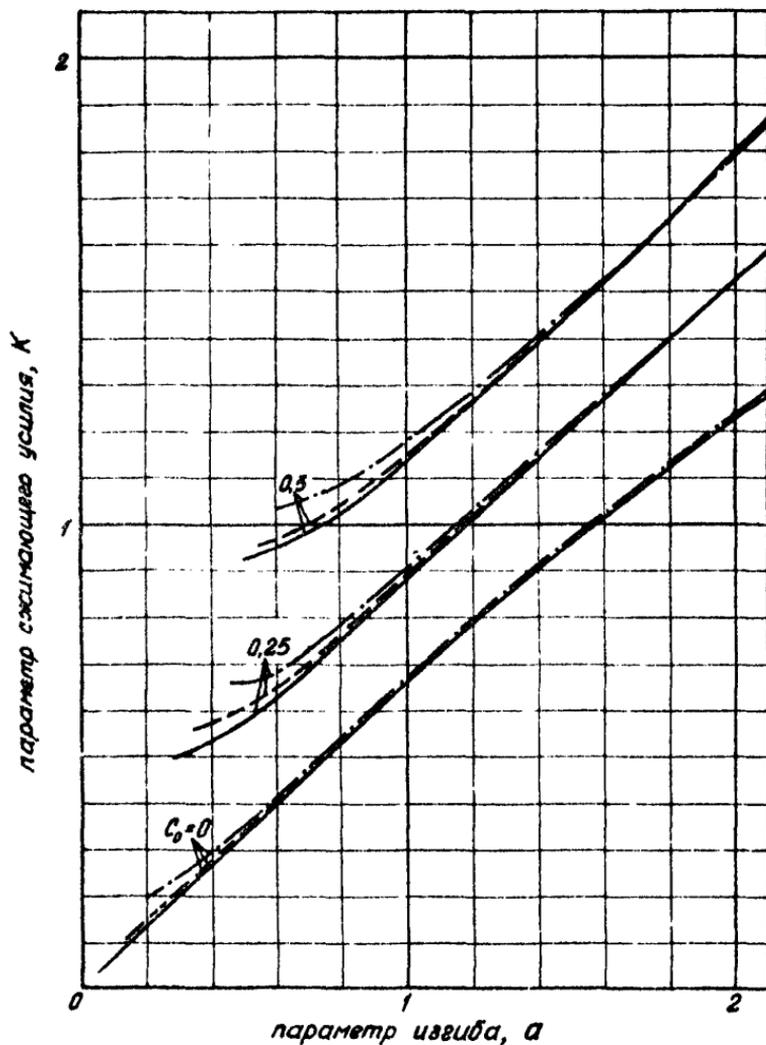


Рис.П.5.21. Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

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

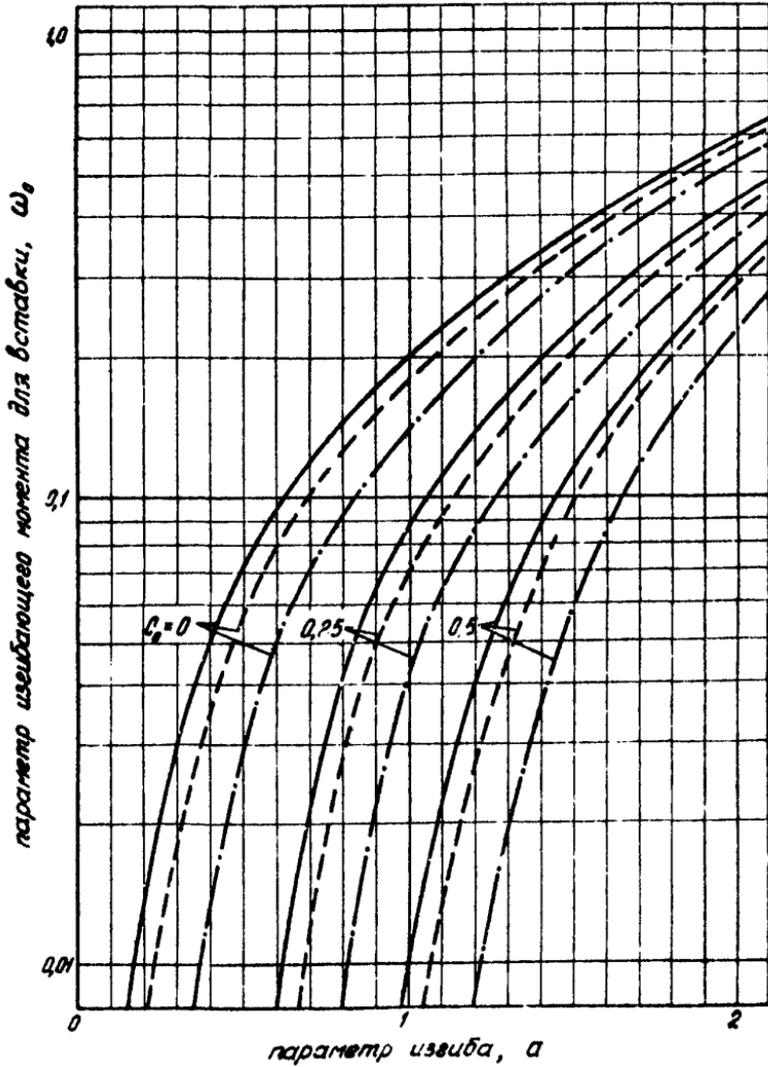


Рис.П.5.22. График для определения параметра изгибающего момента  $\omega_0$ .

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

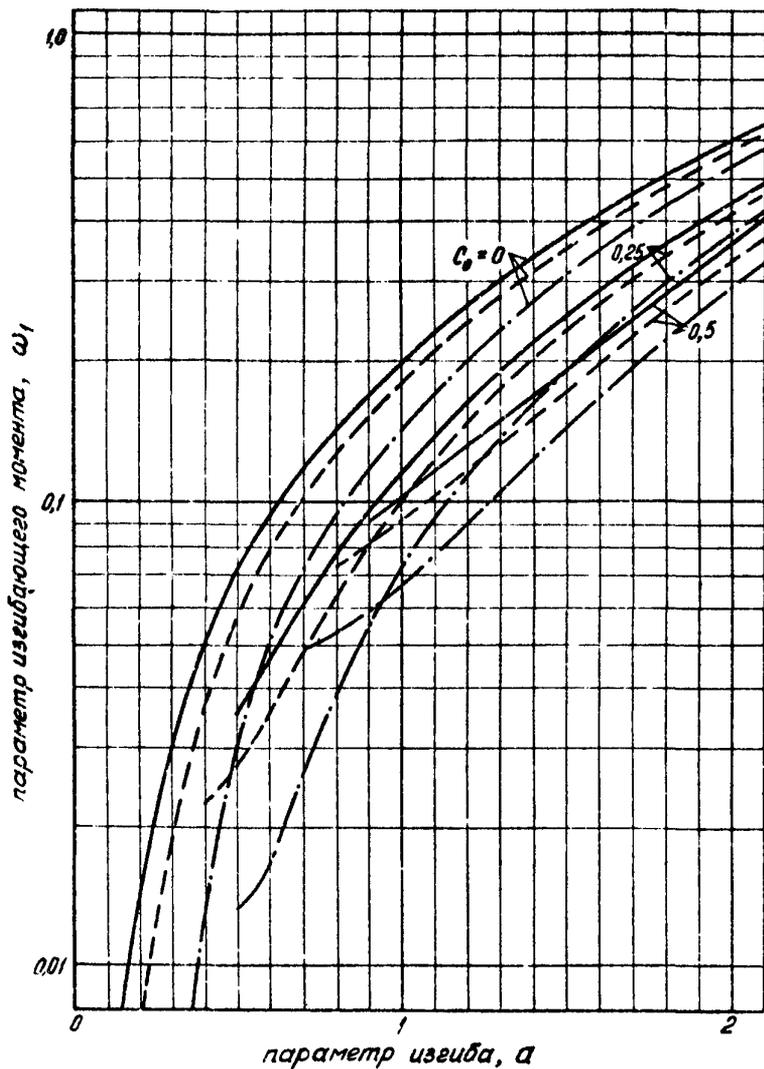


Рис.П.5.23.График для определения параметра изгибающего момента  $\omega_1$ .

