МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНИИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА.

РД 39 - 30 - 613 - 81

1982

gost.e-ecolog.ru

Министерство нефтяной промышленности

Всесоюзный научно-исследовательский институт по сбору, подготовке и транспорту нефти и нефтепродуктов

ВНИИСПТнефть

УТВЕРЖДЕНА

первым заместителем министра

В.И.Кремневым

5 ноября 1981 г.

М Е Т О Д И К А

ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА

РД 39-30-613 - 81

1982

Методика разработана лабораторией надежности нефтепроводных труб отдела надежности магистральных нефтепроводов и сектором технологии АВР лаборатории техники и технологии АВР института ВНИИСПТнефть.

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

Методика является руководящим документом для организаций, осуществляющих проектирование и эксплуатацию линейной части магистральных трубопроводов.

Методика разработана кандидатами технических наук А.Г.Гумеровым, Н.Ш.Тимербаевым, Х.А.Азметовым, инженером Р.А.Фаткуллиной при участии конструктора Г.И.Лошадкиной и инженера Г.М.Мазина.

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

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Методика выбора рациональных конструктивных решений прокладки трубопроводов с учетом температурного перепада

РД-39-30-613-81

(вводится впервые)

Приказом Министерства нефтяной промышленности от 13 ноября 1981 года № 613

Срок введения установлен с01.01.82.
Срок действия до 01.01.87.

Настоящий руководящий документ распространяется на подземные трубопроводы для транспортирования нефти, нефтепродуктов и газов и устанавливает порядок расчета на прочность, устойчивость стенки трубы и общую устойчивость в продольном направлении криволинейных участков трубопроводов конструктивно выполненных коленом и пригруженных одиночными, сплошными пригрузами, а также на однопролетные переходы, где поворот выполнен коленом, упругим изгибом.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Методика распространяется на линейную часть подземных магистральных трубопроводов.

I.2. Методика разработана в развитие главы СНиП П-45-75 "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования".

I.3. Методика позволяет выполнить расчет на прочность, устойчивость стенки трубы и общую устойчивость трубопроводов в продольном направлении на поворотах в вертикальной плоскости на "выпуклом" рельефе местности, а также открытых однопролетных переходов.

I.4. Методика составлена для подземных трубопроводов, проложенных в глинистых, песчаных и т.п. грунтах и не распространяется на трубопроводы, прокладываемые на болотах, в торфяных и вечномерзлых грунтах.

I.5. Повороты подземных трубопроводов, конструктивно выполненные коленом и упругим изгибом, имеют радиус кривизны колен

I.6. Для снижения перемещений трубопровода применяется пригрузка.

I.7. Пригрузка осуществляется как одиночными, так и сплошными грузами.

I.8. Для трубопроводов, свободных от продольных перемещений, допускается закрепление анкерными устройствами, аналогичными применяемым для закрепления труб против всплытия, в табл. I даны размеры утяжеляющих грузов, взятые по работе [2].

Таблица I

Наружный диаметр трубопровода, м	Внутренний радиус груза, м	Объем груза, м3
I	2	3
	Чугунные кольцевые	
0,325	0,207	0,036
0,530	0,305	0,107
0,720	0,400	0,214
0,820	0,450	0,214
I,020	0,550	0,286
I,220	0,650	0,428
	Железобетонные кольцевые	
0,325	0,205	0,178
0,530	0,305	0,536
0,720	0,400	I,070
	Армобетонные серповидные	
0,325	0,220	0,14
0,530	0,330	0,69
0,720	0,480	I,37
0,820	0,480	I,37
I,020	0,590	I,37
I,220	0,680	I,82
I,420	0,780	2,30

I.9. Расчет трубопроводов на углах поворота на "выпуклом" рельефе местности выполняется по деформациям.

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, просадки и пучения грунта, давление оползающих грунтов.

2.2. Определение нагрузок и воздействий производится в соответствии со СНиП П-45-75 " Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования" и СНиП П-6-74 " Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования".

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

$$\sigma_{кц}^{н} = \frac{PD_{вн}}{2\delta} , \qquad (1)$$

где P – рабочее (нормативное) давление в трубопроводе, МПа;
$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, м;
δ – толщина стенки трубы, м.

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

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

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

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

2.5. При изгибе трубопровода внутреннее давление вызывает появление поперечного распределенного усилия, следствием которого является осевое сжимающее усилие, равное

$$N_{оп} = (1 - 2\mu) P F_{св} , \qquad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала труб (для стали μ =0,3);
$F_{св}$ – площадь сечения трубы в свету, м2, определяемая по формуле

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

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

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

где α – коэффициент линейного расширения материала труб (для стали α = 12.10^{-6} $\frac{1}{°К}$);

E - модуль упругости материала труб (для стали E= 0,2I. .I0^6 МПа) ;

F - площадь стенки поперечного сечения трубы, м2;

Δt - расчетный температурный перепад, т.е. разность между температурой металла труб при укладке и в процессе эксплуатации, ^{o}К.

2.7. Изгиб действующего подземного трубопровода производится фиктивным усилием

$$N_0 = \alpha E F \Delta t + (1-2\mu) P F_{св} \qquad (7)$$

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

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

где ϱ - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, м;

$D_н$ - наружный диаметр трубопровода, м.

2.9. Вес транспортируемой нефти или нефтепродукта в Iм трубопровода q прод.$^{н}/_{м}$ следует определять по формуле

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

где $\gamma_н$ - объемный вес транспортируемой нефти или нефтепродукта, $\frac{н}{м3}$.

2.I0. При поперечных перемещениях подземный трубопровод оказывает силовое воздействие на грунт и испытывает с его стороны реактивное сопротивление.

Сопротивление поперечным вертикальным перемещениям трубопровода определяется по работе [3]

$$q = q_{тр} + q_{гр} = q_{тр} + 0{,}8\Big[\gamma_{гр} D_н (h + 0{,}11 D_н) + \gamma_{гр}(h + 0{,}5 D_н)^2 tg(0{,}7\varphi_{гр}) + \frac{C_{гр}(h + 0{,}5 D_н)}{\cos(0{,}7\varphi_{гр})}\Big], \qquad (I0)$$

где $q_{гр}$ - предельная несущая способность грунтовой засыпки, н/м;

$q_{тр}$ - вес I м трубопровода с продуктом, н/м ;

$\gamma_{гр}$ - расчетный объемный вес грунта засыпки над трубопроводом, н/м3;

$\varphi_{гр}$ - расчетный угол внутреннего трения, рад.;

$C_{гр}$ - расчетное сцепление грунта, МПа ;

h - глубина заложения трубопровода до верха трубы, м;

2.II. Сопротивление продольным перемещениям трубопровода определяется по формуле [3]

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

где Сн – коэффициент, учитывающий образование свода естественного равновесия, определяемый в зависимости от относительной глубины заложения трубопровода по графику на рис.6.

В таблице 2 даны характеристики грунтов по [4]

Таблица 2

Виды грунтов	$\gamma_{гр}$ н/м3	$\varphi_{гр}$ рад.	$C_{гр}$ н/м^2
Песчаные	$1{,}2 \cdot 10^4 \div 1{,}9 \cdot 10^4$	0,349÷0,6631	$0 \div 14 \cdot 10^3$
Глинистые	$1{,}2 \cdot 10^4 \div 1{,}9 \cdot 10^4$	0,262÷0,3839	$2{,}0 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^4$

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

$$\sigma_{пр}^{н} \le \psi_3 \frac{C}{K_н} \cdot R_2^{н}, \qquad (12)$$

где $\sigma_{пр}^{н}$ – максимальные суммарные продольные напряжения, определяемые в соответствии с п.4.6 и п.7.2.8.

ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб, при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{пр}^{н} > 0$), принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{пр}^{н} < 0$), определяемый по формуле:

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\frac{\sigma_{кц}^{н}}{\frac{C}{K_н} \cdot R_2^{н}}\right)^2} - 0{,}5 \frac{\sigma_{кц}^{н}}{\frac{C}{K_н} \cdot R_2^{н}} \qquad (13)$$

где $R_2^{н}$ – нормативное сопротивление металла труб, МПа, принимаемое равным минимальному значению предела текучести по государственным стандартам и техническим условиям на трубы;

С – коэффициент, принимаемый равным I для трубопроводов Ш и IУ категории, 0,85-для I и П категорий и 0,65 – для категорий В.

Категории магистральных трубопроводов принимаются по табл.3

$K_н$ – коэффициент надежности, определяемый по табл. 4.

Таблица 3

Назначение магистрального трубопровода	Категория магистрального трубопровода при подземной прокладке
Для транспортирования природного газа:	
а) диаметром менее I,2м	IУ
б) диаметром I,2м и более	Ш
Для транспортирования нефти и нефтепродуктов:	
а) диаметром менее 0,7 м	IУ
б) диаметром 0,7 м и более	Ш

Таблица 4

Условный диаметр трубопровода, м	Значение коэффициента надежности, Кн			
	Для газопроводов в зависимости от внутреннего давления Р.МПа			Для нефти и нефтепродуктов
	$P \leq 5,5$	$5,5 < P \leq 7,5$	$7,5 < P \leq 10,0$	
0,5 и менее	I,0	I,0	I,0	I,0
0,6 + I,0	I,05	I,05	I,05	I,0
I,2	I,05	I,05	I,I	I,05
I,4	I,05	I,I	I,I5	I,I

3.2. Практика эксплуатации магистральных трубопроводов показывает, что на углах поворота тонкостенные трубы теряют устойчивость при изгибе из-за вмятин в сжатой зоне. Снижает устойчивость стенки трубы отсутствие внутреннего давления при остановке перекачки. Поэтому в зоне, где $\sigma_{пр} < 0$, особенно при отсутствии внутреннего давления, следует производить проверку устойчивости стенки трубы.

3.3. Проверка устойчивости стенки трубы производится из условия:

$$\sigma_{пр}^{н} \leq m \sigma_{кр}, \qquad (14)$$

где $\sigma_{кр}$ - критическое напряжение, н/м2, при котором происходит выпучивание стенки трубы, определяемое по формуле:

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

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

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

$$N \le m N_{кр}, \qquad (16)$$

где N - действующее продольное усилие, Н

$N_{кр}$ - продольное критическое усилие, Н, при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода, определяемое для углов поворота согласно п.п.4.16, 7.2.12.

3.5. На криволинейных участках трубопроводов, при значении продольного сжимающего усилия меньше критического 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 3

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

где V - наибольшие вертикальные перемещения трубопровода, м, определяемые в соответствии с п.4.9 и п.п.7.1.8 ; 7.2.9;

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

при диаметре менее 1 м - 0,8 м;

при диаметре 1 м и более- 1 м;

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

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

Изогнутый участок трубопровода - участок, где происходят поперечные перемещения трубопровода под действием продольных сжимающих усилий. Длина изогнутого участка трубопровода определяется в соответствии с п.4.10 и п.п.7.19; 7.2.10.

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

$$V \le [V] \qquad (18)$$

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

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

$$[V] = m(h - h''). \qquad (19)$$

4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ГРУЗОВ И АНКЕРОВ НА КРИВОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА, ВЫПОЛНЕННОМ КОЛЕНОМ

4.I. На "выпуклом" рельефе местности под действием продольных сжимающих усилий происходят вертикальные поперечные и продольные перемещения трубопровода в сторону угла поворота.

4.2. Максимальные поперечные перемещения и продольные напряжения возникают в середине изогнутого участка, в сечении 00 (см.рис.I).

4.3. С целью уменьшения поперечных перемещений и продольных напряжений применяется пригрузка сплошными и одиночными грузами и закрепление трубопровода анкерами. Методикой подразумеваются общепринятые решения железобетонных и чугунных пригрузов. Для трубопроводов, свободных от продольных перемещений, допускается закрепление анкерными устройствами, аналогичными применяемым для закрепления труб против всплытия (см.рис.5).

4.4. От схемы размещения грузов и анкеров зависят значения продольных напряжений и перемещений трубопровода. Наиболее целесообразно грузы и анкера размещать непосредственно на вершине угла поворота. Имеется предельное расстояние размещения одиночного груза или анкера от поворота. Размещение груза и анкера на расстояние, превышающее предельное, не приводит к снижению перемещений и напряжений.

4.5. Предельное расстояние размещения одиночного груза от поворота определяется по формуле

$$l_{пр.од} = 0{,}4L \qquad (20)$$

4.6. Максимальные предельные напряжения в трубопроводе определяются по формуле

$$\sigma_{пр}'' = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W}, \qquad (21)$$

где N - продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода и определяемое в соответствии с п.4.8. Н;

M - изгибающий момент в середине изогнутого участка, н.м., определяемый в соответствии с п.4.7.;

W - момент сопротивления поперечного сечения трубопровода, м3;

4.7. Наибольший изгибающий момент определяется по формуле

$$M = \omega \sqrt[3]{q(EJ\operatorname{tg}\varphi)^2} \qquad (22)$$

где q - сопротивление поперечным перемещениям трубопровода по п.2.10;

J - момент инерции сечения трубопровода, $м^4$;

φ - половина угла поворота трубопровода, рад., принимаемого по проекту ($0<2\varphi<1{,}5707$ рад.),

ω - безразмерный параметр изгибающего момента, определяемый в соответствии с п.4.12.

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

$$N=\frac{\rho\pi D_{вн}^2}{4}\sqrt[3]{EJ\left(\frac{\kappa q}{tg\varphi}\right)^2}, \qquad (23)$$

где κ - безразмерный параметр сжимающего усилия, определяемый в соответствии с п.4.13.

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

$$V=\tilde{V}\sqrt[3]{\frac{EJ}{q}tg^4\varphi} \qquad (24)$$

где $\tilde{V}$ - безразмерный параметр прогиба, определяемый в соответствии с п.4.14.

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

$$l=\alpha\sqrt[3]{\frac{EJ}{\kappa q}}\cdot tg\varphi, \qquad (25)$$

где α - безразмерный параметр изгиба, определяемый в соответствии с п.4.11.

Параметр α может иметь значения в интервале $0\leq\alpha<4{,}49$.

4.11. Безразмерный параметр изгиба α определяется решением уравнения

$$\beta=\sqrt[3]{\kappa^2}+Z\sqrt{\tilde{V}\left[1+\frac{\alpha^2}{160}\tilde{V}\sqrt[3]{\kappa}\right]}, \qquad (26)$$

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

$$\beta=N_0\sqrt[3]{\frac{1}{EJ}\left(\frac{tg\varphi}{q}\right)^2}, \qquad (27)$$

где N_0 - начальное сжимающее усилие, определяемое по п.2.7

Безразмерный параметр Z определяется по формуле

$$Z=\sqrt{\frac{2\rho}{q}\frac{F}{J}}\cdot tg^3\varphi\cdot\sqrt[3]{\frac{EJ}{q}}tg\varphi, \qquad (28)$$

где ρ - сопротивление продольным перемещениям трубопровода по п.2.II.

4.I2. Безразмерный параметр изгибающего момента определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\frac{1}{\cos\alpha} - 1 - \frac{K}{\alpha_0}\left[\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\cos\alpha} - 1\right] + \frac{1}{\cos\alpha}\left[\nu_0 \sin\alpha + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \nu_1 \sin(\alpha-\alpha_1) + \ldots + \nu_i \sin(\alpha-\alpha_i) + \ldots + \nu_K \sin(\alpha-\alpha_n)\right]\right\}, \quad (29)$$

где α_n - безразмерный параметр длины определяется по формуле

$$\alpha_n = K l_n \quad (30)$$

l_n - расстояние от поворота до местонахождения n-го груза;

α_0 - безразмерный параметр кривой вставки определяется по формуле

$$\alpha_0 = R\sqrt[3]{K\frac{q}{EJ}\cdot tg^2\varphi}. \quad (31)$$

Здесь R - радиус кривизны колена, м

ν_n - безразмерный параметр одиночного груза определяется согласно формуле

$$\nu_n = \frac{P_n}{q}\sqrt{\frac{N^*}{EJ}}, \quad N^* = \sqrt[3]{EJ\left(\frac{Kq}{tg\varphi}\right)^2}, \quad (32)$$

где P_n - вес n-го одиночного груза;

ν_0 - безразмерный параметр одиночного груза, установленного на повороте.