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

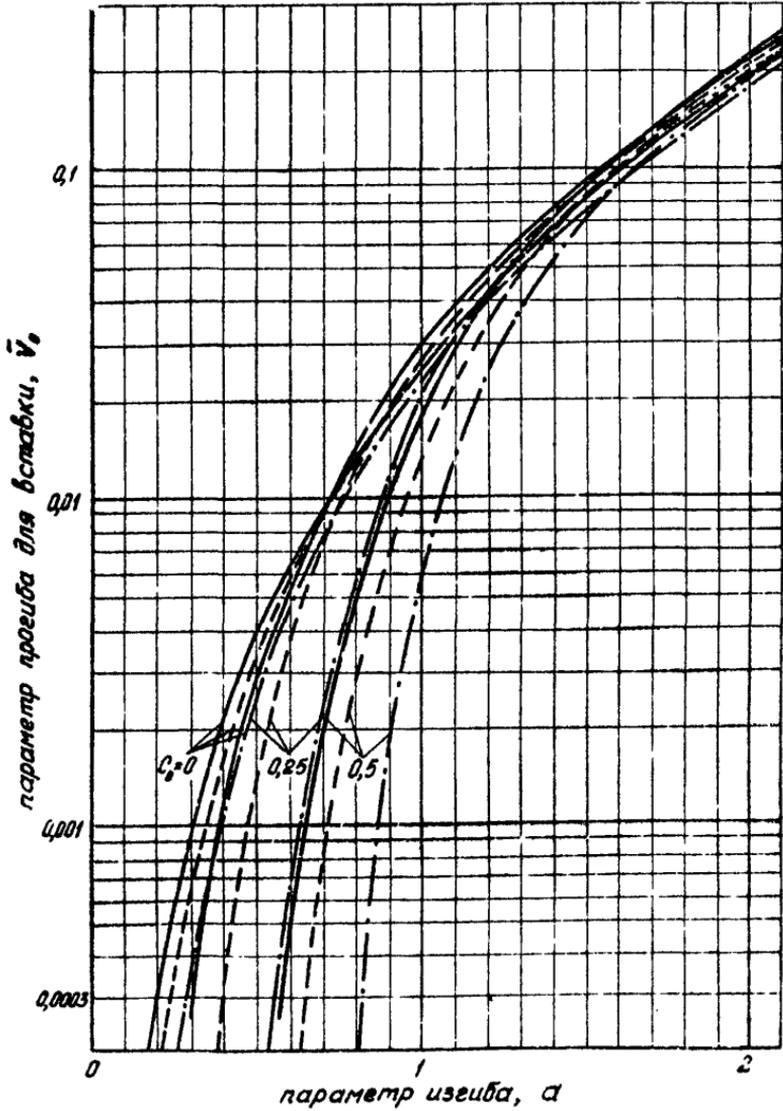


Рис. II.5.24. График для определения параметра прогиба  $\bar{V}_0$ .

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

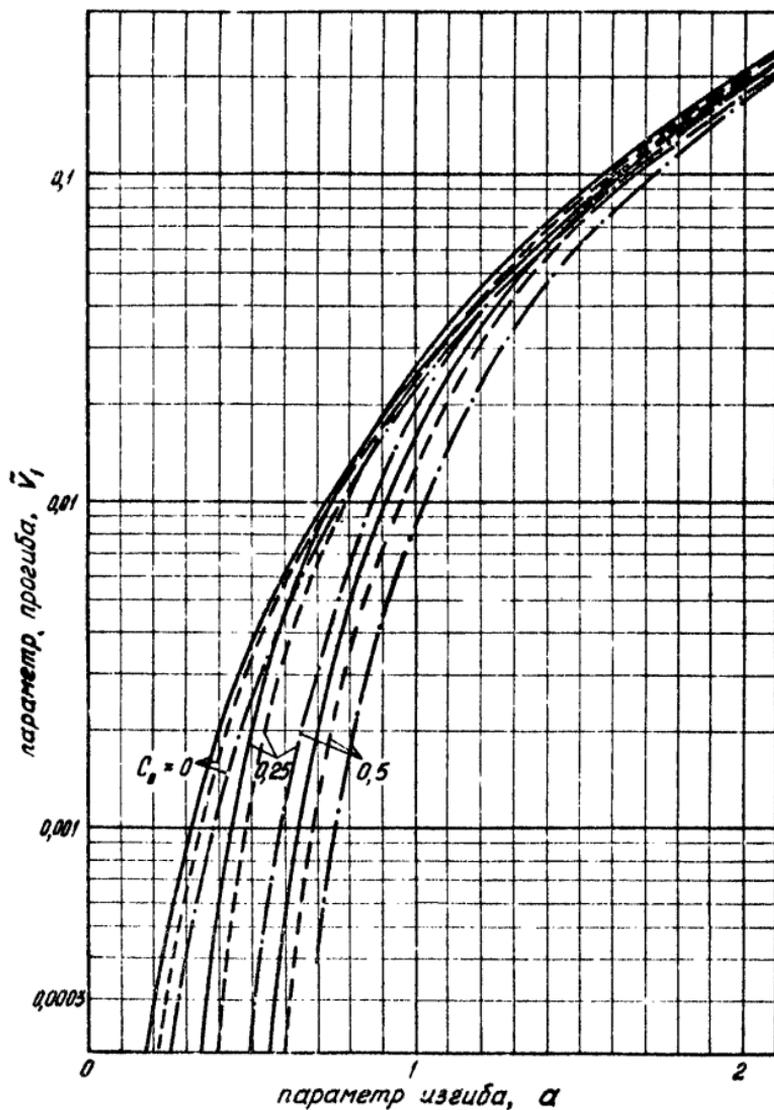


Рис.П.5.25. График для определения параметра прогиба  $\tilde{V}_1$ .

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

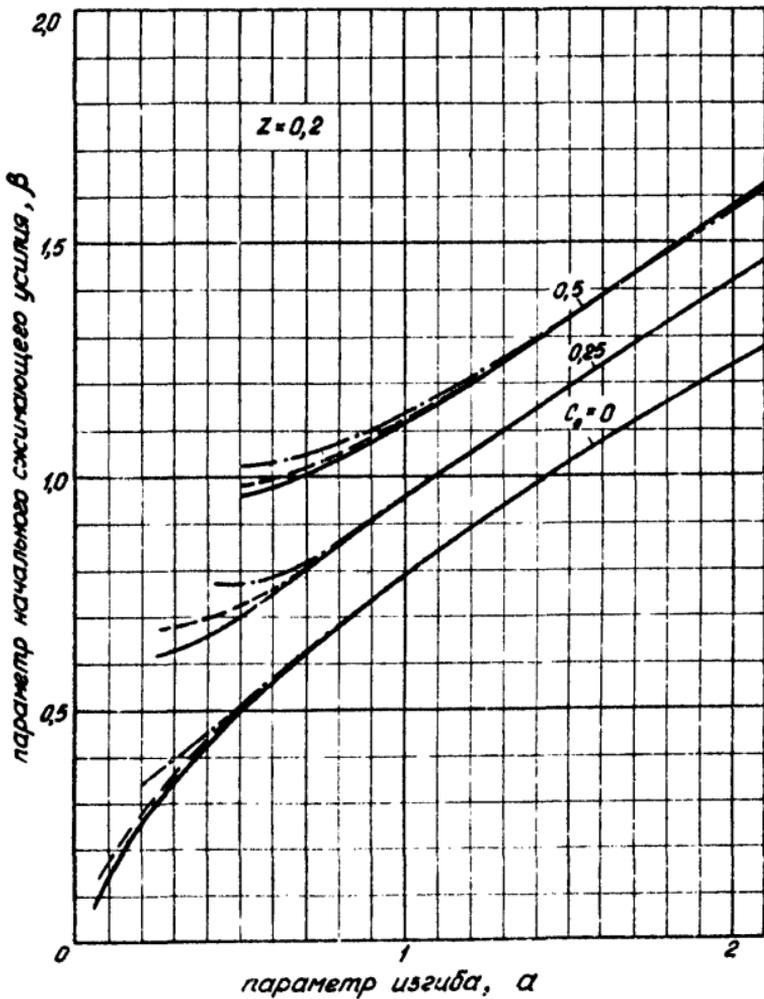


Рис. П.5.30. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,2$ .

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

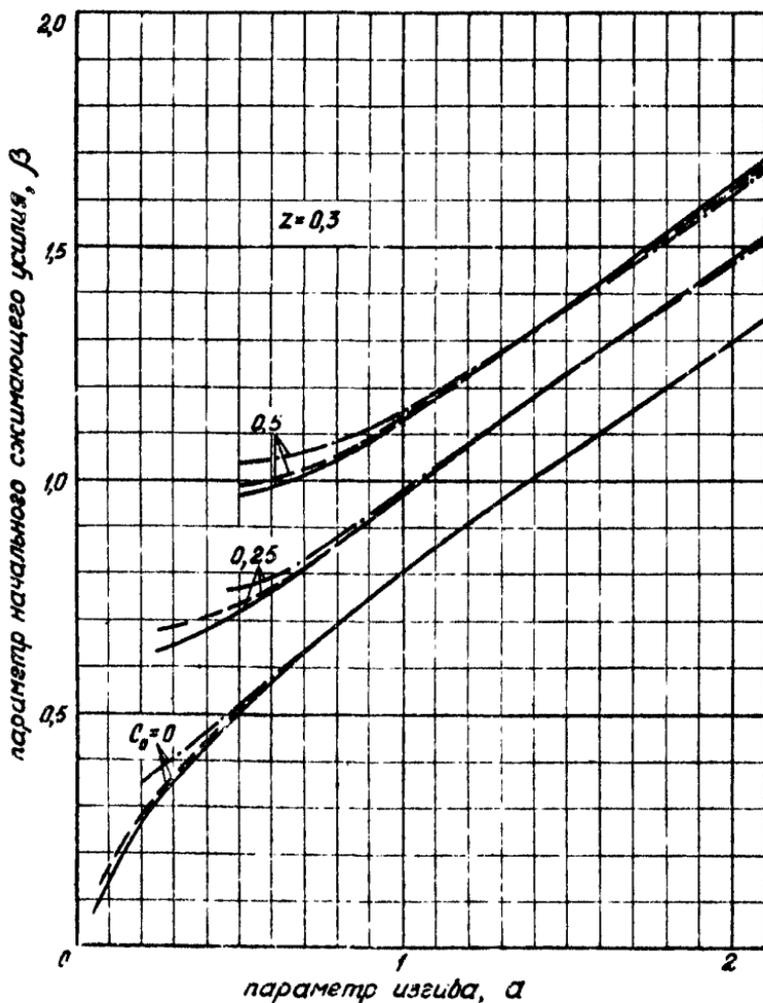


Рис. П.5.31. Графики для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,3$ .

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

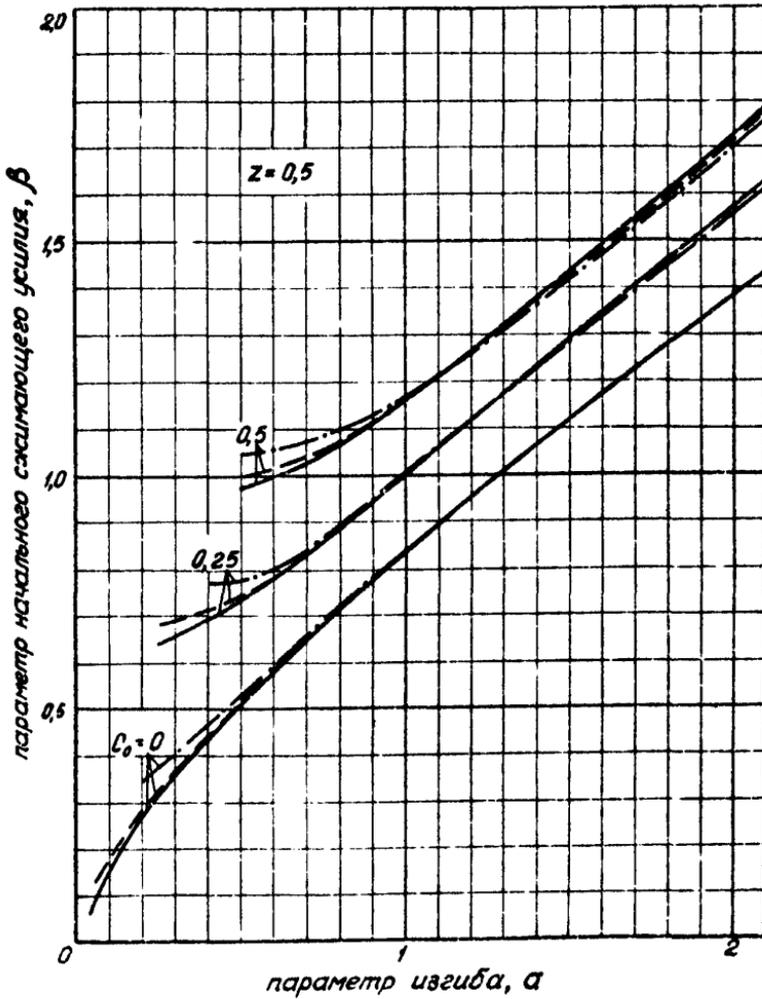


Рис. П.5.32. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,5$ .

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

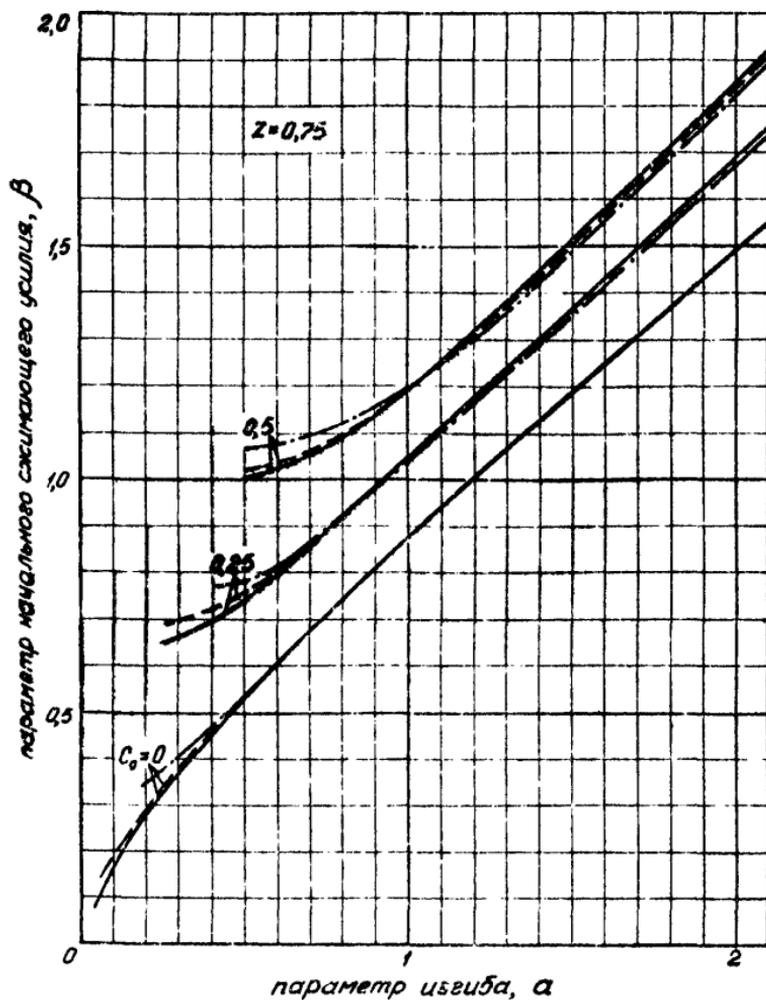


Рис.П.5.33. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,75$ .

—  $c_0 = 0,05$ ;    - - -  $c_0 = 0,1$ ;    - · -  $c_0 = 0,2$

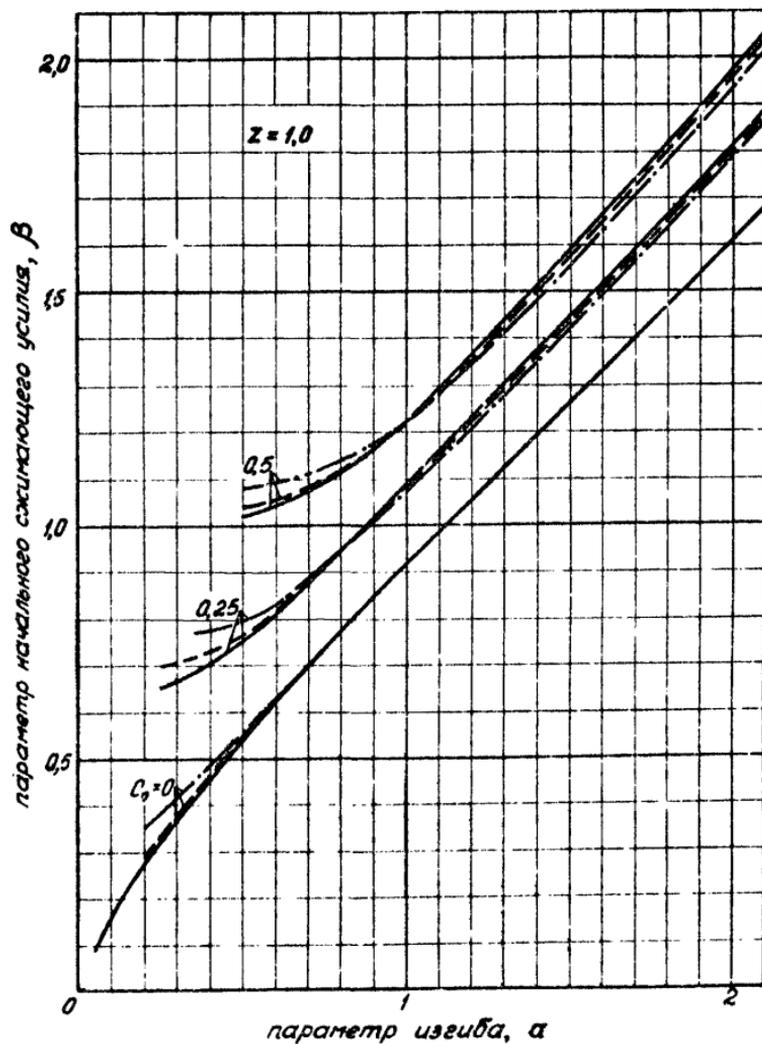


Рис. П.5.34. График для определения параметра  $\alpha$  при  $Z = 1$ .