4.I3. Безразмерный параметр сжимающего усилия K определяется по формуле

$$K = \frac{\alpha\left[\alpha - tg\alpha - \nu_0\left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right) - \nu_1\left(\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha} - 1\right) - \ldots - \nu_i\left(\frac{\cos\alpha_i}{\cos\alpha} - 1\right) - \ldots - \nu_n\left(\frac{\cos\alpha_n}{\cos\alpha} - 1\right)\right]}{\alpha_0 + \sin(\alpha-\alpha_0) - tg\alpha\cdot\cos(\alpha-\alpha_0)} \quad (33)$$

4.I4. Безразмерный параметр прогиба $\tilde{V}$ определяется по формуле

$$\tilde{V} = \frac{1}{\sqrt[3]{K}}\left\{\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\alpha_0\cos\alpha}\cdot\frac{1}{\alpha_0} - \alpha + \frac{\alpha_0}{2} + \frac{1}{K}\left(1 + \frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{\cos\alpha}\right) - \right. \quad (34)$$

$$- \frac{\nu_0}{K}\left(\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} - \alpha\right) + \frac{1}{K}\left[\nu_1(\alpha-\alpha_1) + \nu_2(\alpha-\alpha_2) + \ldots + \right.$$

$$\left. + \nu_i(\alpha-\alpha_i) + \ldots + \nu_n(\alpha-\alpha_n)\right] - \frac{1}{K\cdot\cos\alpha}\left[\nu_1\sin(\alpha-\alpha_1) + \right.$$

$$\left.\left. + \nu_2\sin(\alpha-\alpha_2) + \ldots + \nu_i\sin(\alpha-\alpha_i) + \ldots + \nu_n\sin(\alpha-\alpha_n)\right]\right\}$$

4.I5. Характер перемещений подземного трубопровода на углах поворота под действием продольных сжимающих усилий зависит от конструкции угла поворота, геометрических характеристик трубы и характеристик грунта.

4.I6. Начальное сжимающее усилие, приводящее к потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении, определяется по формуле

$$N_{опр} = \beta_{кр} \sqrt[3]{EJ\left(\frac{q}{tg\varphi}\right)^2}, \qquad (35)$$

где $\beta_{кр}$ - безразмерный параметр, равный максимуму кривых зависимостей параметра изгиба α от параметра начального сжимающего усилия β.

Влияние одиночных грузов на напряженно-деформированное состояние трубопроводов можно проследить на конкретном примере. (Приложение 3).

5. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПОВОРОТАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОЛЕНАМИ И ПРИГРУЖЕННЫХ СПЛОШНЫМИ ГРУЗАМИ

5.I. Эффективность использования грузов, для снижения перемещений и напряжений, зависит от длины пригружонного участка и интенсивности пригрузки. Более эффективно увеличение интенсивности сплошной пригрузки в области угла поворота трубопровода. Увеличение только длины пригруженного участка, при постоянной интенсивности пригрузки, мало эффективно. Имеется предельная длина пригруженного участка трубопровода, больше которой практически уменьшение перемещений и напряжений не происходит.

5.2. Предельная длина пригруженного участка трубопровода определяется по формуле

$$l_{пр.сл} = 0{,}75\,l, \qquad (36)$$

где l - длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота, м, определяемая по п. 5.7.

5.3. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе определяются в соответствии с п. 4.6.

5.4. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле (22), где ω определяется в соответствии с п. 5.9.

5.5. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется по формуле (23), где K определяется в соответствии с п.5.I0.

5.6. Максимальные поперечные перемещения трубопровода определяются по формуле (24), где $\sqrt{\ }$ определяется в соответствии с п.5.II.

5.7. Длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота определяется по формуле (25), где α определяется в соответствии с п. 5.8.

5.8. Безразмерный параметр изгиба α определяется по формулам (26), (27), (28).

5.9. Безразмерный параметр изгибающего момента ω определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\frac{1}{\cos\alpha} - 1 - \frac{K}{a_0}\left[\frac{\cos(\alpha-a_0)}{\cos\alpha} - 1\right] + \frac{\delta_1}{\cos\alpha}\left[\cos(\alpha-a_1) - \cos\alpha\right]_+ + \frac{\delta_i}{\cos\alpha}\left[\cos(\alpha-a_i) - \cos\alpha\right]_+ + \frac{\delta_n}{\cos\alpha}\left[\cos(\alpha-a_n) - \cos\alpha\right]\right\}, \quad (37)$$

где δ_n - безразмерный параметр, равный $\delta_n = \frac{q_n}{q}$;

q_n - интенсивность сплошной нагрузки.

5.I0. Безразмерный параметр сжимающего усилия K определяется по формуле

$$K = \frac{\alpha - tg\alpha + \delta_1\left(a_1 - \frac{\sin a_1}{\cos\alpha}\right) + \ldots + \delta_i\left(a_i - \frac{\sin a_i}{\cos\alpha}\right) + \delta_n\left(a_n - \frac{\sin a_n}{\cos\alpha}\right)}{1 + \frac{\sin(a_i - a_0)}{a_0} - tg\alpha\,\frac{\cos(\alpha-a_0)}{a_0}} \quad (38)$$

5.II. Безразмерный параметр прогиба определяется по формуле

$$\sqrt{\ } = \frac{1}{\sqrt[3]{K}}\left\{\frac{\cos(\alpha-a_0)}{a_0\cdot\cos\alpha} - \frac{1}{a_0} - \alpha + \frac{a_0}{2} + \frac{1}{K}\left(1 + \frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{\cos\alpha}\right) - \right.$$
$$- \frac{\delta_1}{K}\left[\frac{a_1^2}{2} - \alpha a_1 - 1 + \frac{\cos(\alpha-a_1)}{\cos\alpha}\right]_+ - \frac{\delta_i}{K}\left[\frac{a_i^2}{2} - \alpha a_i - 1 + \right. \quad (39)$$
$$\left. \left. + \frac{\cos(\alpha-a_i)}{\cos\alpha}\right]_+ - \frac{\delta_n}{K}\left[\frac{a_n^2}{2} - \alpha a_n - 1 + \frac{\cos(\alpha-a_n)}{\cos\alpha}\right]\right\}$$

5.I2. Характер перемещений подземного трубопровода на углах поворота под действием продольных сжимающих усилий зависит от конструкции угла поворота, геометрических характеристик трубы, длины пригруженного участка и интенсивности пригрузки.

5.I3. Начальное критическое сжимающее усилие, при котором происходит потеря общей устойчивости трубопровода в продольном направлении, определяется по формуле (35).

Влияние сплошной нагрузки на напряжения и перемещения трубопровода показано на примере (приложение 3).

6. ВЫБОР СХЕМЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА ОТ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

6.1. С целью увеличения сопротивления продольным перемещениям трубопровода применяется пригрузка утяжеляющими грузами или анкерами (рис. 4.5).

6.2. В зависимости от несущей способности пригрузов определяется необходимое их количество. При установлении нескольких пригрузов, для их равномерного нагружения, трубопровод в местах установки пригрузов должен иметь возможность некоторого продольного перемещения. В местах установки пригрузов, расположенных к повороту, трубопровод должен иметь возможность максимального перемещения. Эти пригрузы должны быть размещены на неизогнутых участках, которые получают продольные смещения.

6.3. Места размещения пригрузов определяют из условия

$$l \leq l_i \leq l + L \qquad (40)$$

где l_i - расстояние от вершины угла поворота до места размещения i го анкера;

l - длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от поворота;

L - длина неизогнутого участка, вдоль которого происходят продольные смещения трубопровода

$$L = \frac{N_0 - T - N^*}{p}, \qquad (41)$$

N_0 - определяется по (7);

N^* - продольное усилие на изогнутом участке трубопровода определяется по формуле (32);

$T = T_1 + T_2 + T_i + T_n$ - суммарная удерживающая способность анкеров, установленных с одной стороны от поворота;

p - сопротивление продольным перемещениям трубопровода по формуле (II).

6.4. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе при закреплении его пригрузами от продольных перемещений определяются в соответствии с формулой (?I).

6.5. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле (22), где ω определяется в соответствии с формулой (48).

6.6. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке, определяется по формуле (23), где K определяется в соответствии с формулой (49).

6.7. Длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота определяется по формуле (25).

6.8. Безразмерный параметр α определяется по формулам (42), (27) и (28).

6.9. Безразмерный параметр начального сжимающего усилия определяется по формуле

$$\beta = \tau + \sqrt[3]{\kappa^2} + Z\sqrt{\bar{V}\left[1 + \frac{\tau^2}{16\alpha}\bar{V}\sqrt[3]{\kappa}\right]}, \qquad (42)$$

где

$$\tau = T\sqrt[3]{\frac{1}{EJ}\left(\frac{tg\varphi}{q}\right)^2}, \qquad (43)$$

κ - определяется в соответствии с формулой (49);

Z - определяется в соответствии с формулой (28);

$\bar{V}$ - определяется в соответствии с формулой (60).

6.10. Продольные перемещения трубопровода в месте размещения анкера определяются по формуле

$$U_i = \frac{qJ}{2pF}\sqrt[3]{\frac{q}{EJ}}\;\frac{1}{tg^4\varphi}\left[\xi_i\left(\beta - \sqrt[3]{\kappa^2} - \tau\right)\right]^2, \qquad (44)$$

где

$$\xi = 1 - \frac{l_i - l}{L}. \qquad (45)$$

6.11. Рассматривается схема закрепления трубопровода от продольных перемещений с равномерным нагружением анкеров, что позволяет осуществить выбор одинаковых анкеров.

6.12. Поскольку удерживающая способность i-го анкера определяется формулой

$$T_i = K_{oi}\,\Phi_i \cdot U_i, \qquad (46)$$

то равномерное нагружение анкеров, т.е. $T_1 = T_2 = \ldots = T_i = T_n$ будет обеспечено, если выполнится условие

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 = \ldots = C_i U_i = C_n U_n \qquad (47)$$

где $C_i = K_{oi}\cdot\Phi_i$ - отпорность грунта;

K_{oi} - коэффициент отпорности грунта;

Φ_i - эффективная ширина подошвы анкера.

Если, например, анкер выполнен в виде кругового кольца вокруг подземной трубы, то Φ_i равен площади этого кольца.

При равенстве коэффициентов отпорности грунта в местах размещения анкеров имеем

$$\Phi_1 U_1 = \Phi_2 U_2 = \ldots = \Phi_i U_i = \ldots = \Phi_n U_n$$

т.е. анкеры, расположенные ближе к повороту, должны иметь меньшую Φ_i, чем остальные.

При равенстве $\Phi_1=\Phi_2=\Phi_3=\ldots=\Phi n$ грунт, в месте расположения ближайшего к повороту анкера, должен иметь меньший K_{oi}, чем у других анкеров.

Из условий (46) и (47) также имеем, что с целью получения большего эффекта (T_i - большего) от анкера, его следует расположить ближе к повороту с соблюдением условия (40).

6.I3. Безразмерный параметр изгибающего момента определяется по формуле

$$\omega=\frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\left(\frac{1}{\cos\alpha}-1\right)-\frac{K}{\alpha_0}\left[\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\cos\alpha}-1\right]\right\}, \quad (48)$$

где α_0 - определяется по формуле (3I),

α - определяется по п.6.9.

6.I4. Безразмерный параметр сжимающего усилия определяется по формуле

$$K=\frac{\alpha-tg\alpha}{1-\frac{\sin(\alpha-\alpha_0)}{\alpha_0}-tg\alpha\,\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\alpha_0}} \quad (49)$$

6.I5. Безразмерный параметр прогиба определяется по формуле

$$\bar{V}=\frac{1}{\sqrt[3]{K}}\left[\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\alpha_0\cos\alpha}-\frac{1}{\alpha_0}-\alpha+\frac{\alpha_0}{2}+\frac{1}{K}\left(1+\frac{\alpha^2}{2}-\frac{1}{\cos\alpha}\right)\right] \quad (50)$$

6.I6. Максимальное поперечное перемещение трубопровода определяется по формуле (24).

6.I7. Начальное критическое сжимающее усилие определяется по формуле (35), где безразмерный параметр $\beta_{кр}$ равен максимуму кривых зависимостей параметра изгиба α от параметра начального сжимающего усилия β.

7. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ОДНОПРОЛЕТНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ

7.I. Однопролетный переход на выпуклом рельефе местности выполнен коленом.

7.I.I. Напряжения и перемещения трубопровода на однопролетных переходах зависят от длины перехода. Имеется критическая длина перехода, при которой напряжения в трубе максимальны для данных условий строительства и эксплуатации.

7.I.2. Формула для определения параметра критической длины перехода при выполнении поворота коленом имеет вид

$$\beta_{кр}=0{,}00171+0{,}3024\alpha+0{,}0236\alpha_0-0{,}023\xi-0{,}0961\alpha^2+0{,}3290\alpha\alpha_0+0{,}0475\alpha_0\xi-0{,}1153\alpha_0^2-0{,}0351\alpha_0\xi+0{,}0047\xi^2, \quad (51)$$

где ξ - безразмерный параметр, определяемый по формуле $\xi = \frac{q_{гр}}{q_{тр}}$,

$q_{гр}$ - предельная несущая способность грунтовой засыпки по п.2.I0,

$q_{тр}$ - вес единицы длины трубопровода с продуктом.

7.I.3. При назначении длины перехода следует учесть выражение (5I). Длина перехода при выполнении поворота коленом должна удовлетворять условию $B < B_{кр}$ или $B > B_{кр}$, где

$$B_{кр} = 2B_{0кр}\sqrt[3]{\frac{EJ}{q_{гр}}\cdot\frac{1}{K}tg\varphi} \qquad (52)$$

7.I.4. Для обеспечения возникновения наименьших напряжений, длину перехода следует принимать из условий

$$B \leq 0{,}4l, \qquad B \geq 0{,}9l,$$

где l - длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота, определяемая по п.7.I.9.

7.I.5. Максимальные продольные напряжения трубопровода определяются в соответствии с п.4.6.

7.I.6. Продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется по формуле

$$N = \frac{P\pi D_{вн}^2}{4} - \sqrt[3]{EJ\left(\frac{Kq_{гр}}{tg\varphi}\right)^2} \qquad (53)$$

7.I.7. Наибольшие изгибающие моменты определяются по формуле

$$M = \omega\sqrt[3]{q_{гр}(EJtg\varphi)^2} \qquad (54)$$

где ω - определяется в соответствии с п.7.I.II.

7.I.8. Максимальные поперечные перемещения трубопровода определяются по формуле

$$V = \tilde{V}\sqrt[3]{\frac{EJ}{q_{гр}}\cdot tg^4\varphi}, \qquad (55)$$

где $\tilde{V}$ - определяется в соответствии с п.7.I.I3.

7.I.9. Длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота определяется по формуле

$$l = \alpha\sqrt[3]{\frac{1}{K}\cdot\frac{EJ}{q_{гр}}\cdot tg\varphi} \qquad (56)$$

7.I.I0. Безразмерный параметр α определяется по формулам (26), (27) и (28).

7.I.II. Безразмерный параметр изгибающего момента определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\left(\frac{1}{\cos\alpha}-1\right)\frac{K}{\alpha_0}\left[\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\cos\alpha}-1\right]+\frac{\xi}{\cos\alpha}\left[1-\cos(\alpha-\alpha_0)\right]\right\}, \qquad (57)$$

где a_0 - определяется по формуле (3I);

$$b_0 = \begin{cases} \frac{kb}{2}, & при\ b < l, \\ a, & при\ b > l, \end{cases} \qquad (58)$$

где b - длина перехода, м;

b_0 - безразмерный параметр длины перехода.