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

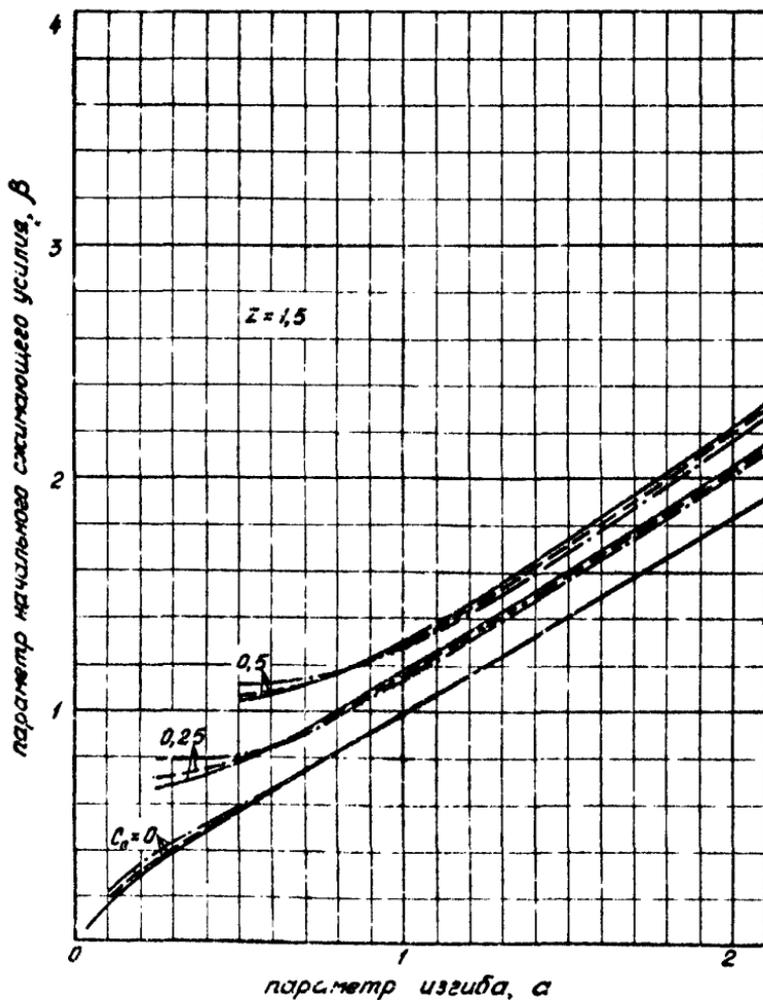


Рис.П.5.35. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 1,5$ .

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

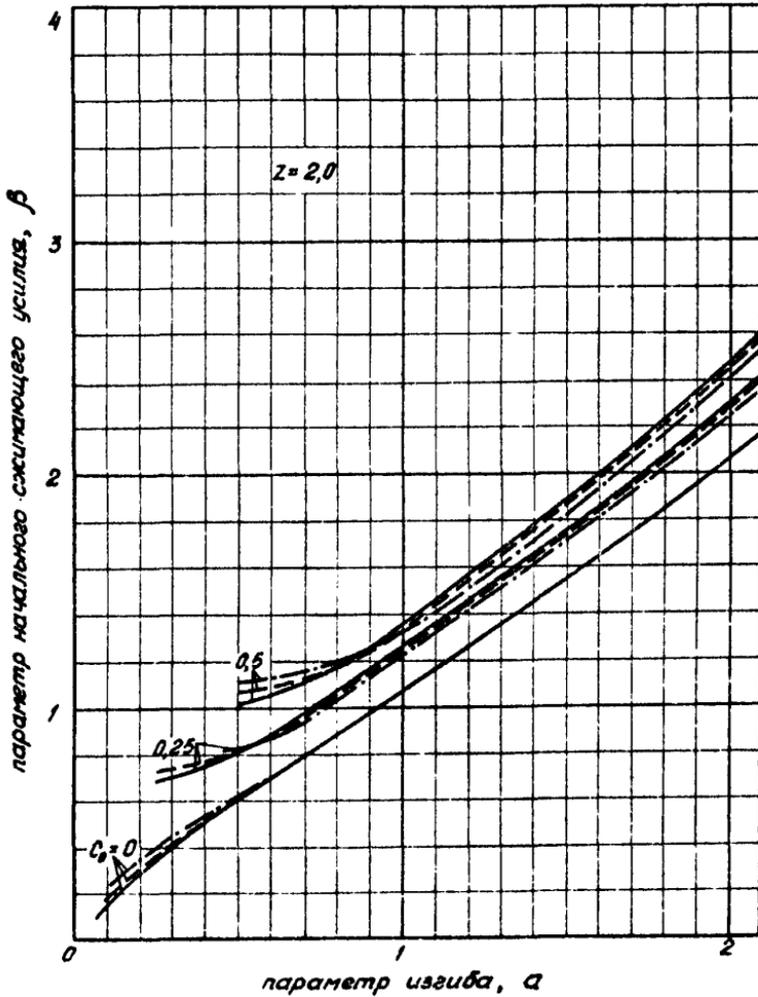


Рис.П.5.36. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 2$ .

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

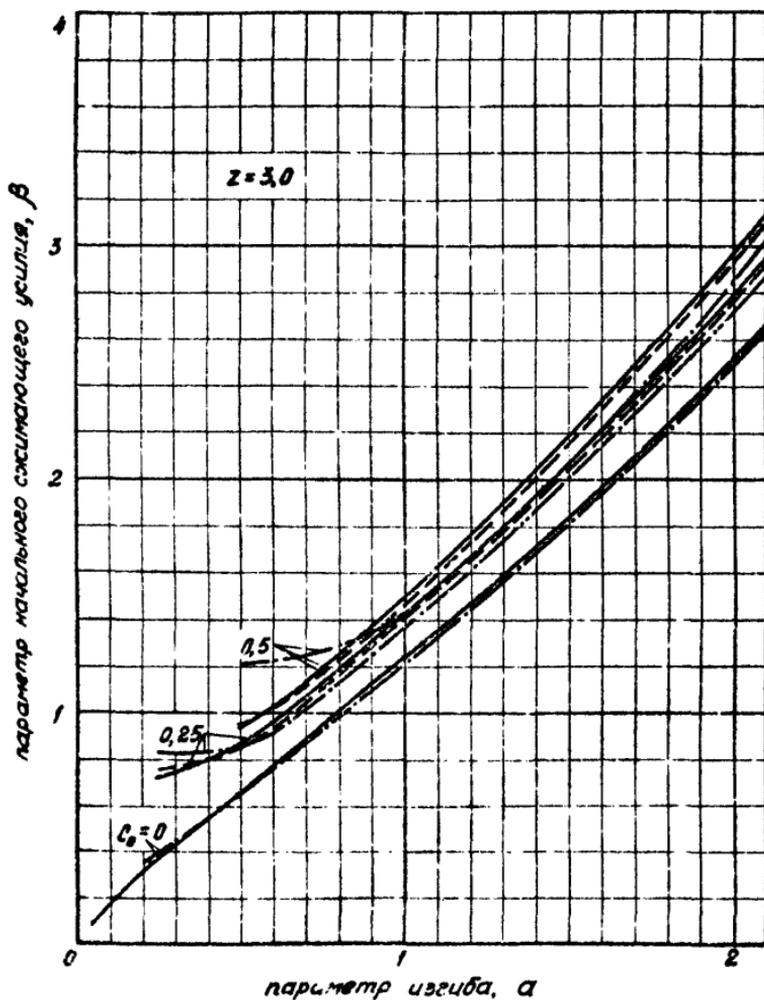


Рис.П.5.37. График для определения параметра  $\alpha$  при,  $z = 3$ .

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

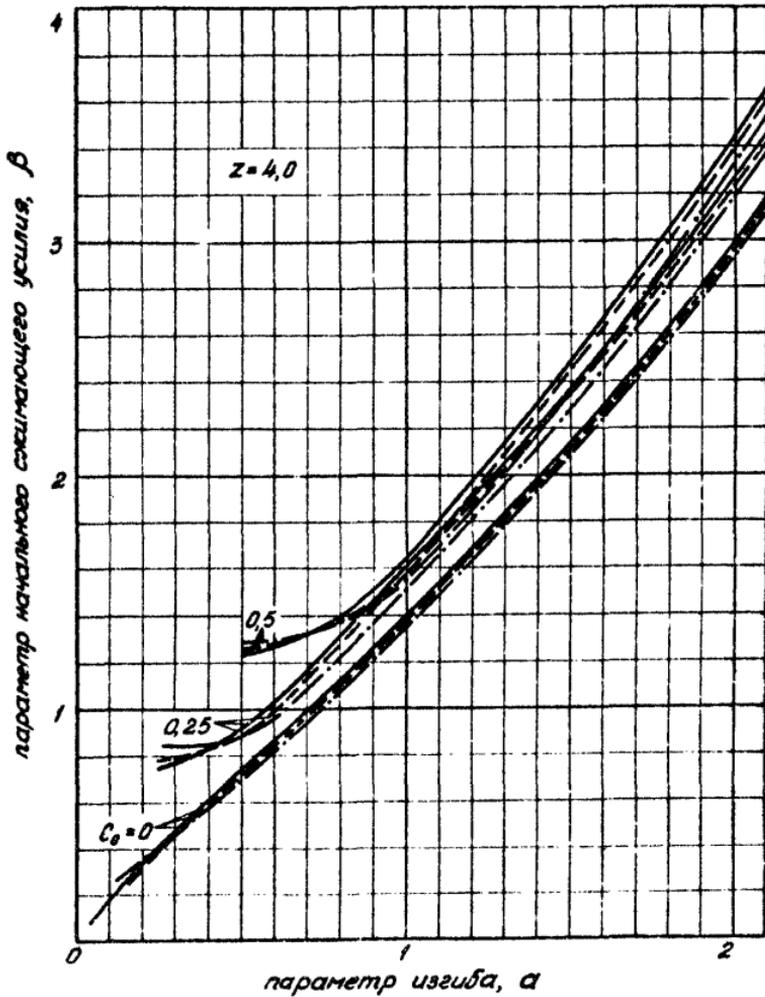


Рис.П.5.38. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 4$ .

—  $\alpha_0 = 0,05$ ;    - - -  $\alpha_0 = 0,1$ ;    - · -  $\alpha_0 = 0,02$ .



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

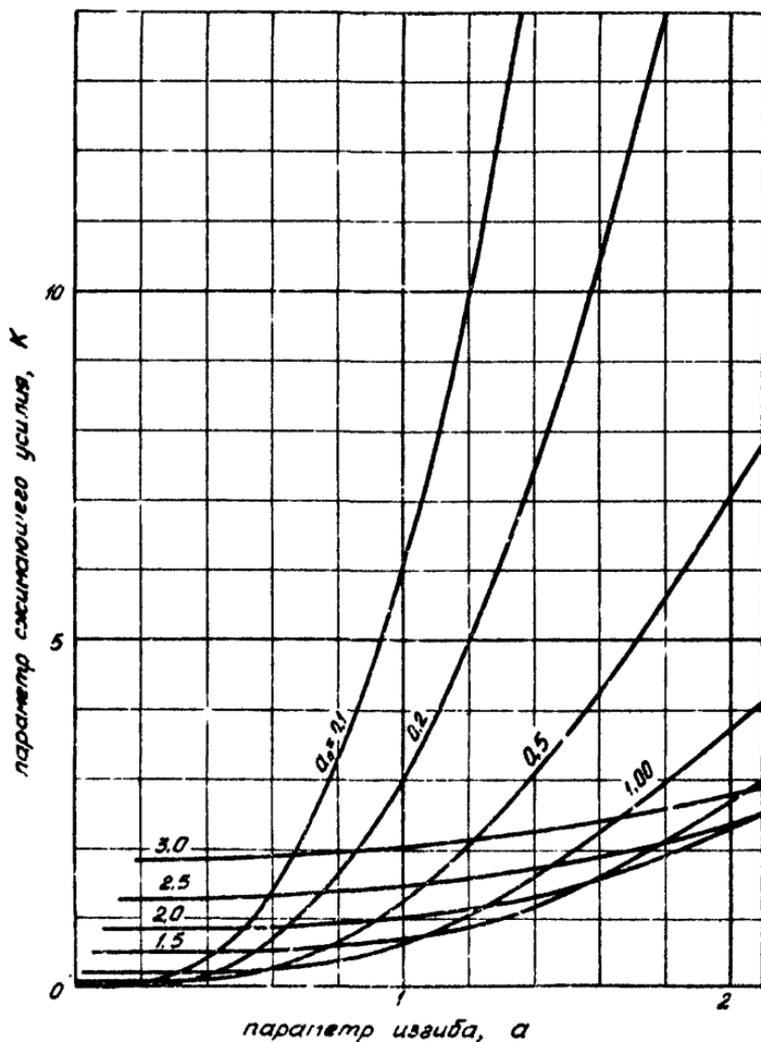


Рис.П.5.39. Зависимости параметра сжимающего усилия и изгиба.

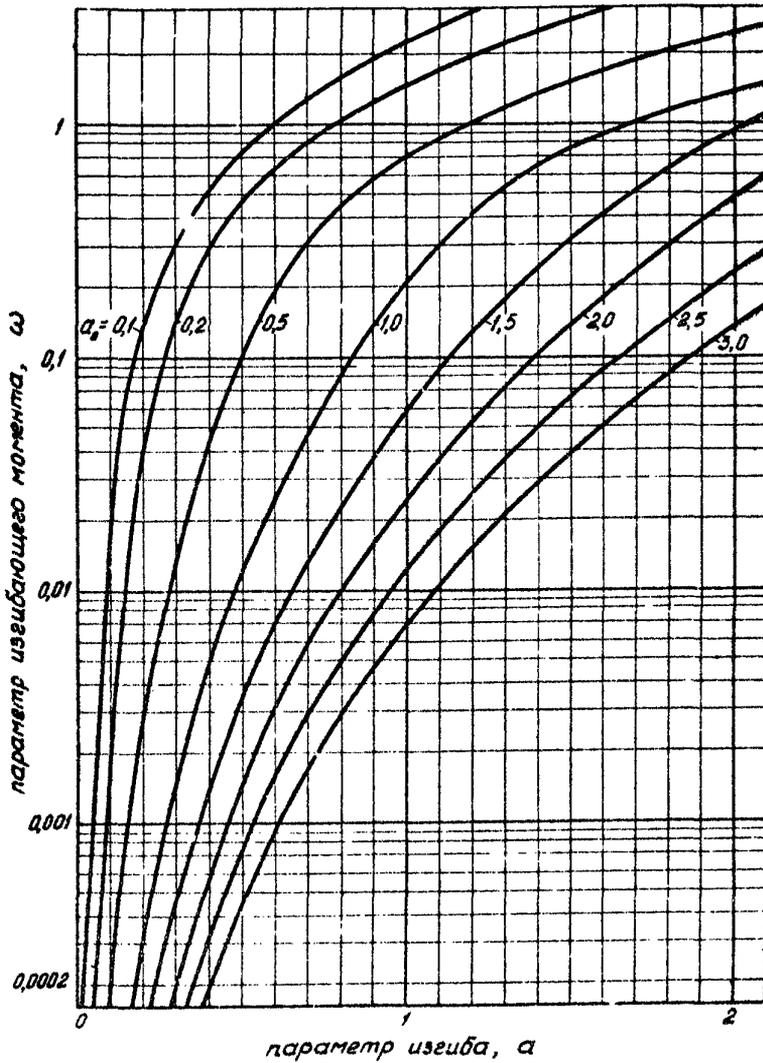


Рис.П.5.40. Графики для определения параметра изгибающего момента.