7.I.I2. Безразмерный параметр сжимающего усилия K определяется по формуле

$$K = \frac{\alpha - tg\alpha + \xi\left(\alpha - tg\alpha - b_0 + \frac{\sin b_0}{\cos a_0}\right)}{1 + \frac{\sin(\alpha - a_0)}{a_0} - tg\alpha\,\frac{\cos(\alpha - a_0)}{a_0}} \qquad (59)$$

7.I.I3. Безразмерный параметр прогиба определяется по формуле

$$\bar{v} = \frac{1}{\sqrt{K}}\left[\frac{\cos(\alpha - a_0)}{a_0\cos\alpha} + \frac{a_0}{2} - \frac{1}{a_0}\alpha + \frac{1}{K}\left(1 + \frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{\cos\alpha}\right) + \frac{\xi}{K}\left[\frac{\cos(\alpha - b_0)}{\cos\alpha}\,\frac{1}{\cos\alpha} + \frac{(\alpha - b_0)^2}{2}\right]\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (60)$$

7.I.I4. Начальное критическое сжимающее усилие, приводящее к потере общей устойчивости трубопровода, определяется по п.4.I6.

7.2. Однопролетный переход на "выпуклом" рельефе местности выполнен упругим изгибом.

7.2.I. Рассмотрим однопролетный переход трубопровода, если поворот выполнен упругим изгибом. Критическая длина перехода определяется из выражения

$$b_{опр} = 0{,}25\alpha \qquad (6I)$$

$$b_{пр} = 2b_{опр}\sqrt[4]{A_0\,\frac{EJ}{q_{пр}}\,\frac{1}{K}} \qquad (62)$$

7.2.2. Для обеспечения возникновения наименьших напряжений длину перехода следует принимать из условия

$$b \le 0{,}5l, \quad b \ge 0{,}9l,$$

где l - длина изогнутого участка трубопровода, определяемая по пункту 7.2.I0.

7.2.3. Максимальный изгибающий момент определяется по формуле

$$M = \omega\sqrt{A_0\,EJq_{пр}}, \qquad (63)$$

где ω - безразмерный параметр изгибающего момента, определяемый в соответствии с п. 7.2.4.

A_0 - амплитуда начального прогиба, определяемая в соответствии с п. 7.2.7.

7.2.4. Безразмерный параметр изгибающего момента для упругоискривленных однопролетных переходов определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\frac{1}{\cos\alpha} - 1 + \frac{\pi^2 K}{2(\pi^2 - \alpha_0^2)}\left[\frac{\cos(\pi\frac{a}{a_0})}{\cos\alpha} - 1\right] + \frac{\xi}{\cos\alpha}\left[1 - \cos(\alpha - \beta_0)\right]\right\} \quad (64)$$

при $l \le l_0$, и

$$\omega = \frac{1}{\sqrt[3]{K^2}}\left\{\frac{1}{\cos\alpha} - 1 - \frac{\pi^2 K}{2(\pi^2 - \alpha_0^2)}\left[\frac{\cos(\alpha - \alpha_0)}{\cos\alpha} + 1\right] + \frac{\xi}{\cos\alpha}\left[1 - \cos(\alpha - \beta_0)\right]\right\} \quad (65)$$

при $l > l_0$

где l - длина изогнутого участка трубопровода;

l_0 - длина волны начального прогиба;

α_0 - безразмерный параметр длины волны, определяемый в соответствии с п.7.2.5;

ξ - параметр, определяемый по п. 7.I.2;

β_0 - безразмерный параметр определяется по формуле (58).

7.2.5. Безразмерный параметр длины волны начального упругого прогиба определяется по формуле

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

где l_0 - длина волны начального прогиба, м.

Параметр α_0 может иметь значения в интервале $0 < \alpha_0 < 3{,}14$

7.2.6. Безразмерный параметр сжимающего усилия K определяется по формуле

$$K = \frac{\alpha - tg\alpha + \xi\left\{\alpha - \beta_0 - \sin(\alpha - \beta_0) - tg\alpha\left[1 - \cos(\alpha - \beta_0)\right]\right\}}{\frac{\pi\cos(\pi\frac{a}{a_0})}{2(\pi^2 - \alpha_0^2)}\left[\pi tg\alpha - \alpha_0 tg(\pi\cdot\frac{a}{a_0})\right]} \quad (67)$$

при $l \le l_0$, и

$$K = \frac{\alpha - tg\alpha - \xi\left\{\alpha - \beta_0 - \sin(\alpha - \beta_0) - tg\alpha\left[1 - \cos(\alpha - \beta_0)\right]\right\}}{\frac{\pi^2\cos(\alpha - \alpha_0)}{2(\pi^2 - \alpha_0^2)}\left[tg(\alpha - \alpha_0) - tg\alpha\right]},$$

при $l > l_0$

7.2.7. Зависимость между амплитудой, длиной волны и радиусом кривизны начального упругого прогиба трубопровода определяется по формуле

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

где ρ - радиус кривизны упруго-искривленного участка, м.

7.2.8. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе определяются по формуле

$$\sigma_{пр}^{н} = \frac{N}{F} \pm \left(\frac{M}{W} + \frac{E D_н}{2\rho}\right), \quad (70)$$

где N - продольное усилие, действующее на изогнутом участке трубопровода, определяется согласно формуле

$$N = p\frac{\pi D_{вн}^2}{4} - \sqrt{K\frac{EJ q_{тр}}{A_0}} \quad (71)$$

7.2.9. Максимальные поперечные перемещения определяются по формуле

$$V_{max} = A_0 \cdot \tilde{V} \qquad (72)$$

где $\tilde{V}$ – безразмерный параметр прогиба, определяемый по формуле

$$\tilde{V} = \frac{1}{K}\left(1+\frac{a^2}{2}-\frac{1}{\cos\alpha}\right)+\frac{1}{2}\cos\left(\pi\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)+\frac{\alpha_0^2}{2(\pi^2-\alpha_0^2)}\left[1-\left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^2\right]\times \qquad (73)$$

$$\times\frac{\cos\left(\pi\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)}{\cos\alpha}\Bigg]+\frac{\xi}{K}\left[\frac{\cos(\alpha-\beta_0)}{\cos\alpha}-\frac{1}{\cos\alpha}+\frac{(\alpha-\beta_0)^2}{2}\right], \text{ при } l \le l_0$$

$$\tilde{V} = \frac{1}{K}\left(1+\frac{a^2}{2}-\frac{1}{\cos\alpha}\right)-\frac{1}{2}+\frac{\alpha_0^2}{2(\pi^2-\alpha_0^2)}\left[1-\left(\frac{\pi}{\alpha_0}\right)^2\frac{\cos(\alpha-\alpha_0)}{\cos\alpha}\right]+ \qquad (74)$$

$$+\frac{\xi}{2}\left[\frac{\cos(\alpha-\beta_0)}{\cos\alpha}-\frac{1}{\cos\alpha}+\frac{(\alpha-\beta_0)^2}{2}\right], \text{ при } l > l_0$$

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

$$l = 2\alpha\sqrt{\frac{1}{K}\cdot\frac{EJ}{q_{пр}}\cdot A_0}, \qquad (75)$$

7.2.11. Зависимость между параметрами β и α определяется по формуле

$$\beta = \sqrt{K+Z}\sqrt{\frac{\sqrt[4]{K}}{a}\left[\tilde{V}^2+2\tilde{V}\sin^2\left(\frac{\pi\alpha}{2\alpha_0}\right)\right]}, \text{ при } l \le l_0 \text{ и} \qquad (76)$$

$$\beta = \sqrt{K+Z}\sqrt{\frac{\sqrt[4]{K}}{a}\left[\left(1+\tilde{V}-\tilde{V}_{l_0}\right)^2+\left(1+\tilde{V}\right)^2\frac{\alpha_0}{\alpha}\left(1-\frac{\alpha_0}{\alpha}+\frac{1}{2\pi}\sin\frac{2\pi\alpha_0}{\alpha}\right)-1\right]}$$

$$\text{при } l > l_0 \qquad (77)$$

где $\tilde{V}_{l_0} = \frac{1}{K}\left(1+\frac{a^2}{2}-\frac{\alpha_0^2}{2}-\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}\right)+\frac{\pi^2}{2(\pi^2-\alpha_0^2)}\left[\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}-\right.$

$$\left.-\cos(\alpha-\alpha_0)-1\right]+\frac{\xi}{K}\left[\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}\cos(\alpha-\beta_0)-\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}-\frac{(\alpha-\beta_0)^2}{2}\right]+$$

$$+\frac{\xi^*}{K}\left[1-\frac{(\alpha-\beta_0)^2}{2}-\cos(\alpha-\beta_0)\right], \qquad (78)$$

$$z = \frac{\pi A_0}{4}\sqrt{\frac{2\rho f}{J}\sqrt{\left(\frac{A_0}{q_{тр}}\right)^3 \frac{1}{EJ}}} \qquad (79)$$

$$\xi = \xi^* = \frac{q_{гр}}{q_{тр}}, \qquad (80)$$

$$\beta = N_0\sqrt{\frac{A_0}{EJq_{тр}}}, \qquad (81)$$

$$N_{кр} = \beta_{кр}\sqrt{\frac{EJq_{тр}}{A_0}} \qquad (82)$$

В формуле (78) при $\beta \geq \alpha_0$ принимается $\xi^* = 0$, а при $\beta > 0$, $\xi = 0$

7.2.I2. Начальное критическое сжимающее усилие, при котором происходит потеря общей устойчивости трубопровода в продольном направлении, определяется по формуле (82). Безразмерный параметр $\beta_{кр}$ равен максимуму кривых зависимостей параметра изгиба α от параметра начального сжимающего усилия β.

Влияние длины однопролетного перехода на напряженно-деформированное состояние трубопровода можно проследить на примере (Приложение 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП II-45-75. Нормы проектирования. Магистральные трубопроводы. М., Стройиздат, 1975.

2. Громов А.В., Калинин А.Н., Строительство магистральных трубопроводов.- Киев, 1975.

3. Указания по проектированию и методике расчета магистральных газопроводов из труб ∅ 1420мм.- М. ЦНТИ ВНИИСТа, 1974.

4. Бородавкин П.П., Механика грунтов в трубопроводном строительстве.- М: Недра, 1976.

Приложение I

Порядок расчета трубопровода

II.I.I. Порядок расчета трубопровода, пригруженного одиночными грузами, на "выпуклых" участках при выполнении поворота колином

I). Устанавливаются значения исходных величин
$D_н, \delta, J, F, W, R_2'', K_н, C, m, h'', h, \rho, \Delta t, \varphi, R, q_{тр}, \vartheta_{тр}, \varphi_{тр}, C_{тр}, E, \alpha, \mu, \rho_0, \rho_1, \rho_2 \dots \rho_i \dots \rho_n$;

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

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

4). Вычисляется несущая способность трубопровода по формуле(I2).

5). Вычисляется критическое напряжение при потере устойчивости стенки трубы $\sigma_{пр}$ по формуле (I5).

6). Вычисляется параметр β по формуле (27).

7). Вычисляется параметр Z по формуле (28).

8). Задаемся начальным значением параметра α =0,I.

9) Вычисляется параметр $K = \frac{\sin\alpha - \alpha\cdot\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$

I0). Вычисляется параметр α_0 по формуле (3I).

II). Вычисляются параметры $\nu_0, \nu_1 \dots \nu_2 \dots \nu_i \dots \nu_n$ по формуле (32).

I2). Задаемся параметрами $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_i \dots \alpha_n$ из условия (20) так, что при расстановке по одну сторону от угла поворота n грузов $\alpha_i = i\,\frac{0{,}41\,\ell}{n}$, где i - порядковый номер груза, начиная от угла поворота i = I,2,3...;

I3). Вычисляется параметр K по формуле (33).

I4). Вычисляется параметр $\sqrt{\nu}$ по формуле (34).

I5). Вычисляется параметр β по формуле (26).

I6). Производится проверка по β

Если $\beta - \beta_{const} < 0$, то начальное значение параметра α нужно увеличить на шаг $\Delta\alpha$, т.е. $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$

Если $\beta - \beta_{const} > 0$, то начальное значение безразмерного параметра α нужно уменьшить на шаг $\frac{\Delta\alpha}{2}$, т.е. $\alpha = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$

Расчет по пунктам 8+I6 алгоритма делается до тех пор, пока β и β_{const} не совпадут (погрешность 0,0I). Для дальнейших вычислений принимаем значения параметров $\alpha, \alpha_i, \alpha_0, K, \sqrt{\nu}, \nu_i$, соответствующие моменту совпадения β и β_{const}

I7). Вычисляется начальное критическое сжимающее усилие $N_{кр}$ при потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении по формуле (35).

18). Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода l в одну сторону от угла поворота по формуле (25).

19). Вычисляется расстояние l_i от угла поворота до места размещения $l-a$ груза по формуле (30).

20). Вычисляется параметр ω по формуле (29).

21). Вычисляется максимальное поперечное перемещение трубопровода y по формуле (24).

22). Вычисляется максимальный изгибающий момент M по формуле (22).

23). Вычисляется продольное усилие N по формуле (23).

24). Вычисляются продольные напряжения $\sigma_{пр}''$ по формуле (21).

25). Производится проверка прочности трубопровода из условия (12).

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

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

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

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

II.1.2. Порядок расчета трубопровода, пригруженного сплошной нагрузкой, на выпуклых участках при выполнении поворота коленом

1). Устанавливаются значения исходных величин:

$D_н, \delta, J, F, W, R_2'', K_н, C, m, h'', h, P, \Delta t, \varphi, R, q_{тр}, \gamma_{тр}, \varphi_{тр}, C_{тр}, E, \alpha, \mu, q_1, q_2, \dots q_i \dots q_n$

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

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

4). Вычисляется несущая способность трубопровода по формуле (12)

5). Вычисляется критическое напряжение при потере устойчивости стенки трубы $\sigma_{кр}$ по формуле (15).

6). Вычисляется параметр β по формуле (27).

Эта величина постоянная, равна $\beta const$

7). Вычисляется параметр Z по формуле (28).

8). Задаемся начальным значением параметра $\sigma = 0,1$.

9). Вычисляется параметр $\mu = \frac{\sin\sigma - \sigma\cos\sigma}{1-\cos\sigma}$

10). Вычисляется параметр q_0 по формуле (31).

11). Вычисляются параметры $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_i \dots \delta_n$ по пункту 5.9.

12). Задаемся параметрами $q_1, q_2 \dots q_i \dots q_n$ из условия (36) так, что при расположении на изогнутом участке n сплошных грузов, начиная от угла поворота, $q_i = i \frac{0{,}75q}{n}$, где i - порядковый номер сплошного груза, начиная от угла поворота.

13). Вычисляется параметр K по формуле (38).

14). Вычисляется параметр V по формуле (39).

15). Вычисляется параметр β по формуле (26).

16). Производится проверка по β.

Если $\beta - \beta const < 0$, то начальное значение параметра q нужно увеличить на шаг Δq, т.е. $q = q + \Delta q$

Если $\beta - \beta const > 0$, то начальное значение безразмерного параметра q нужно уменьшить на шаг $\frac{\Delta q}{2}$, т.е. $q = q - \frac{\Delta q}{2}$

Расчет по пунктам 8÷16 алгоритма делается до тех пор, пока β и $\beta const$ не совпадут (погрешность 0,01). Для дальнейших вычислений принимаем значения параметров q, q_i, q_0, K, V, V_1 соответствующие моменту совпадения β и $\beta const$

17). Вычисляется начальное критическое сжимающее усилие $N_{кр}$ при потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении по формуле (35).

18). Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода l в одну сторону от угла поворота по формуле (25).

19). Вычисляется длина l_i сплошной нагрузки q_i от угла поворота по формуле (30).

20). Вычисляется параметр ω по формуле (37).

21). Вычисляется максимальное поперечное перемещение трубопровода V по формуле (24).

22). Вычисляется максимальный изгибающий момент M по формуле (22).

23). Вычисляется продольное усилие N по формуле (23).

24). Вычисляются продольные напряжения $\sigma_{пр}^{II}$ по формуле (21).

25). Производится проверка прочности трубопровода из условия (12).