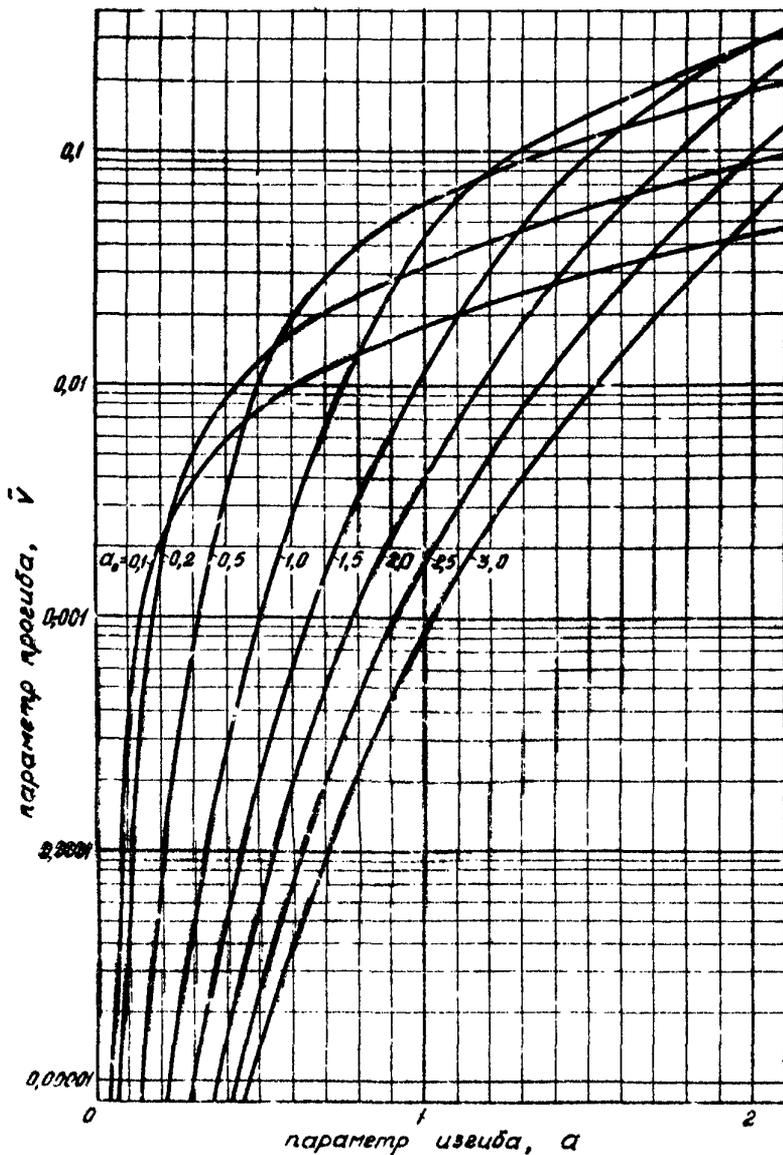


Рис.П.5.41. График для определения параметра прогиба.

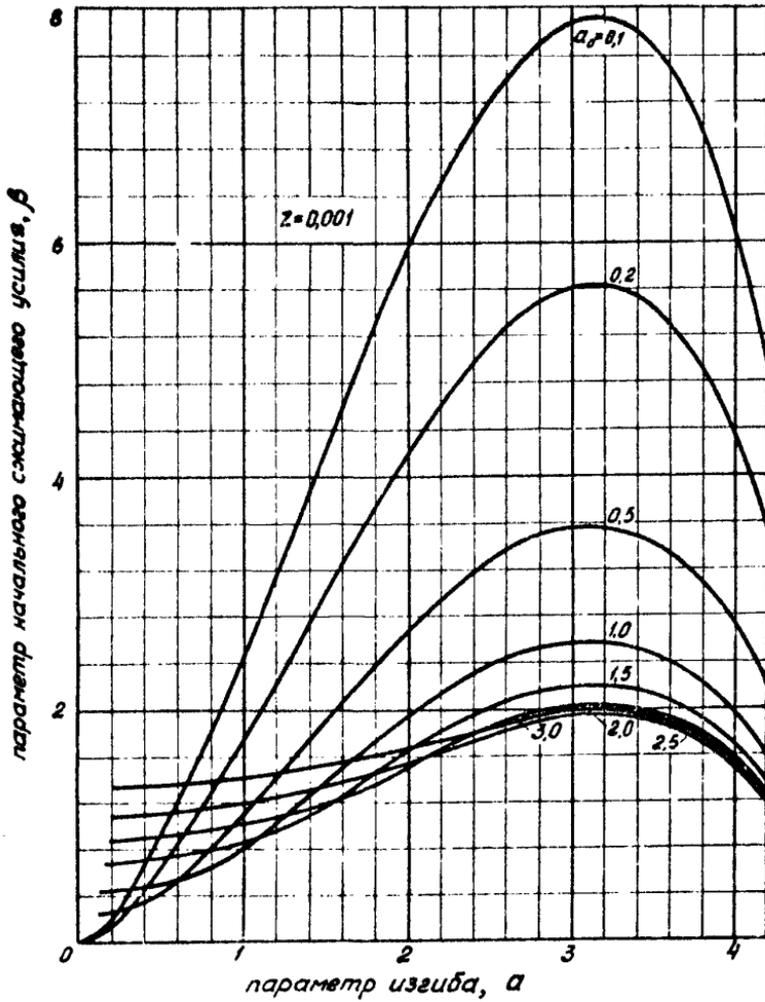


Рис.П.5.42. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,001$ .

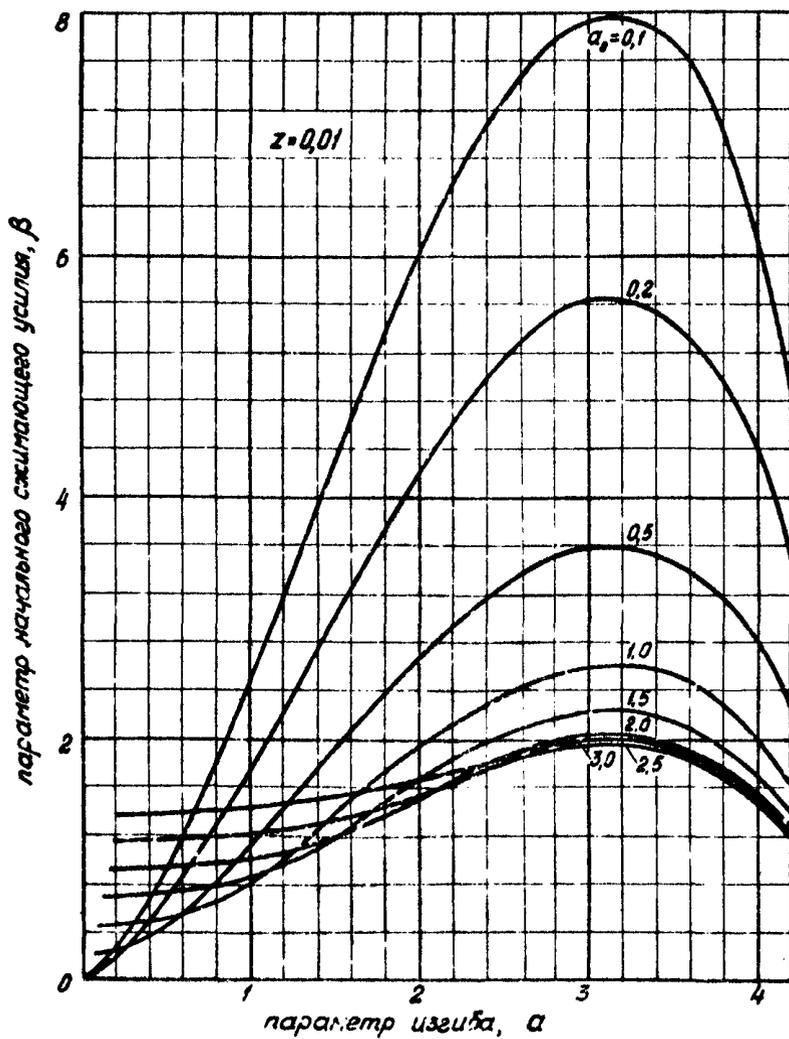


Рис.П.5.43. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,01$ .

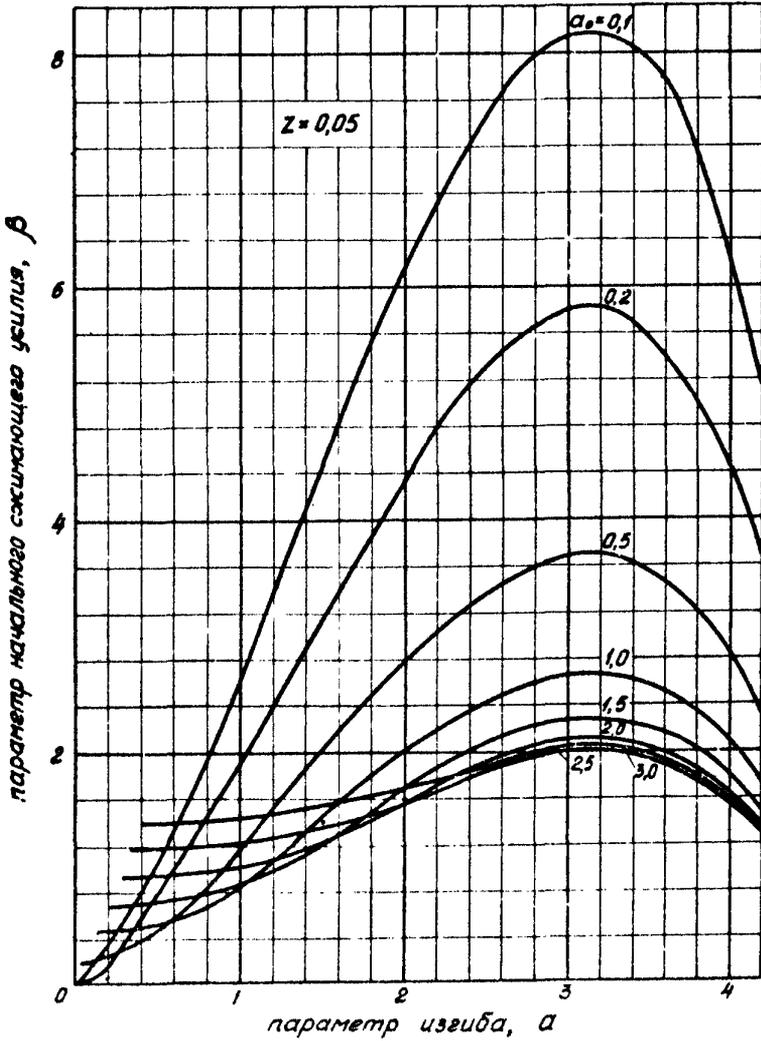


Рис.П.5.44. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,05$ .