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

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

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

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

П.I.3.Порядок расчета трубопровода, закрепленного от продольных перемещений, на "выпуклых" участках при выполнении поворота коленом

I). Устанавливаются значения исходных величин:

$D_н, \delta, J, F, W, R_2'', K_н, C, m, h'', h, \rho, \Delta t, \varphi, R, q_{тр}, \gamma_{тр},$

$\varphi_{тр}, C_{тр}, E, \alpha, \mu, K_{o1}, K_{o2}...K_{oi}...K_{on}, \Phi_1, \Phi_2...\Phi_i...\Phi_n, T_1, T_2...T_i...T_n$

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

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

4). Вычисляется несущая способность трубопровода по формуле(I2)

5). Вычисляется критическое напряжение $\sigma_{кр}$ по формуле (I5).

6). Вычисление параметра β по формуле (27).
Эта величина постоянная, равна $\beta const$

7). Вычисляется параметр Z по формуле (28).

8). Вычисляется суммарная удерживающая способность анкеров по пункту 6.6.

9). Вычисляется продольное усилие N^* по п.4.I2.

I0). Вычисляется длина неизогнутого перемещающегося участка L по формуле (4I).

II). Вычисляется величина C по формуле (43).

I2). Задаемся начальным значением параметра α =0,I.

I3). Вычисляется параметр $K = \frac{\sin\alpha - \alpha\cdot\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$

I4). Вычисляется параметр Q_0 по формуле (3I).

I5). Вычисляется параметр K по формуле (49).

I6). Вычисляется параметр $\sqrt{}$ по формуле (50).

I7). Вычисляется параметр β по формуле (42).

I8). Производится проверка по β

Если $\beta - \beta const < 0$, то начальное значение параметра α нужно увеличить на шаг $\Delta\alpha$, т.е. $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$

Если $\beta - \beta const > 0$, то начальное значение безразмерного параметра α нужно уменьшить на шаг $\frac{\Delta\alpha}{2}$, т.е. $\alpha - \alpha = \frac{\Delta\alpha}{2}$

Расчет по пунктам I0+I7 алгоритма делается до тех пор, пока β и $\beta const$ не совпадут (погрешность 0,0I).

Для дальнейших вычислений принимаем значения параметров $\alpha, \eta, \sqrt{}$ соответствующие моменту совпадения β и $\beta const$

19) Вычисляется начальное критическое сжимающее усилие $N_{окр}$ при потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении по формуле (35).
20) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода l в одну сторону от угла поворота по формуле (25).
21) Вычисляется продольное перемещение трубопровода U_i в месте расположения i-го анкера по формуле (44).
22) Вычисляется параметр ξ по формуле (45).
23) Вычисляется $l_1, l_2, \ldots l_i \ldots l_n$ по формуле (45) с учетом условия (40).
24) Вычисляется параметр ω по формуле (48).
25) Вычисляется максимальное поперечное перемещение V по формуле (24).
26) Вычисляется максимальный изгибающий момент М по формуле (22).
27) Вычисляется продольное усилие N по формуле (23).
28) Вычисляются продольные напряжения $\sigma''_{пр}$ по формуле (21).
29) Производится проверка прочности трубопровода из условия (12)
30) Производится проверка устойчивости стенки трубы из условия (14).
31) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (18).
32) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении из условия (16).
33) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы, общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

П.1.4. Порядок расчета однопролетных переходов трубопровода на "выпуклых" участках, где поворот выполнен в виде колена

1) Устанавливаются значения исходных величин :

$$D_н, \delta, J, F, W, R''_г, K_н, C, m, h'', h, P, \Delta t, \varphi, R, q_{тр}, \gamma_{тр}, \varphi_{тр}, C_{тр}, E, \alpha, \mu, b$$

2) Вычисляется начальное усилие N_0 по формуле (7)
3) Вычисляется сопротивление поперечным q и продольным p перемещениям трубопровода по формулам (10), (11).
4) Вычисляется несущая способность трубопровода по формуле (12).
5) Вычисляется критическое напряжение при потере устойчивости стенки трубы $\sigma_{кр}$ по формуле (15).
6) Вычисляется параметр β по формуле (27).
Эта величина постоянная, равная $\beta const$.

7) Вычисляется параметр Z по формуле (28).
8) Задаемся первоначальным значением параметра α =0,I.
9) Вычисляется параметр $K = \frac{Sin\alpha - \alpha cos\alpha}{1-cos\alpha}$
I0) Вычисляется параметр α_0 по формуле (3I).
II) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода ℓ в одну сторону от угла поворота по формуле (56).
I2) Вычисляется параметр β_0 по формуле (58).
I3) Вычисляется предельная несущая способность грунта $q_{гр}$ по пункту 2.I0.
I4) Вычисляется параметр ξ по пункту 7.I.2.
I5) Вычисляется параметр μ по формуле (59).
I6) Вычисляется параметр $\sqrt{}$ по формуле (60).
I7) Вычисляется параметр β по формуле (26).
I8) Производится проверка по β
Если $\beta - \beta const < 0$, то начальное значение параметра "а" нужно увеличить на шаг $\Delta\alpha$, т.е. $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$
Если $\beta - \beta_{const} > 0$, то начальное значение безразмерного параметра "а" нужно уменьшить на шаг $\frac{\Delta\alpha}{2}$, т.е. $\alpha = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$
Расчет по пунктам 8÷I8 алгоритма делается до тех пор, пока β и $\beta const$ не совпадут (погрешность 0,0I).
Для дальнейших вычислений принимаются значения параметров $\alpha, \alpha_0, \beta_0, \mu, \sqrt{}$, соответствующие моменту совпадения β и $\beta const$
I9) Вычисляется начальное критическое сжимающее усилие $N_{кр}$.
При потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении по пункту 7.I.I4.
20) Вычисляется окончательная длина изогнутого участка трубопровода ℓ в одну сторону от угла поворота по формуле (56).
2I) Производится проверка оптимальности длины перехода ℓ из условия п.7.I.4.
22) Вычисляется параметр ω по формуле (57).
23) Вычисляется максимальное поперечное перемещение трубопровода V по формуле (55).
24) Вычисляется максимальный изгибающий момент M по формуле (54)
25) Вычисляется продольное усилие N по формуле (53).
26) Вычисляются продольные напряжения σ''_3 по формуле (2I).
27) Производится проверка прочности трубопровода из условия (I2).
28) Производится проверка устойчивости стенки трубы из условия (I4)
29) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (I8).

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

3I) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы, общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

П.I.5. Порядок расчета однопролетных переходов трубопровода на "выпуклых" участках, где поворот выполнен упругим изгибом.

1) Устанавливаются значения исходных величин:
$D_н, \delta, J, F, W, R_2'', K'', C, m, h'', h, \rho, \Delta t, P, Q, l_0, q_{гр}, \gamma_{гр}, \varphi_{гр}, C_{гр}, E, \sigma_{...}, \beta$
2) Вычисляется начальное значение N_0 по формуле (7).
3) Вычисляются сопротивления поперечным q и продольным ρ перемещениям трубопровода по формулам (I0), (II).
4) Вычисляется несущая способность трубопровода по формуле (I2).
5) Вычисляется критическое напряжение при потере устойчивости стенки трубы $\sigma_{кр}$ по формуле (I5).
6) Вычисляется амплитуда A_0 начального упругого прогиба трубопровода по формуле (60).
7) Вычисляется параметр β по формуле (8I).
8) Вычисляется параметр Z по формуле (79).
9) Задаемся начальным значением параметра α =0,I
I0) Вычисляется параметр $K = \frac{\sin\alpha - \alpha\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$
II) Вычисляется параметр α_0 по формуле (66).
I2) Вычисляется длина изогнутого участка трубопровода в одну сторону от угла поворота по формуле (75).
I3) Вычисляется параметр β_0 по формуле (58).
I4) Вычисляется предельная несущая способность грунта $q_{гр}$ по пункту 2.I0.
I5) Вычисляется параметр ξ по пункту 7.I.2.
I6) Вычисляется параметр K по пункту 7.2.6.
I7) Вычисляется параметр $\sqrt{\ }$ по пункту 7.2.9.
I8) Вычисляется параметр β по пункту 7.2.II.
I9) Производится проверка по β
Если $\beta - \beta_{const} < 0$, то начальное значение безразмерного параметра α нужно увеличить на шаг $\Delta\alpha$, т.е. $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$
Если $\beta - \beta_{const} > 0$, то начальное значение безразмерного параметра α нужно уменьшить на шаг $\frac{\Delta\alpha}{2}$, т.е. $\alpha = \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}$

Расчет по пунктам 8÷I9 алгоритма делается до тех пор, пока β $\beta const$ не совпадут (погрешность 0,0I).

Для дальнейших вычислений принимаем значения параметров $a, a_0, b_0, n, \bar{V}$, соответствующие моменту совпадения β и $\beta const$

20) Вычисляется начальное критическое сжимающее усилие $N_{кр}$ при потере общей устойчивости трубопровода в продольном направлении по формуле (82).
21) Вычисляется окончательная длина изогнутого участка трубопровода ℓ по формуле (75).
22) Производится проверка оптимальности длины перехода ℓ из условия п.7.2.2.
23) Вычисляется параметр ω по пункту 7.2.4.
24) Вычисляется максимальное поперечное перемещение трубопровода V по формуле (72).
25) Вычисляется максимальный изгибающий момент M по формуле (63).
26) Вычисляется продольное усилие N по формуле (7I).
27) Вычисляются продольные напряжения $\sigma''_{пр}$ по формуле(70).
28) Производится проверка прочности трубопровода из условия (I2).
29) Производится проверка устойчивости стенки трубы из условия (I4)
30) Производится проверка поперечного перемещения трубопровода из условия (I8)
31) Производится проверка общей устойчивости трубопровода в продольном направлении из условия (I6).
32) По результатам проверок делается заключение о прочности, устойчивости стенки трубы, общей устойчивости трубопровода в продольном направлении.

Приложение 2

Расчет трубопровода на ЭЦВМ "Наири-2"

П.2.I. Программа решения задачи записывается на алгоритмическом языке и в такой записи вводится в машину

П.2.2. Для обозначения величин на машине имеется специальный алфавит букв. Поэтому условные обозначения, используемые в Методике, заменяются буквами, используемыми на машине:

$D_{вн}-\Phi$; $\delta-\delta$; $J-U$; $W-ш$; $F-r$; $p-q$; $\Delta t-t$; $R_2^н-M_1$; $K_н-M_2$; $C-M_3$; $h^н-ц_1$; $h-ц_2$; $q_{тр}-Л_1$; $\varphi-f$; $R-r$; $m-m$; $\gamma_{гр}-Л_2$; $\varphi_{гр}-Л_3$; $C_{гр}-C_2$; $a-a$; P_0-P_0; $P_1-P_1, \ldots P_n-P_n$; $N_0-\pi_1$; $q-y$; $C_н-З$; $p-p$;

β (определяемый по формуле (27) -; b_1

β (определяемый через безразмерные параметры aa_0) - b_2; $Z-Z$; $K-x$; $\tilde{V}-\acute{U}$; a_0-a; $\omega-ж$; $\sigma_{пр}-б$; $V-н$; $l_{пр.од}-C_3$; $l_{пр.сп.}-Ц_3$; $\Phi_1-\Phi_1$; $\Phi_2-\Phi_2 \ldots \Phi_n-\Phi_n$; q_1-g_1; $q_2-g_2 \ldots q_n-g_n$

l_1-l_1; $l_2-l_2 \ldots l_n-l_n$; $N-\pi_2$; $L-L$; ξ_2-e_1; $\xi_2-e_2 \ldots \xi_n-e_n$; U_1-U_1; U_2-U_2; $\ldots U_n-U_n$; $b-b$; b_0-b_0; $q_{гр}-y_1$; $l-l$; l_0-l_0; $N^к-\pi_3$; A_0-H_3; $\tilde{V}l_0-U_3$; $\rho-r_2$; $(\Psi R_2)H_2$; $[V]-H_2$; $\sigma_{пр}^н-H_1$; $T-\pi_4$; ν_0-b_0; ν_0-b_0; ν_1-b_1, ν_n b_n; a_1-a_1; $a_2-a_2 \ldots a_n-a_n$; $\delta_1-\delta_1$; $\delta_2-\delta_2 \ldots \delta_n-\delta_n$; T_1-m_1; T_2-m_2; $\ldots T_n-m_n$; $K_{01}-K_1$; $K_{02}-K_2$; $K_{0n}-K_n$

Также при составлении программы для обозначения типа грунта используются буквы $ш$ и S. При песчаном грунте обозначено S =I и $ш$ =0, а при глинистом S =0 и $ш$=I.

П.2.3. Для составления программ расчета трубопроводов на прочность, устойчивость стенки трубы и общую устойчивость в продольном направлении вводятся следующие, общие для всех вариантов исходные данные:

Φ; δ; U; r; $ш$; m_1; M_2; M_3; m; $ц_1$; $ц_2$; g; t; $Л_1$; $Л_2$; $Л_3$; . C_2, f; S; $ш$

Кроме того вводятся :

1) для программы расчета поворота трубопровода, оформленного коленом и пригруженного одиночными грузами

P_0; $P_1 \ldots P_i \ldots P_n$; r_1

2) для программы расчета поворота трубопровода, оформленного коленом и пригруженного сплошными нагрузками

q_1; q_2; $\ldots q_i \ldots q_n$; r_1

3) для программы расчета поворота трубопровода, оформленного коленом и закрепленного от продольных перемещений.

m_1; $m_2, \ldots m_i \ldots m_n$; l_1 $l_2 \ldots l_i \ldots l_n$; $K_1 K_2 \ldots K_i \ldots K_n$; $\Phi_1, \Phi_2 \ldots \Phi_i \ldots \Phi_n$

4) для программы расчета однопролетного перехода трубопровода, если поворот выполнен коленом

$r_1; \beta$

5) для программы расчета однопролетного перехода трубопровода, если поворот выполнен упругим изгибом

$r_2; \beta; l_0$

П.2.4. Аргументы функции вводятся в машину только в радианах. Поэтому аргументы функции, заданные в градусах, переводятся в радианную меру. Исходные данные вводятся в машину в м., н,рад.

П.2.5. На печать выводятся значения суммарных продольных напряжений $\sigma_{пр}$, максимальных поперечных перемещений трубопровода V_{max} и несущей способности трубопровода $\psi_3 R_2$. Также для контроля печатаются значения $N_0; Q; P$

П.2.6. По полученным результатам $\sigma_{пр}; V$ делается заключение о прочности и устойчивости криволинейного участка трубопровода.

П.2.7. Рабочая программа и инструкция для машины типа "ЭВМ ЕС-1022" оформлены отдельно и находятся в ВЦ института ВНИИСПТнефть.

Приложение 3

Примеры расчета трубопровода на прочность и устойчивость и выбора рациональных конструктивных решений

Пример I.

Нефтепровод диаметром I,02 м и толщиной стенки $I,I.10^{-2}$ м уложен в песчаном грунте на глубине I м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости на выпуклом рельефе местности, равный 0,262 рад. Поворот выполнен коленом с радиусом 40 м. Внутреннее давление в трубопроводе равно 5 Мпа, а температурный перепад составляет 60°К. Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны 4439.10^{-6} м^4, 8704.10^{-6} м^3 и 349.10^{-4} м2.
Вес трубы с продуктом 10^4 н/м.
Предел текучести материала трубы - 360 Мпа.
Характеристики грунта: объемный вес $\gamma = I,2.10^4$ н/м^3, расчетный угол внутреннего трения $\varphi = 0,4$ рад и расчетное сцепление С=0. Согласно п.3.I имеем С=I, Кн= I. Согласно п.3.3 имеем m=0,9.
Выполнить расчет на прочность и устойчивость и выбор рациональной конструкции размещения одиночного груза.

I. Поворот выполнен холодногнутым коленом.

По формуле (7) начальное сжимающее усилие

$$N_0 = 6841400\,н\ ;\ где\quad F_{св} = \frac{\pi D_{вн}^2}{4} = 0,782\,м^2;$$

Согласно (I0) и (II)

$$q = 27210\,\frac{н}{м}\ ;\quad p = 16250\,\frac{н}{м}\ ;$$

По графику на рис. 6 для $\frac{h}{D_н} = 0,99$ и для песчаного грунта находим $C_н = 0.420$

По формуле (I3)

$$\psi = \sqrt{1 - 0,75\left(\frac{226,8}{360,0}\right)^2} - 0,5\,\frac{226,8}{360,0} = 0,597\ ;\ \sigma_{кц}^{н} = 226,8\,мПа$$

Несущая способность трубопровода по (I2)

$$\psi\,\frac{C}{K_н}\cdot R_2^{н} = 215\,мПа$$

По формуле (I5)

$$\sigma_{пр} = 338,4\,мПа$$

По формулам (27) и 23) $\beta = 2,0034\ ;\ Z = 2,3429$

Согласно алгоритма П.I.I. определяем значение безразмерного параметра : Q

$$Q = 1,84$$

Согласно алгоритма П.I.I. определяется параметр

K = I,I702

Параметр Q_0 по формуле (3I)

Q_0 = 0,0335I.

По формуле (33) при $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = \ldots \gamma_i = \gamma_n = 0$ т.е. трубопровод выполнен коленом, но без пригрузки К= I,I703. Тогда Q_0 =0,3360.

По формулам (29) и (34) находим ω=0,3849 и γ = 0,I379.

По формулам (22) и (23) находим

М= 285839,6 нм

N = - II8660н

По формуле (2I) продольные сжимающие напряжения

$\sigma''_{пр}$ = -33I,8 Мпа

Продольные растягивающие напряжения $\sigma''_{пр}$ = 325 Мпа.

Имеем 33I,8 > 2I5,0, т.е. условие (I2) не выполняется и прочность трубопровода не обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена, т.к. условие (I4) не выполняется : 33I,8 > 0,9.338,4, т.е. 33I,8 > 304,3 МПа

По формуле (24)

γ = 0,3м

С целью снижения продольных напряжений следует использовать пригрузку, уменьшить величину угла поворота или увеличить глубину заложения трубопровода.

Определяем длину изогнутого участка по формуле (25)

L = 29м.

2. Найдем необходимый вес одиночного груза из условия обеспечения прочности поворота.

2а) груз расположен на повороте

Примем γ_0 =0,2. Найдем при β =2 и ω_0=0,2, ω=0,285 и

K = I,4II

По формулам (23), (22) и (2I) находим :

N =383900н, M=365923,2 нм, σпр.= 254,3 МПа.

Таким образом, при расположении одиночного груза на повороте при γ_0 =0,2, прочность не обеспечивается, так как 254,3 > 2I5,0МП

Примем γ_0=0,4

при β =2 и γ_0=0,4 найдем ω=0,2263, К= I,56I.

По формулам (23), (22) и (21) находим:
N =684040н, M=I68I4I9,6н.м., σпр.=2I2,7МПа
при γ_0 =0,4 имеется запас прочности.

Найдем необходимый вес груза по формуле (32).

P= I60000н

2б) расположим груз на расстоянии 0,33 l при γ_1 =I,5.
при β =2 и γ_1=I,5 найдем ω=0,I89I, K= 2,I897.

По формулам (23), (22) и (2I) находим:
N =I849700н, M= I404664,2 н.м., σпр.= 2I4,3 МПа,
при γ_1 =I,5 и при расположении груза на расстоянии 0,33 l имеется запас прочности.

Найдем необходимый вес груза по формуле (32):

P= 5I0000н

Длину изогнутого участка определим по формуле (25)

l = I5,78м.

Определим расстояние, на котором расположен груз P_I :

l_1=0,33 · l= 0,33.I5.78 = 5,2Iм.

2) расположим груз на расстоянии 0,67 l при γ_1=3,0
При β =2 и γ_1=3, найдем ω=0,I746 K= 2,3454

По формулам (23), (22) и (2I) найдем:
N=2II8430н, M= I296896,0 н.м., σпр. =209,7 МПа
при γ_1 =3 имеется запас прочности.

Находим необходимый вес груза по формуле (32)

P= $I0^6$н.

Найдем длину изогнутого участка по формуле (25).

l= 9,89м

Найдем расстояние, на котором расположен груз P_I:

l_1= 0,67·l =0,67.9,89 = 6,626 м

Таким образом, пригрузка в I6.$I0^4$н, расположенная на повороте, обеспечивает прочность и устойчивость заданного трубопровода. Если пригрузку расположить на расстоянии I5м от поворота, то потребуется груз в 5I.$I0^4$ н для обеспечения прочности заданного трубопровода.

Программа расчета и номограммы для иллюстрации изменения напряжений и перемещений даны в Приложениях 2 и 3.

3. Поворот выполнен гнутым коленом и пригружен сплошной нагрузкой.

3а) сплошной груз расположен вблизи поворота.
Интенсивность сплошного груза $q = \delta\gamma - 1$ По формулам (26), (37) и (38), (39) находим при γ_β =2, и ζ=2,34, σ =I,85, ω 0,3858 K=I,I7 $\bar{\nu}$=0,I384.

По формулам (23), (22) и (2I) находим
N =II5I70H, M=2865777,6 н.м., $\sigma_{пр.}$= 559,4 МПа
имеем $\sigma_{пр.} > R_2$, т.е. прочность поворота не обеспечена.

3б) поворот выполнен гнутым коленом и пригружен сплошной нагрузкой с интенсивностью $\delta_1 = \frac{q_1}{q} = 1$ на расстоянии 0,I5 l.

По формулам (26), (37), (38), (39), (23), (22), (2I) находим
α=I,46 ω=0,2492, K= I,83, $\sqrt{\ }$=0,0434.
N=I24244 0H, M= I850942,0 н.м., $\sigma_{пр.}$ =399,I МПа.
Имеем $\sigma_{пр.} > R_2$, т.е. прочность поворота не обеспечена.

3в) поворот пригружен сплошными грузами с интенсивностью $\delta_1 = \frac{q_1}{q} = 1$ на участке I,5 l и с интенсивностью $\delta_2 = \frac{q_2}{q} = 1$ на всем изогнутом участке, тогда:
ω=0,I449, $\sqrt{\ }$=0,0I49, K= 2,24 Q=I,II N=I947420H,
M= I076448,8 н.м., $\sigma_{пр.}$= 267,2 МПа.
Имеем $\sigma_{пр.} < \psi_3 \frac{C}{K_н} \cdot R_2^н$, т.е. прочность поворота обеспечена.

3г) на повороте – два сплошных груза, оба с интенсивностью $\delta_1 = \delta_2 = \frac{q_1}{q} = \frac{q_2}{q_н} = 1$ и оба расположены на всем изогнутом участке. Тогда по формулам (26), (37), (38), (39), (23), (22), (2I) находим
ω=0,I44, Q=I,08 K= 2,25, $\sqrt{\ }$=0,0I45.
N= I957890H, M= I069829,2 н.м., $\sigma_{пр.}$ =266,0 МПа.

По формулам (I5) и (I4)
$\sigma_{кр.}$= 304,6 МПа
Таким образом, устойчивость стенки трубы обеспечена, так как 266,0 < 0,9304,6 МПа.

Прочность трубопровода не обеспечена, так как $\sigma_{пр}^н > \psi_3 \frac{C}{K_н} R_2^н$, т.е. 266,0 > 215,0 МПа.

Из расчетов видно, что сплошная нагрузка с интенсивностью δ_1=I, расположенная на расстоянии 0,I5 l не обеспечивает прочность и устойчивость данного трубопровода. Для обеспечения прочности следует выбрать нагрузку с интенсивностью δ_1=I и расположить ее на расстоянии I,5 l и нагрузку с интенсивностью δ_2=I на всем изогнутом участке.

Пример 2.

Нефтепровод диаметром I,02 м и толщиной стенки 0,I2 м заложен в сухом песчаном грунте на глубине I,0 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет угол поворота в вертикальной плоскости, равный 0,2I рад и выполнен с помощью кривой вставки радиусом 40 м. Внутреннее давление в трубопроводе равно 4,0 МПа, а температурный перепад составляет 60°К. Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубопровода соответственно равны 4828.I0^{-6}м^4, 0467.I0-6 м3, 380.I0-4м2.

Вес трубы с продуктом 10^4 н/м. Предел текучести материала трубы = $\sigma_т$ = 360,0 МПа.

Характеристика грунта: объемный вес γ гр= I,8.10^4н/м3, расчетный угол внутреннего трения φ гр.= 0,52 рад., расчетное сцепление с=0. Коэффициент перегрузки рабочего давления n= I,I5. Согласно п. 3,I имеем с=I, Кн= I. Согласно п.3,3. имеем m=0,9.

Выполним расчет для различных способов оформления поворота трубопровода.

I. Поворот выполнен холодногнутым коленом.

По формуле (7) получим начальное сжимающее усилие

N_0= 6992210н

Здесь $F_{св} = \frac{\pi D^2_{вн}}{4} = 0,9467\ м^2$;

Согласно (I0) и (II) найдем q =43240 н/м, ρ=36240 н/м.

По графику на рис. 6 для $\frac{h}{D_н}$ = 0,82 и для песчаного грунта находим Сн= 0,375.

По формуле (I3)

$$\psi_3 = \sqrt{I - 0,75\left(\frac{I66,0}{360,0}\right)^2} - 0,5\,\frac{I66,0}{360,0} = 0,6862.$$

Здесь $\sigma^н_{нц}$ = I66,0 МПа.

Несущая способность трубопровода по (I2)

$$\psi_3 \frac{C}{K_н} \cdot R^н_2 = 0,686.360,0 = 246,9\ МПа$$

По формуле (I5)

$\sigma_{нр}$= 34I,4 МПа

По формулам (27) и (28)

β = I,25

ζ = I,67

Согласно алгоритма П.I.3 определяем Q, K; σ = I,09 при $Q_0 = 0$; $\nu_0 = 0$, получим К= 0,97, т.е. для случая выполнения поворота круглозагнутым или сварным коленом.

Параметр Q_0 по формуле (3I)

Q_0 =0,3

При β =I,25 и Q_0 =0,3 находим Q =I,08. По формуле (33) найдем К= 0,98. При новом приближении имеем Q =I,09, К= 0,98, Q_0=0,3I. Разность между предыдущим и последующим значениями менее 0,0I и поэтому приближение заканчиваем. По формулам (29) и (34) находим ω =0,I473 и $\bar{V}$= 0,023I.

По формулам (22) и (23) находим

M =II57621,I н.м. N = -2366270н.

По формуле (2I) продольные сжимающие напряжения будут :

$\sigma_{пр.}$ = 60 МПа

Имеем 60,0 < 246,9 МПа, т.е. условие (I2) выполняется и прочность трубопровода обеспечена.

По формуле (24)

V = 0,03м

Определим длину изогнутого участка по формуле (25)

ℓ = I4.78 м.

2. Рассмотрим деформацию этого же трубопровода, если он имеет однопролетный переход и поворот на этом переходе, выполненный гнутым коленом с радиусом 40 м и находится под действием продольных сжимающих усилий. Сопротивление поперечным перемещениям на вскрытом участке предлагается равным весу трубы с продуктом, $q_{тр}$ =I0^4н/м, а на подземных участках - весу трубы и предельной несущей способности грунтовой засыпки

$$q_{гр} = q - q_{тр} = 33240 \text{ н/м}$$

Длина однопролетного перехода β =3,6Iм.

По формулам (57), (60), (59), (26), (27),(28) и (3I) найдем: a_o=0,2I, β=3,5678, Z=5,66, ω= -0,5I35 $\sqrt{}$=0,I47I. К= I,5 α=I,88.

По формулам (23), (22) и (2I) находим усилие N=367I20н, М=2485889,9 н.м., $\sigma_{пр.}$= 253,0 МПа.

Таким образом, при длине однопролетного перехода 3,6Iм напряжение равно σ=253,0 МПа, т.е. прочность не обеспечивается 253,0 >246,9МПа.

Возьмем длину однопролетного перехода, равную β=II,09м. Тогда определим ω=0,5I92, $\sqrt{}$=0,I587, К= I,37, α=I,87, a_o=0,2I, β=2,5678, Z=5,66 N=520600н, М= 25I3488,5 н.м., $\sigma_{пр.}$= 25I,8МПа. Таким образом, прочность при длине однопролетного перехода β=II,09 м. не обеспечивается, т.к. 25I,8>246,9 МПа. Увеличим длину перехода, положив β=I8,95 м., тогда ω=0,5064, $\sqrt{}$=0,I65I, К= I,28 α=I,87, a_o= 0,2 β=3,5678, N=64600 он., М= 245I953,0 н.м., $\sigma_{пр.}$=24I,9 МПа, Z=5,66, $\omega_{кр.}$= 0,I723.

Из расчетов видно, что при длине перехода β=3,5м, IIм, I9м напряжение соответственно уменьшается $\sigma_{пр.}$= 253МПа, 25IМПа, 24IМПа. Таким образом, для обеспечения прочности и устойчивости заданного трубопровода, необходимо длину перехода выбрать β=I9м, что соответствует напряжению $\sigma_{пр.}$= 24I МПа

Программа расчета и номограммы изменения напряжений и перемещений даны в Приложениях 2 и 3.

Пример 3. Нефтепровод диаметром 0,82 м и толщиной стенки 1.10^{-2} м уложен в песчаном грунте на глубине 0,8 м от верхней образующей трубы. Трубопровод имеет однопролетный переход длиной 0,5 м. Переход выполнен упругим изгибом, начальная длина волны выпучивания которого 100м и радиус кривизны 600м. Внутреннее давление в трубопроводе равно 4,0 МПа, а температурный перепад составляет $120^{\circ}K$. Момент инерции, момент сопротивления и площадь сечения трубы соответственно равны 2088.10^{-6} м4, 5092.10^{-6} м3 и 254.10^{-4} м2. Площадь сечения трубы в свету $F_{св}$ = $=5027.10^{-4}$ м2. Вес трубы с продуктом 6.10 н/м. Предел текучести материала труб $\sigma_т$ =420,0 МПа. Характеристика грунта: объемный вес $\gamma_{пр.}$= $1,8.10^{-4}$ н/м3, расчетный угол внутреннего трения $\varphi_{гр.}$= = 0,52 рад., расчетное сцепление Сгр.=0. Коэффициент перегрузки рабочего давления n= 1,15.

Для участков III категории m = 0,90, $\sigma_{тек.}$= 320,0 МПа.

По формуле (7) начальное сжимающее усилие

N_3= 8485210н.

Согласно (10) и (11)

q = 29860 н/м

ρ = 20490 н/м.

По графику рис.6 для $\frac{h}{D_н}$ = 0,975 и песчаного грунта находим Сн= 0,43.

По формуле (13)

$$\psi_3=\sqrt{1-0,75\left(\frac{160,0}{320,0}\right)^2}-0,5\,\frac{160,0}{320,0} = 0,6512$$

Здесь $\sigma^{н}_{нц}$ =160 МПа

Несущая способность трубопровода по (12)

$$\psi_3 \frac{C}{K_н} \cdot R_2^{н} = 0,6512.320,0= 208,3 \text{ МПа}$$

По формуле (15)

$\sigma_{кр.}$= 304 МПа

Вычислениями находим Q=0,1, Q_0=0,3 K=0,0203

$\bar{V}$=0,000003, ω=-0,0005, β_0=0,01.

Тогда согласно (69)

$$A_0 = \frac{10000^2}{3\pi^2.60000} = 84,43 \text{ м}$$

По формуле (63)

М= - 1012,5 н.м.

Тогда согласно (71)

N= 1757930 н.

По формуле (70) продольные растягивающие напряжения

$\sigma_{пр}$ = 212,5 МПа

Имеем 212,5 > 208,3 МПа, т.е. условие (2) не выполняется, прочность трубопровода не обеспечена.

Устойчивость стенки трубы не обеспечена, т.к. условие (14) не выполняется 212,5>203,6 МПа. Прогиб трубопровода незначителен.

Рассмотрим деформацию этого же трубопровода, если он имеет однопролетный переход длиной ℓ =7 м. Сопротивление поперечным перемещениям на вскрытом участке предполагается равным весу трубы с продуктом, а на подземных участках - весу трубы и несущей способности грунтовой засыпки. Согласно (10) и (11) q=29860 н/м, P= 20490 н/м.