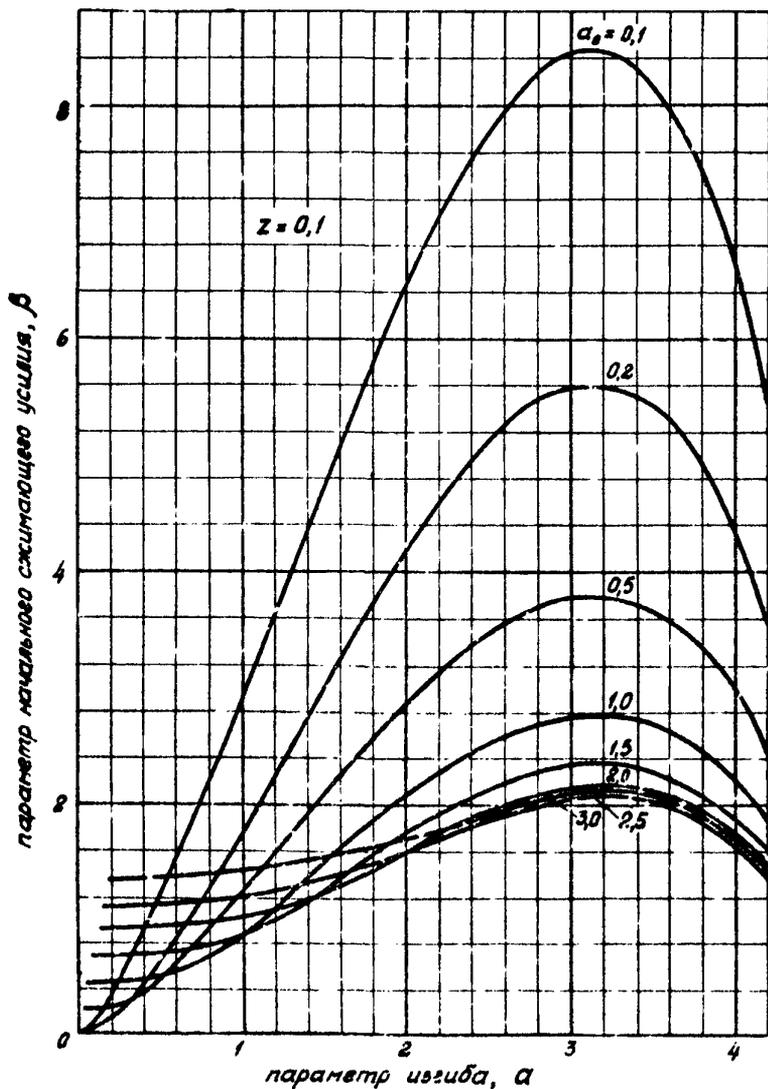


Рис. П.5.45. Графики для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,1$ .

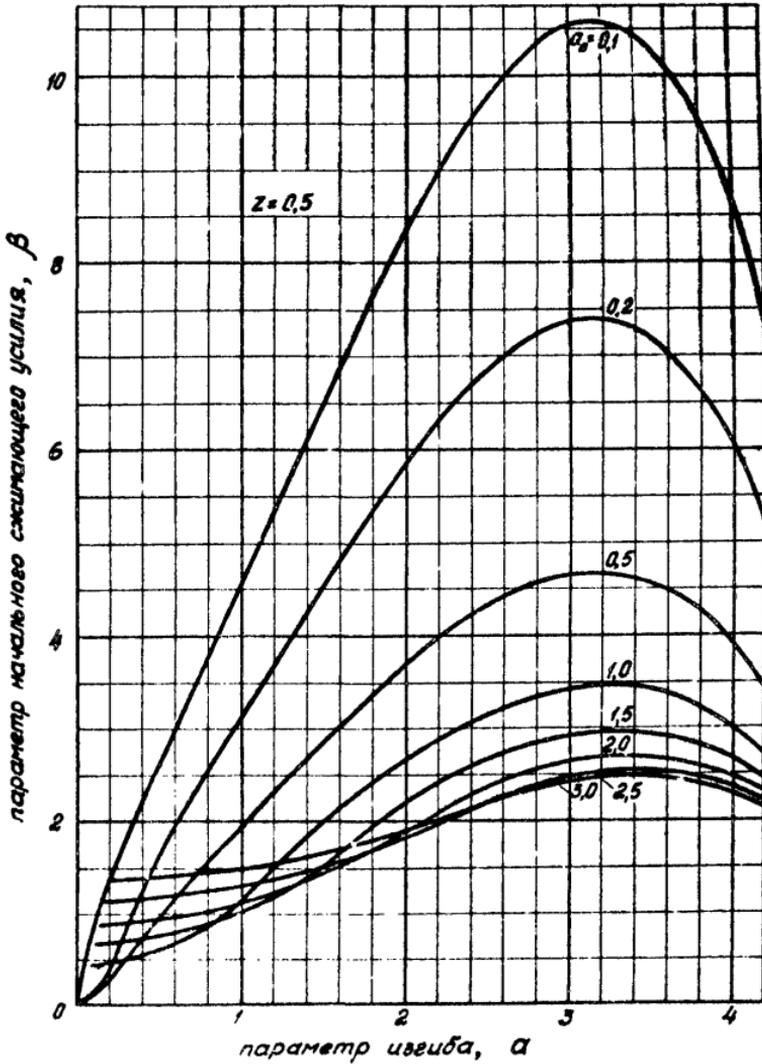


Рис.П.5.46. Графики для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,5$ .

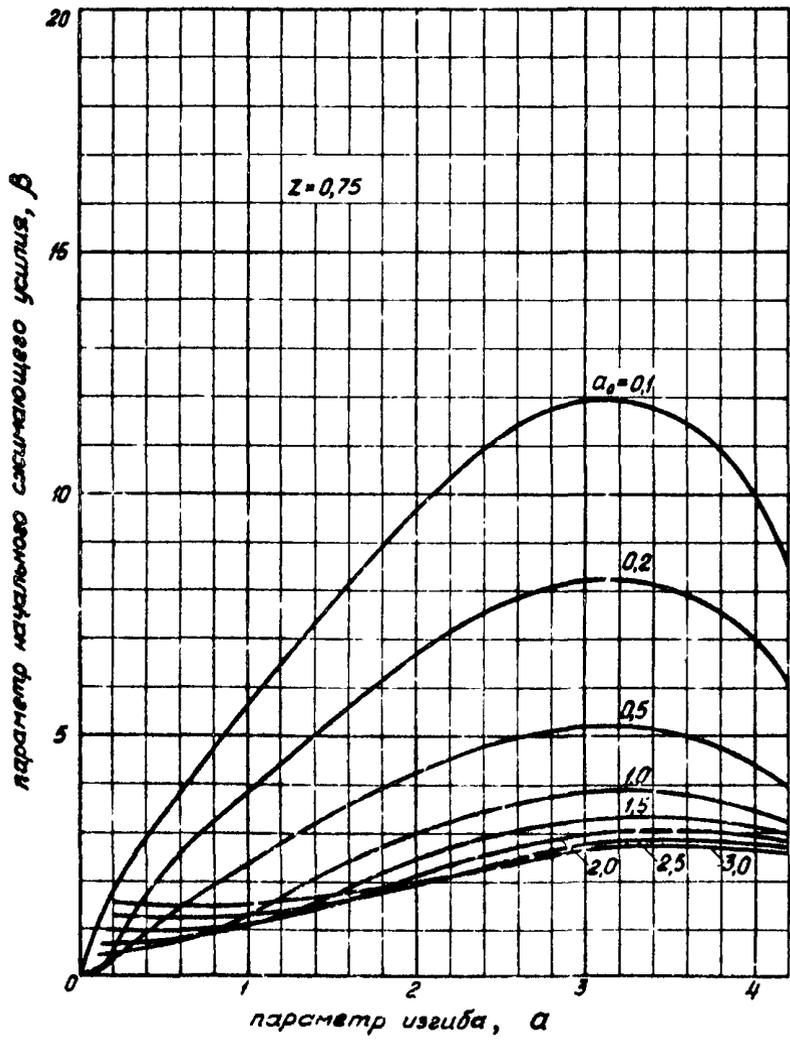


Рис.П.5.47. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 0,75$ .