По формулам (65), (74), (68), (58), (76), (66) ω= 0,0416, $\hat{V}$ = 0,0016, K=3,5564, β_0= 0,2999, σ = 0,68, σ_0=2,519. Тогда согласно (76) и (79) β =1,9340, z=1,39.

По формуле (70) получим

σ_M=-12,1 МПа

σ_N=-51,9 МПа

Суммарные продольные сжимающие усилия будут - 64,0 МПа.

Таким образом, при длине однопролетного перехода 7,00 м напряжение равно σ пр.=-64,0 МПа, прочность трубопровода обеспечена, так как условие (12) выполняется: 64,0 <208,3 МПа.

По формуле (72) максимальные поперечные перемещения трубопровода равны

V = 84,43.0,0016= 0,001 м.

Программа расчета и номограммы для иллюстрации изменения напряжений и перемещений даны в Приложениях ^ и 3.

Приложение 4

Программы решения задач на ЭЦВМ "Наири-2"

П.4.I. Программа расчета поворота трубопровода, оформленного гнутым коленом и пригруженного одиночным грузом.

i^{ch} = З ч м ц л с р ы а в ш π н

I. Введем ф б и ч ш $ч_I$ $м_I$ $м_2$ $м_3$ m $ц_I$ $ц_2$ g^t $л_1$ $Л_2$ $Л_3$ Щ sf C_2 P_o P_I

2. Допустим $a = 0,I$

3. Вычислим $y = Л_I + (0,8Л_2(Ф+2б)\ (Ц_2+б(Ф/2)-0,39.\ (Ф+2б))) + (0,8Л_2(Ц_2+б+Ф/2)^2 tg\, 0,7Л_3) + (0,8C_2(Ц_2+б+Ф/2)\ /\ \cos 0,7Л_3)$

4. Вычислим $\pi_1 = 25,2ч\ t + 0,3I4I6\, g\phi^2$

5. Вычислим $з = щ + (-0,2926(exp\ ((I/3) ln\ (Ц_2/(Ф+2б)))) + (0,6483 \sqrt{(Ц_2/(Ф+2б))}) + 0,05) + S\ (-0,4733\ (exp((I/3) ln(Ц_2/(Ф+2б)))) + (0,8335 \sqrt{(Ц_2/(Ф+2б))}) + 0,09)$ ·

6. Вычислим $P = 0,8л_I tg Л_3 + 5,026Л_2 з\ (Ф+2б)^2 tg Л_3 + I,5072C_2 x(Ф+2б)$

7. Вычислим $в_I = \pi_1^{exp}((I/3) \cdot ln(tg^2 f/(2I00000\ иу^2)))$

8. Вычислим $Z = \sqrt{(2рч\ tg^3 f/уи)}\ exp\ ((I/3)\ ln((2I00000и\ x\ (tg f))/y))$.

9. Вычислим $x = (\sin a) - (a(\cos a)))\ /(I-(\cos a))$.

I0. Вычислим $Шо = (Po/y)\ (exp((I/3) ln\ (yx/2I00000и\ .(tg f^2)))$

II. Вычислим $Ш_I = (P_I/y)\ (exp\ ((I/3) ln\ (yx/2I00000и.(tg f^2)))$

I2. Вставим $a = a + 0,0I$

I3. Вычислим $a_I = 0,4a$

I4. Вычислим $\theta = ч_I\ (exp((I/3) ln\ ((yx\, tg^2 f)/\ (2I00000и))))$

I5. Вычислим $x = ((\theta(a-(tg a)-(Шо((I/\ (\cos a))-I))-(Ш_I\ ((\cos a_I)/(\cos a\ ) -I))))/(\theta + (\sin(a-o)) -((tg a)\ (\cos(a-o)))))$.

I6. Вычислим $й = (I/(exp((I/3) ln x)))(((\cos\ (a-o))/(o(\cos a)))-(I/\theta)-(a)+(\theta\ /2)+((I/x)\ (I+(a^2/2)-(I/\ \cos a))))-((Шо/x\ (((\sin a)\ /\ (\cos\ a))-a))+((I/x)\ (Ш_I(a-a_I))))$.

I7. Вычислим $в_2 = (exp((2/3) ln x)) + z(\sqrt{(й+((9,8696й^2/I6a)\ (exp\ ((I/3)\ ln\ x)))))}$.

I8. Если $в_2 - в_I < 0$, идти к I2.

I9. Вставим $a = a - 0,005$

20. Вычислим a_I

2I. Вычислим c

22. Вычислим x

23. Вычислим й
24. Вычислим $в_2$
25. Если $в_I - в_2 < о$ идти к I9
26. Вычислим ж=(I/(exp((2/3)ln x)))(((I/cos a))-I-((x/o)(((cos (a-o))/(cos a))-I))-I))+((I/(cos a)) (($ш_0$ (sin a))+($ш_I$ (sin (a-a_I))))).
27. Вычислим $б$=((0,7854 $g ф^2$-((exp((I/3)ln(2I00000и)))(exp((2/3)ln(xy/(tgf))))))/ч)+((ж(exp((I/3)ln y)) (exp((2/3)ln (2I00000и(tgf))))))/ш).
28. Вычислим Н=й (exp ((I/3)ln (2I00000и/у))) (exp((4/3)ln (tgf))).
29. Вычислим $ы_2$= ($М_3^3$ $М_I$/$М_2^3$) ($\sqrt{}$(I-0,75 ($gф М_2$/2б$М_3 М_I$)^2)-
-(0,5gф$М_2$/2б $М_3 М_I$)).
30. Вычислим $Ы_I$ =(((8,2б/(ф+2б)) +0,85)$М_I$ $т$)
31. Вычислим l =a(exp((I/3)ln((I/x)((2,I.I0^6 и tgf)/у)))).
32. Вычислим $Н_2$= $т$($Ц_2$-$Ц_I$)
33. Вычислим e_1= 0,4 e
34. Печатаем с 4 знаками ь $ы_2$ $ы_I$
35. Печатаем с 4 знаками $б_1$ $б_2$ $ее_1$
36. Печатаем с 4 знаками $н$ $н_2$ $т_1$ $о_1$
37. Печатаем с 4 знаками а о у р
38. Печатаем с 4 знаками $ш_0$ $ш_I$
39. Идти к I
40. Кончаем
Исполним I.

П.4.2. Программа расчета поворота трубопровода, оформленного гнутым коленом и пригруженного сплошной нагрузкой

ан
l = З ч м ц л с р ы а в ш $п$

I. Введем ф б и ч ш $ч_I$ $м_I$ $м_2$ м $з т$ $ц_I$ $ц_2$ $g t$
$л_I$ $л_2$ $л_3$ Щ s $f C_2$ g_1
2. Допустим а=0,I
3. Вычислим у= $л_I$(0,8$л_2$(ф+2б)($ц_2$+б(ф/2)-0,39(ф+2б)))+0,9$л_2$ ($ц_2$+б+ф/2)^{2}tg0,7$л_2$)+ 0,8$с_2$($ц_2$+б+ф/2) / cos0,7$л_3$
4. Вычислим $п$=25,2rt+0,3I4I $gф^2$

5. Вычислим з=щ·(-0,2926 (exp((I/3)ln (ц$_2$/(ф+2б)))+(0,6483 $\sqrt{}$ (ц$_2$/(ф+2б)))+0,05 + $\S$ (-0,4733/exp ((I/3) ln (ц$_2$/(ф+2б)))+(0,8335 $\sqrt{}$(ц$_2$(ф+2б)))+0,09)
6. Вычислим р= 0,8л$_I$ tgл$_3$+5,024 л$_2$з(ф+2б)^{2}tgл$_3$+I,5072с$_2$(ф+2б)
7. Вычислим в$_I$=πexp((I/3)ln(tg^4(2I.I0^5 и у^2)).
8. Вычислим z= ($\sqrt{}$((2рч (tgf)^3) /(уи))) (exp((I/3) ln ((2I.I0^{5}и (tgf))/у)))
9. Вычислим х= ((sin a)-(acos a)) /(I-(cos a))
I0. Вычислим δ_1=(в$_I$/у)
II. Вставим a=a+0,I5
I2. Вычислим a$_I$= 0,75a
I3. Вычислим о=ч$_I$(exp((I/3)ln(ух/2I00000и)))(exp((2/3) ln (tgf)))
I4. Вычислим х= ((a-tga)+(σ_I (a$_I$-((sin a$_I$) /cos a)))))/ (I+((sin (a-o)/o)-(((tga) (cos(a-o)))/o)))
I5. Вычислим й= (I/(exp((I/3ln(X)))(((cos (a-o))/(o(cos a)))- -I/o-(a)+(0/2)+((I/X)(I+(a^2/2)-(I/cos a)))- ((б$_I$/X)((a$_I$^{2}/2)- -(aa$_I$)-I+((cos (a-a$_I$))/(cs a)))).
I6. Вычислим в$_2$= (exp((2/3)ln x))+ z($\sqrt{}$(($\sqrt{}$(й^2))+((9,8696й^2/I6a) (exp ((2/3)ln(x)))))
I7. Если в$_2$-в$_I$$\leq$0 идти к I3
I8. Вставим a=a-0,0I
I9. Вычислим a$_I$
20. Вычислим о
2I. Вычислим х
22. Вычислим й
23. Вычислим в$_2$
24. Если в$_I$-в$_2$ $<$ 0 идти к 22
25. Вычислим к= ((I/(cos a))-I-(x/o) (((cos(a-o))/ (cos a))-I))+ +((σ_I/(cos a))((cos (a -a$_I$)) - (cos a)))
26. Вычислим б = ((0,7834 gф^2-((exp((I/3)ln(2I00000и))) (exp((2/3)ln(ху/ (tgf)))))/ч)+((ж(exp((I/3) ln(ху)) (exp ((2/3) ln (2I00000и (tgf)))))/ш)
27. Вычислим н=й (exp ((I/3)ln (2I00000и/у))) (exp ((4/3)ln (tgf))).
28. Вычислим ы= (м$_3$м$_I$/м$_2$) ($\sqrt{}$(I-0,75)gфм$_2$/2бм$_3$м$_I$)^2))- -(0,5 gфм$_2$/2 бм$_3$м$_I$)
29. Вычислим м$_I$= (((8,266/ (ф+2б))+0,85 m)
30. Вычислим н$_2$= m(ц$_2$-ц$_I$)

31. Вычислим l =a(exp((I/3)ln ((I/x)((2,I.I0^6 и tgf / g))))
32. Вычислим l_I= 0,25 l
33. Печатаем с 4 знаками в $в_I$ $в_2$
34. Печатаем с 4 знаками $ы_2 ы_I$ $нн_2$
35. Печатаем с 4 знаками π_7, у р
36. Печатаем с 4 знаками а o $l_1 l$
37. Идти к I

Кончаем

Исполним I.

П.4.3. Программа расчета трубопровода, закрепленного от продольных перемещений, на "выпуклых" участках при выполнении поворота коленом

ап

i = З ч м у л с р ы а в ш а и π e l_4

I. Введем ф и б ч w tg $л_I$ $л_2$ $л_3$ $ц_I$ $ц_2$ $б_2$ f $ш_4$ e s $l_1 l_2 l_3$ $m_1 m_2 m_3$ $к_I$ $к_2$ $Ф_I Ф_2 Ф_3$

2. Допустим а= 0,I
3. Вычислим у= $л_I$+(0,8$л_2$ ($ф$+2б)($ц_2$+б($ф$/2)-0,39($ф$+2б))) + + (0,8$л_2$ ($ц_2$+б+$ф$/2)^2 tg0,7 $л_3$) +0,8$о_2$ ($ц_2$+б+$ф$/2)/ cos 0,7$л_3$)
4. Вычислим π_7 =25,2 ч t +0,3I4I g$ф^2$
5. Вычислим з=щ (-0,2926 (exp ((I/3) ln($ц_2$/($ф$+2б)))) + +(0,6483 $\sqrt{}$($ц_2$/($ф$+2б)))+0,05 + S((-0,4733/exp ((I/3) ln($ц_2$/ ($ф$+2б))))+(0,8335 $\sqrt{}$($ц_2$/($ф$+2б)))+0,09)
6. Вычислим р= 0,8$л_I$ tg$л_3$+5,024 $л_2$з ($ф$+2б)^2 tg$л_3$ + I,5072х хс$_2$($ф$+2б).
7. Вычислим $в_I$= $\pi_7$exp ((I/3)ln ($tg^2 f$ (2I00000иу^2))
8. Вычислим z =($\sqrt{}$((2pq(tg f)^3)/(уи))) (exp((I/3) ln ((2I00000mu(tg f((/y))
9. Вычислим х= (sin а) - (acosa))/(I-(cos a))
I0. Вставим a=a+0,I
II. Вычислим о= (($ц_I$ (tg f)) (exp((I/3)ln((;х) /(2I00000 и х х (tg f))))))).
I2. Вычислим х= (a-(tg a))/(I+((sin(a-o))/o)-(((tg a)/cos (a-0)))/o)
I3. Вычислим й= (I/(exp((I/3)ln x))) (((cos(a-o))/ (ocosa)) - -(I/o)a+(o/2)+((I/x) (I+(a^2/2)-(I/(cos a))))).
I4. Вычислим $в_2$ =(exp((2/3ln x))+ z($\sqrt{}$(й+(9,8696 $и^2$/I6a) (exp ((I/3) ln x))))
I5. Если $в_2$- $в_I$ ⩽0 идти к I0

16. Вставим a=a -0,005
17. Вычислим о
18. Вычислим х
19. Вычислим й
20. Вычислим $в_2$
21. Если $в_I - в_2 < 0$ идти к 16
22. Вычислим π_3= ((exp((I/3)ln (2I00000и))) (exp((2/3) ln ((ху) / (tgf)))))
23. Допустим $\pi_4 = m_1 + m_2 + m_3$
24. Вычислим л= $(\pi_1 - \pi_4 - \pi_3)/p$
25. Вычислим $ч_3$= (π_4 ((exp((I/3)ln (I/2I00000и))) (exp ((2/3) ln (tgf/у)))))
26. Вычислим $ц_3$= l_4 /л
27. Вычислим $и_I$=((((у/2р) (и/ч)) (exp((I/3)ln(у/(2I00000х х и(tg^{4}f)))))) ($ц_3$($в_2$-(exp((2/3)ln(к)))-$ч_3$)))
28. Вычислим ж= (I/(exp ((2/3)lnх))) (((х/о) (((cos(a-o))/ /(cosa))-I))-((I/cosa) -I))
29. Вычислим π_2=0,7854 $g ф^2$ -((exp((I/3) ln (2I00000и))) (exp((2/3ln(ху/(tgf))))
30. Вычислим б = (π_2/ч-(ж(exp((I/3)lnу)) (exp((2/3) ln(2I00000и (tgf)))))/ш
31. Вычислим н=й (exp ((I/3)ln(2I00000и/у))) (exp ((4/3) ln (tgf)))
32. Вычислим $м_2$= ($м_3 м_I / м_2$) ($\sqrt{}$(I-0,75 ($g фм_2/2бм_3 м_I)^2$))- (0,5$g фм_2/2бм_3 м_I$).
33. Вычислим $м_I$=(((8,26б/(ф+2б))+0,85) $м_I m$)
34. Вычислим l =а/(exp((I/3)ln(ух/2I00000и (tgf))))
35. Вычислим $н_2$ = $m(ц_2 - ц_I)$
36. Печатаем с 4 знаками а о $в_I$ $в_2$
37. Печатаем с 4 знаками у р z
38. Печатаем с 4 знаками х й ж б
39. Печатаем с 4 знаками $ч_3$ $ц_3$ ы $н_2$
40. Печатаем с 4 знаками $и_I$ l l_1
41. Печатаем с 4 знаками $ы_I$ $ы_2$
42. Идти к I
43. Кончаем

Исполним. I.