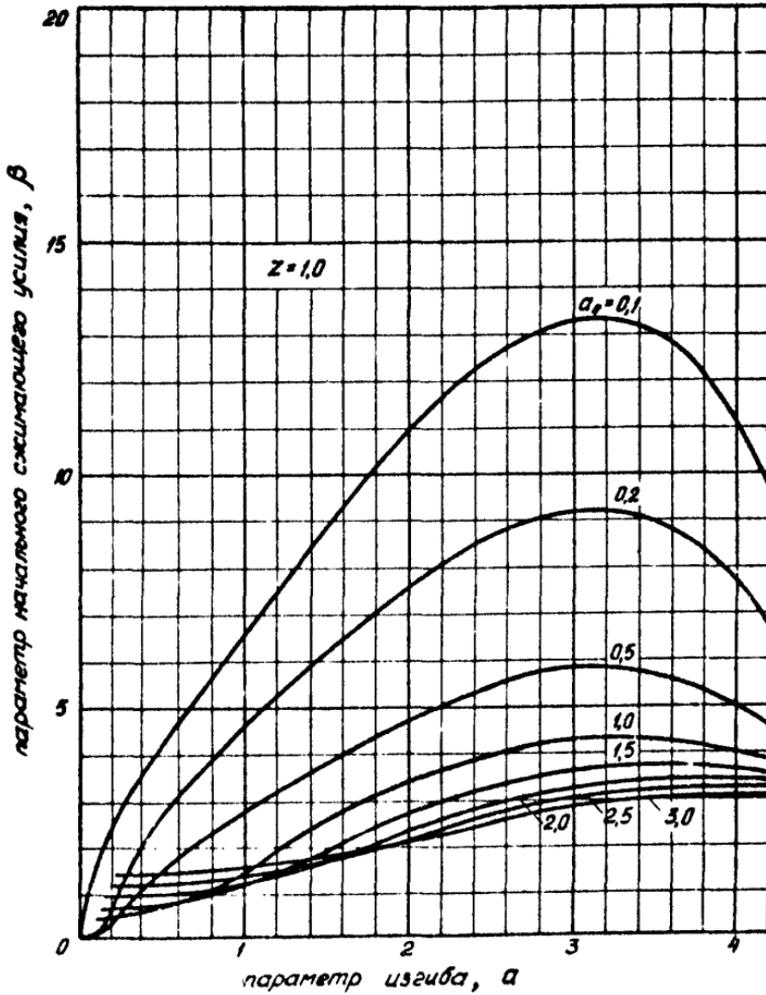


Рис.П.5.48. График для определения параметра  $a$  при  $z = 1$ .

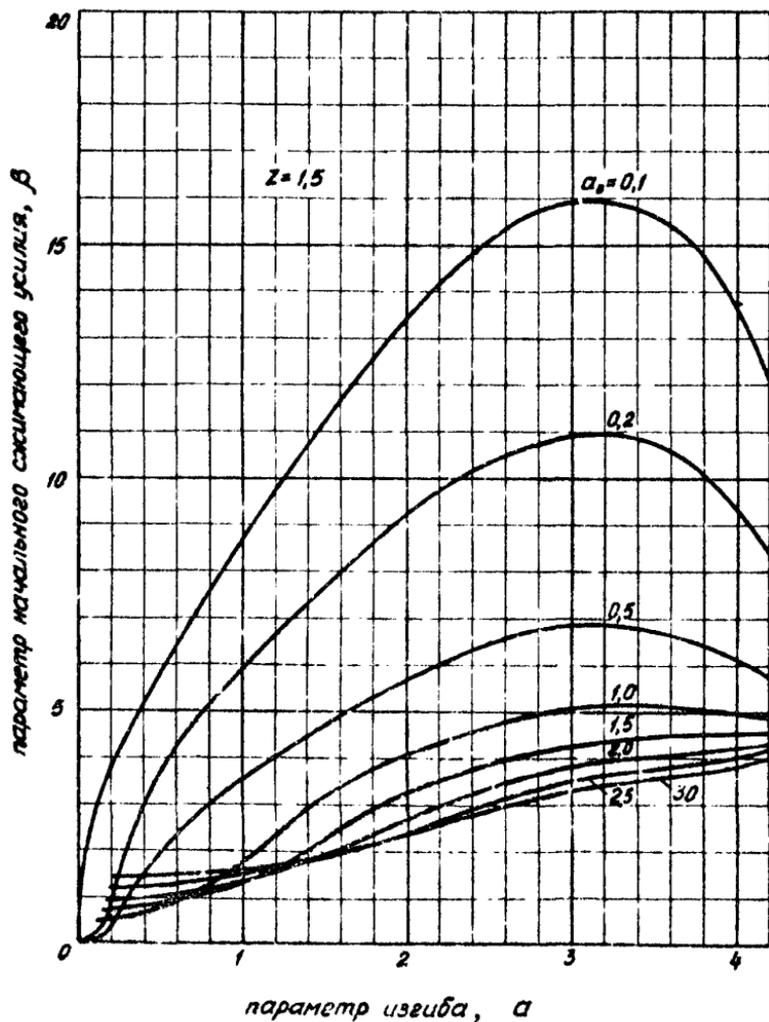


Рис.1.5.49. График для определения параметра  $\alpha$  при  $z = 1,5$ .

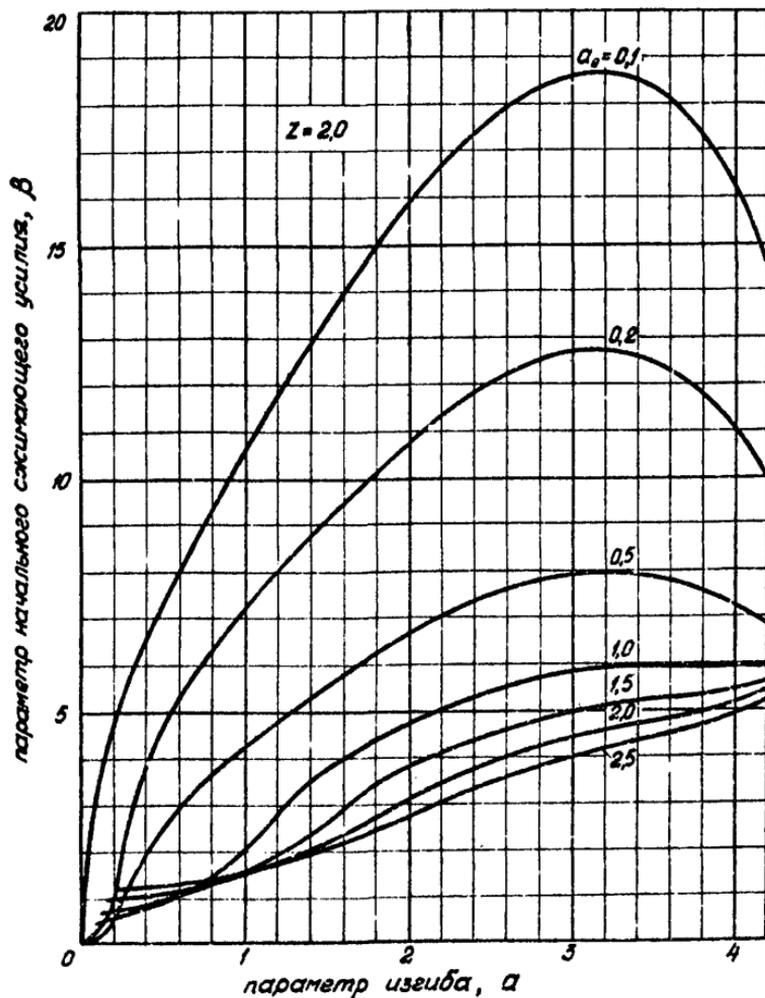


Рис.П.5.50. График для определения параметра  $\alpha$  при  $Z = 2$ .

## 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, выполненным 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 ЭЦМ "ЕС-1022" .....	37
11. Расчёт трубопровода на ЭЦМ "Илари-2".....	38
Список литературы.....	41
Приложение 1. Примеры графо-аналитического способа расчёта трубопровода.....	44
Приложение 2. Примеры расчёта трубопровода на ЭЦМ "ЕС-1022" .....	57
Приложение 3. Программы решения задачи на ЭЦМ "Илари-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**

**ВНИИСПНефть**  
**г. Уфа, просп. Октября, 144/3**

---

Подписано к печати 16.08.79 1103456  
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 6.1. Тираж 189 экз.  
Заказ 170

---

Ротапринт ВНИИСПНефти