П.4.4. Программа расчета однопролетного перехода, если поворот выполнен коленом

ап

i = э ч м ц л с р ы а в ш π н с у

I. Введем ф б и ч ш $ч_I$ $м_I$ м $_2$ $м_3$ m $ц_I$ $ц_2$ g $л_I$ t $л_2$ $л_3$ $с_2$ щ Sf в

2. Допустим а= 0,I

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

4. Вычислим π_1 = 25,2 $4t$ +0,3I4I6 $Sф^2$

5. Вычислим з= щ (-0,2926 (exp((I/3)$\ln$($ц_2$/(ф-2б))))+(0,6483 $\sqrt{}$ ($ц_2$/(ф+2б)))+0,05)+ S (-0,4733/exp((I/3) $\ln$($ц_2$/(ф+2б))))+ +(0,8335 $\sqrt{}$($ц_2$/(ф+2б)))+0,9)

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

7. Вычислим b_1= π_1 exp((I/3) $\ln$ ($tg^2 f$ (2I00000 и $л_I^2$))

8. Вычислим $у_I$= у-$л_I$

9. Вычислим z =($\sqrt{}$((2р4($tg f$)^3 /($л_I$ и))) (exp ((I/3) $\ln$((2I00000 и ($tg f$))/$л_I$)))

I0. Вычислим к= ($\sin$ а)-(а(cos а)))/(I-(cos а))

II. Вставим а=а+0,05

I2. Если в-L ≤ 0 идти к I5

I3. Допустим b_0 =а

I4. Идти к I6

I5. Вычислим $в_0$= (кb)/2

I6. Вычислим о= $ч_I$ (exp((I/3)$\ln$ ($л_I$х /2I00000 и))) (exp((2/3) $\ln$ ($tg f$)))

I7. Вычислим х= ((а-(tgа)+(($у_I$/$л_I$) (а-(tgа)-($в_0$)+ (($\sin$ $в_0$)/ (cos а))))/ (I+))$\sin$ (а-о))/о)-(((tgа) (cos (а-о)))/о)))

I8. Вычислим й= (I/(exp((I/3)$\ln$х))) (((cos (а-о))/(о-(cos а)))+ +(о/2)-(I/о)-а+((I/х) (I+($а^2$/2)-(I/(cos а))))+(((у$_I$/$л_I$)/х) (((cos (а-($в_0$)))/ (cos а))-(I/ (cos а))+ ((а-($в_0$))^2 /2))))

I9. Вычислим $в_2$=(exp((2/3) $\ln$х))+ z ($\sqrt{}$ (й+((9,8696й/I6а) (exp((I/3)$\ln$х)))))

20. Если $в_2$-$в_I$ $\leq$ 0 идти к II

2I. Вставим а=а-0,0!

22. Если в- L $\leq$ 0 идти к 25

23. Допустим $в_0$= а

24. Идти к 26

25. Вычислим $в_0$ = (кв)/2
26. Вычислим о
27. Вычислим х
28. Вычислим й
29. Вычислим $в_2$
30. Если $в_I - В_2 < 0$ идти к 2I.
31. Вычислим ж= (I/(exp((2/3)$\ln x$))) (((I/(cos a))-I)-((x/o) (((cos(a -o))/((cos a)))-I))+(((y$_I$/л$_I$)/(cos a)) (I-(cos(a-($в_0$))))))
32. Вычислим $б$ =((0,7854 gф^2-((exp((I/3) $\ln$ (2I00000 и))) (exp((2/3)$\ln$(хл$_I$/(tgf))))))/ч)-((z(exp((I/3)$\ln y$)) (exp((2/3) (2I00000 и (tgf)))))/ш)
33. Вычислим н=й (exp((I/3)$\ln$ (2I00000 и/у))) (exp((4/3)$\ln$(tgf)))
34. Вычислим $м_2$=($м_3 м_I/м_2$) ($\sqrt{(I-0,75(g фм_2/2бм_3м_I)^2)}$))-
-(0,5 gфм$_2$/2бм$_3$м$_I$)
35. Вычислим $b/_I$= (((8,266/(ф+2б)) +0,85) м$_I$ m)
36. Вычислим $b/_2$ = m(ц$_2$-ц$_I$)
37. Вычислим l = (a(exp(I/3)$\ln$((I/x) (2,I.I0^6 и tgf)/y_i)))))
38. Вычислим $в_0$= (кв)/2
39. Вычислим $в_0$ = а
40. Печатаем с 4 знаками $б$ в $в_I$ $в_2$
41. Печатаем с 4 знаками - $b/_2$ $b/_1$ HH_2
42. Печатаем с 4 знаками π_1 $у_I$ у р
43. Печатаем с 4 знаками - а о $в_0$ l
44. Идти к I
45. Кончаем

Исполним I.

П.4.5. Программа расчета однопролетного перехода при выполнении поворота упругим изгибом

ап

i = з ч м ц л с р ы а в ш π п l у й

I. Введем ф б и ч ωt ч$_2$ м$_I$ м$_2$ м$_3$ m ц$_I$ ц$_2$ g л$_I$ л$_2$ с$_2$ щ s в f l.
2. Допустим а= 0,I, к= 0_x, х= 0,I, о= 0,000I
3. Вычислим у= л$_I$+(0,8л$_2$ (ф+2б)(ц$_2$+б(ф/2) -0,39(ф+2б)))
+(0,8л$_2$(ц$_2$+б+ф/2)^2 tg 0,7л$_3$)+0,8о$_2$(ц$_2$+б(+ф/2)/cos 0,7л$_a$)
4. Вычислим π_1 =25,2чt +0,3I4I6 gф^2

5. Вычислим H_3 =((L_0)^2 /(I9,7392u_2)
6. Вычислим $в_I$= ((π_I/(2I00000и)) ($\sqrt{}$(2I00000и $н_3/л_I$)))
7. Вычислим з= ц(-0,2926(exp((I/3) $\ln$(u_2/(ф+2б))))+(0,6483$\sqrt{}$ (u_2/(Ф+2б)))+0,05)+S(-0,4733/exp ((I/3) $\ln$ (u_2/(ф+2б))))+ +(0,8335 $\sqrt{}$(u_2/(ф+2б)))+0,09)
8. Вычислим р= 0,8$л_I$ $tg л_3$ +5,024$л_3$(Ф+2б)^2 $tg л_3$+ I,5072c_2 (ф+2б
9. Вычислим $у_I$= у-$л_I$
10. Вычислим Z=(3,I4I59$н_3$/4) ($\sqrt{}$((2рч/и) ((exp((3/4) $\ln$ ($н_3/л_I$))) (exp ((I/4) $\ln$ (I/2I00000и))))))
11. Вставим a=a+0,05
12. Вычислим $в_0$= 0,25a
13. Вычислим o= ($\angle$/2) (exp ((I/4) $\ln$($хл_I$)/(2I00000$н_3$и))))
14. Если a-o > 0 идти к 20
15. Вычислим x= ((a- (tga) +($у_I/л_I$) (a-$в_0$-($\sin$(a-$в_0$))- (tga) (I- (cos (a-$в_0$)))))/(((3,I4I59) cos (3,I4I59) a/o))))/ (2(3,I4I59^2-a_0^2))) ((3,I4I59 (tg a))-(o(tg (3,I4I59(a/o))))))
16. Вычислим й= ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(cos a))))+(0,5(cos (3,I4I59 (a/o))))+((o^2/(2(3,I4I59^2-o^2)))(I-((3,I4I59/o)^2 ((cos (3,I4I59(a/o)))/(cos a)))))+(((у$_I$/$л_I$)/x))))cos (a-$в_0$))/(cos a))- -(I/(cos a))+((a-$в_0$)^2/2)))
17. Вычислим к= (I/($\sqrt{}$x))((I/(cos a))-I+((3,I4I59^{2}x/(2 (3,I4I59^2-o^2)) (((cos (3,I4I59(a/o)))/(cos a))-I))+(((у$_I$/$л_I$)/(cos a)) (I-(cos (a-$в_0$))))
18. Вычислим $в_2$= ($\sqrt{}$x) + (Z($\sqrt{}$(((exp((I/4)$\ln$x))/a)(й^2+(2й ($\sin$ (3,I4I59a/2o))^2)))))
19. Идти к 25
20. Вычислим x= (a-(tga)+($у_I/л_I$)(a-$в_0$-($\sin$(a-$в_0$))-((tga)(I-(cos (a-$в_0$))))))/((((3,I4I59^2(cos (a-o))) (tg(a-o)))/(2(3;I4I59^2- -o^2)))-((3,I4I59^2) cos (a-0)) (tga)/(2 (3,I4I59^2-o^2))))
21. Вычислим й= ((I/x)(I+(a^2/2)-(I/(cos a))))-0,5+((o^2)/(2 (3,I4I59^2-o^2)))(I+((3,I4I59/o)^2((cos (a-o))/(cos a))))+ + (($у_I/л_I$)/x) (((cos(a-$в_0$))/(cos a))- (I/(cos a)+((a-$в_0$)^2/2))
22. Вычислим й= (I/($\sqrt{}$x))((I/(cos a))-I-((3,I4I59^{2}x(cos (a-o)))/ ((2(3,I4I59^2-o^2))(cos a)))-(3,I4I59^{2}x/(2(3,I4I59^2-o^2)))+ +(((у$_I$/$л_I$)/(cos a))(I-(cos(a-$в_0$))))
23. Вычислим $й_3$= ((I/x)(I+(a^2/2)(-o^2/2)-((cos o)/(cos a))))+ +((3,I4I59^2/(2(3,I4I59^2-o^2)))((((cos o)(cos (a-o)))/(cos a))-I))+ +(((у$_I$/$л_I$)/x)((((cos a) (cos (a-$в_0$)))/(cos a))-((cos a)/

/(cos a))-((a-$в_0$)^2/2))).

24. Вычислим $в_2$=(√x)+z(√(((exp((I/4)ln x))/o)((I+й-$й_0$)^2+(((I+й)^2 (o/a))(I-(o/a)+((I/ 6,2832)(5ln(6,28320/a)))))-I)))
25. Вставим к= к+I
26. Если к-I ⩾ 0 идти к I2
27. Если $в_2$-$в_I$ ⩽0 идти к I2
28. Вычислим O = Q -0,0I
29. Если к-I=0 идти к I4
30. Если $в_I$-$в_2$≤0 идти к I4
31. Вычислим б =(((±2I00000(ф+2б))/2$ч_2$)+((ж(√(2I00000 $Н_3$ ил$_I$)))/ /ш))
32. Вычислим н= й$н_3$
33. Вычислим $ы_2$=($м_3м_I$/$м_2$)(√(I-0,75 (qфм$_2$/2б$м_3м_I$)^2))-(0,5qфм$_2$/ /2б$м_3м_I$)
34. Вычислим $м_I$= (((0,266/(ф+2б))+0,85)$м_I$ m)
35. Вычислим $ы_2$=m($ц_2$-$ц_I$)
36. Вычислим l (2a(exp((I/4) ln((2,I.I0^6 и $А_0$)/(xy)))))
37. Вычислим в= 0,25l
38. Печатаем с 4 знаками а о $н_3$z
39. Печатаем с 4 знаками х й $в_2$ $в_I$
40. Печатаем с 4 знаками $й_0$ π l
41. Печатаем с 4 знаками $ы_2$ $ы_I$ $н_2$ $в_0$
42. Печатаем с 4 знаками в $н_3$ у р
43. Печатаем с 4 знаками н ь
44. Идти к I
45. Кончаем.

Исполним I.

НОМОГРАММЫ И СХЕМЫ ДЛЯ ИЛЛЮСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

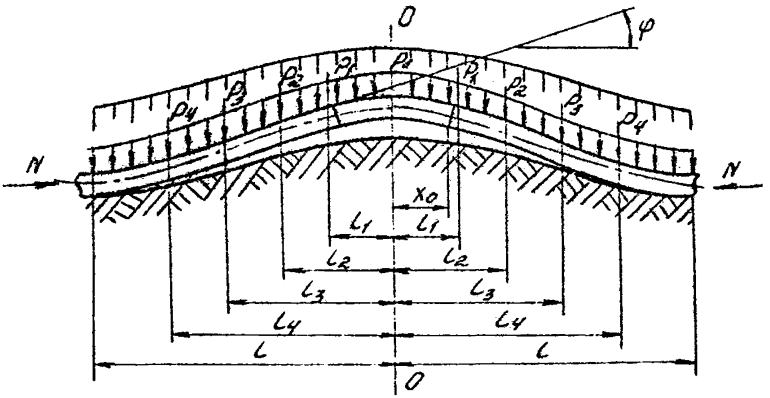

Рис.I. Изгиб трубопровода, пригруженного одиночными грузами, на "выпуклом" рельефе местности

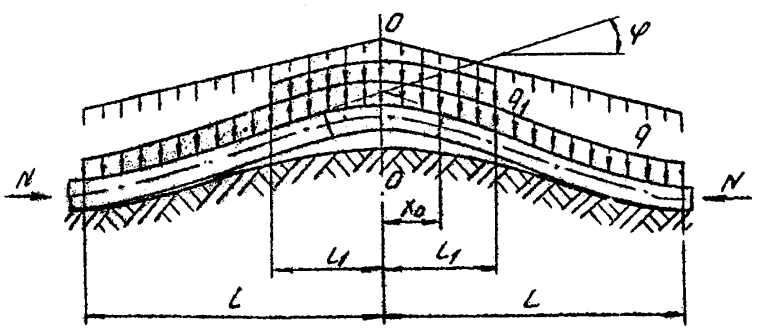

Рис.2. Изгиб трубопровода, пригруженного сплошным грузом на "выпуклом" рельефе местности

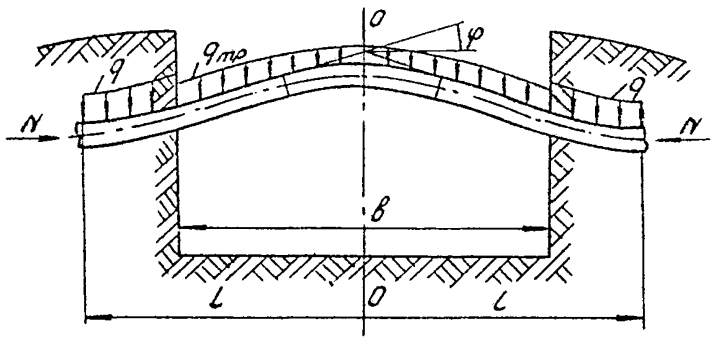

Рис.3. Изгиб однопролетного перехода на "выпуклом" рельефе местности, выполненного коленом

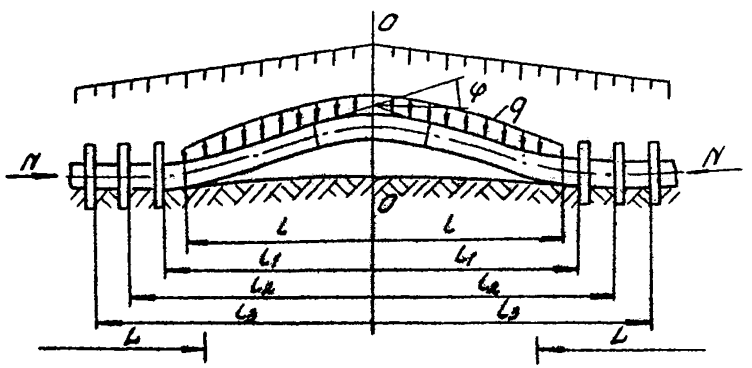

Рис.4. Изгиб трубопровода, закрепленного от продольных перемещений, на "выпуклом" рельефе местности

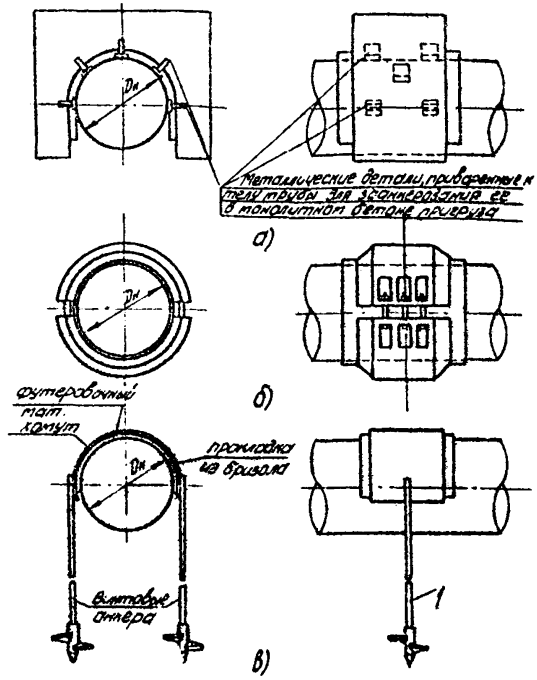

Рис.5 Отдельные типы пригрузов и анкеров, используемых при закреплении трубопроводов

а) Одиночный седлообразный железобетонный пригруз, удерживающий трубопровод от продольных и поперечных перемещений:

б) одиночный кольцевой железобетонный пригруз;

в) винтовое анкерное устройство для трубопроводов, свободных от продольных перемещений

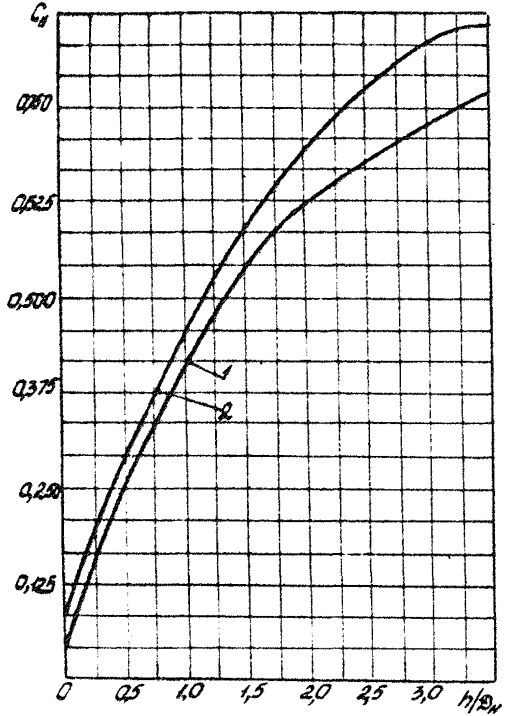

Рис.6. График для определения коэффициента
1 - песчаные грунты; 2 - глинистые грунты

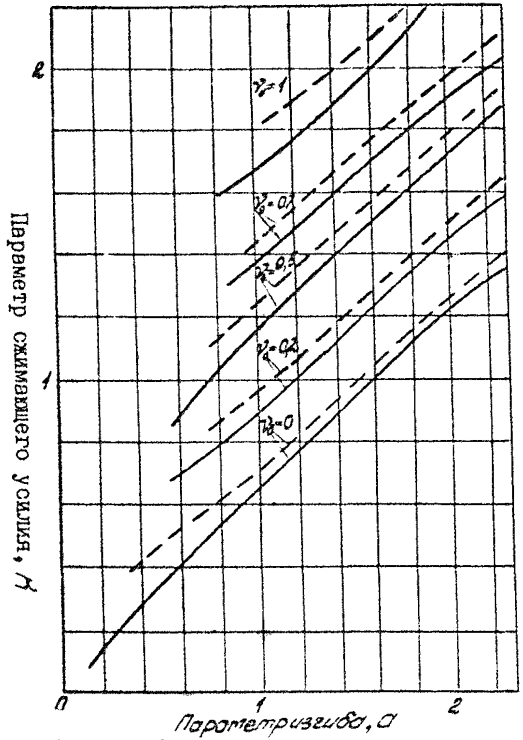

Рис. 7. Зависимость параметра сжимающего усилия от параметра изгиба

-------- - α_0 =0; -------- - α_0 =0,5

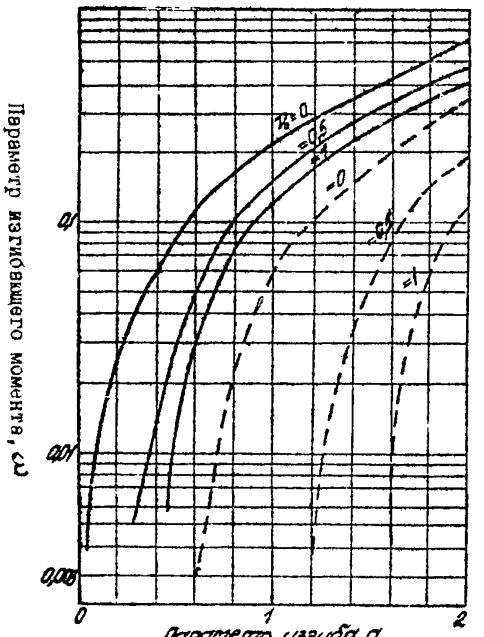

Рис. 8. Зависимость параметра изгибающего момента от параметра изгиба

——— – α_0 0; ——— – α_0 =0,5

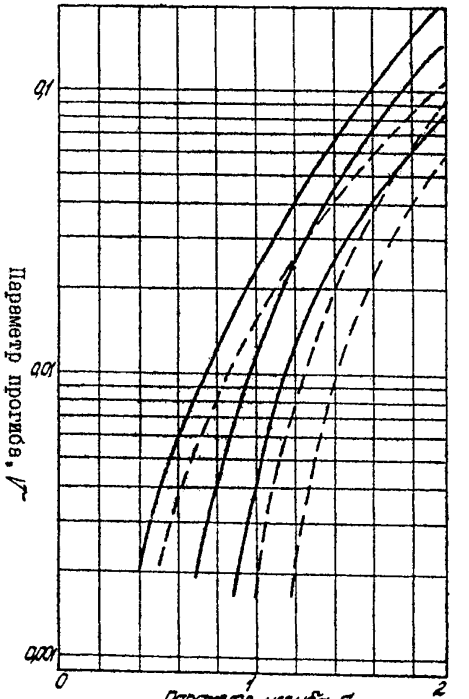

Рис. 9. Зависимость параметра прогиба от параметра изгиба

– – – – – α_0 =0; ——— – α_0 =0,5

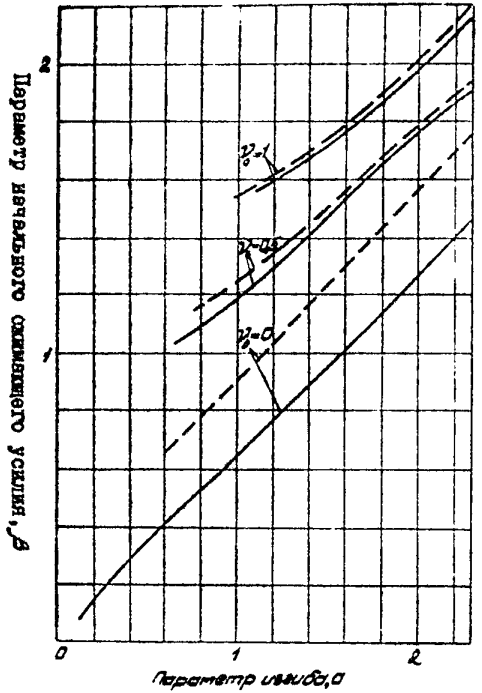

Рис. I0. Зависимость параметра начального сжимающего усилия от параметра изгиба

——— - α_0 =0; ——— - α_0 =0,5

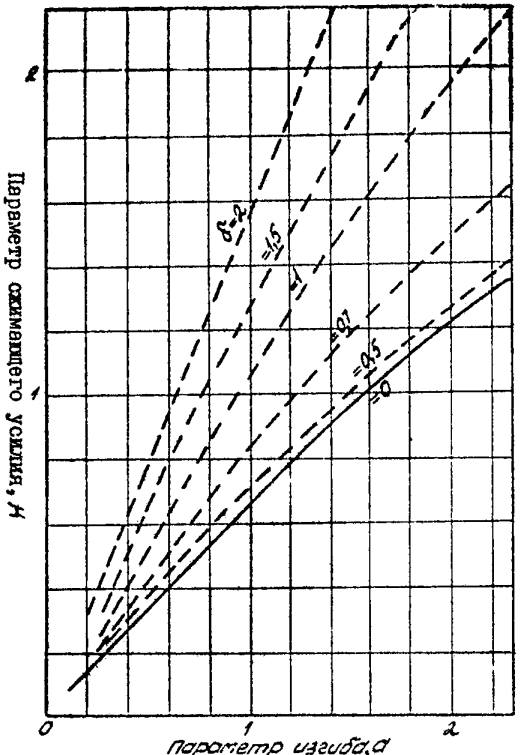

Рис. II. Зависимость параметра сжимающего усилия от параметра изгиба

--------- - α_0 =0; ------- - α_0=0,5

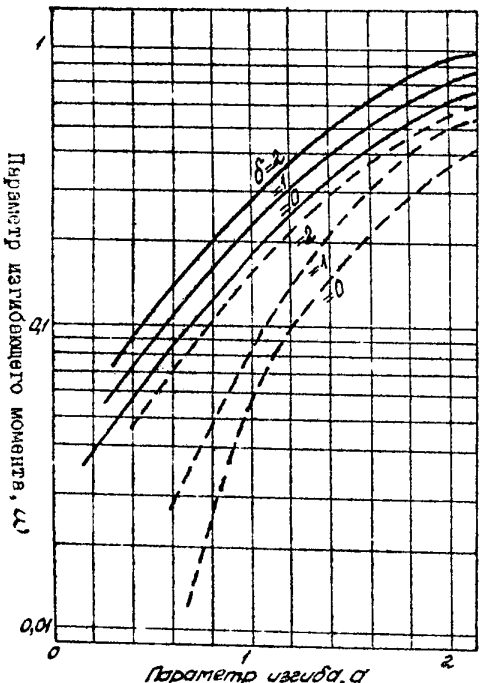

Рис. I2. Зависимость параметра изгибающего момента от параметра изгиба

-------- - α_0 =0; ------- - α_0 =0,5

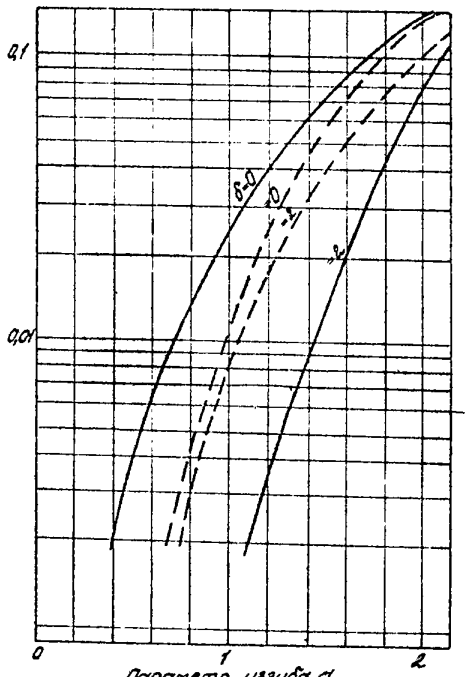

Рис. I3. Зависимость параметра прогиба от параметра изгиба

-------- - α_0 =0; ------- - α_0 =0,5

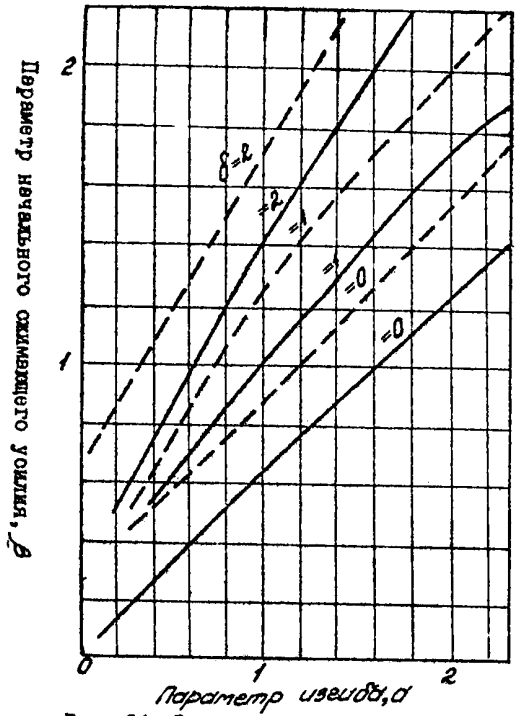

Рис. I4. Зависимость параметра начального сжимающего усилия от параметра изгиба

- - - - - - - a_0=0; ———— - a_0=0,5

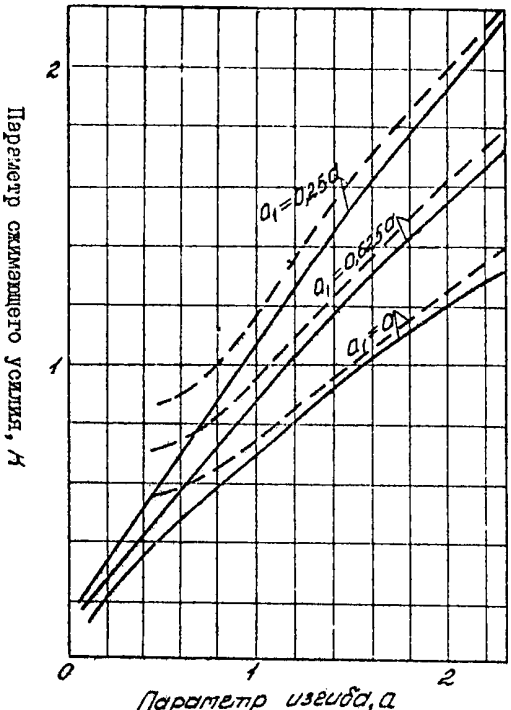

Рис. I5. Зависимость параметра сжимающего усилия от параметра изгиба

- - - - - - - a_0 =0; - - - - - - - a_0 =0,5

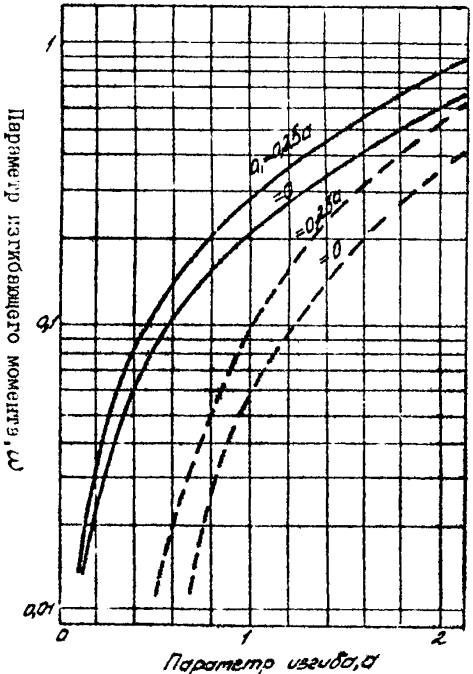

Рис. 16. Зависимость параметра изгибающего момента от параметра изгиба

------ - Q_0=0; ------ - Q_0=0,5

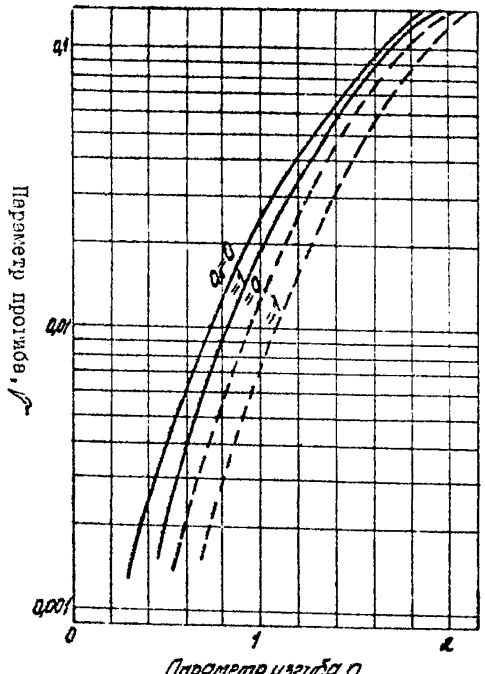

Рис. 17. Зависимость параметра прогиба от изгиба

------ - Q_0=0; ------- - Q_0=0,5

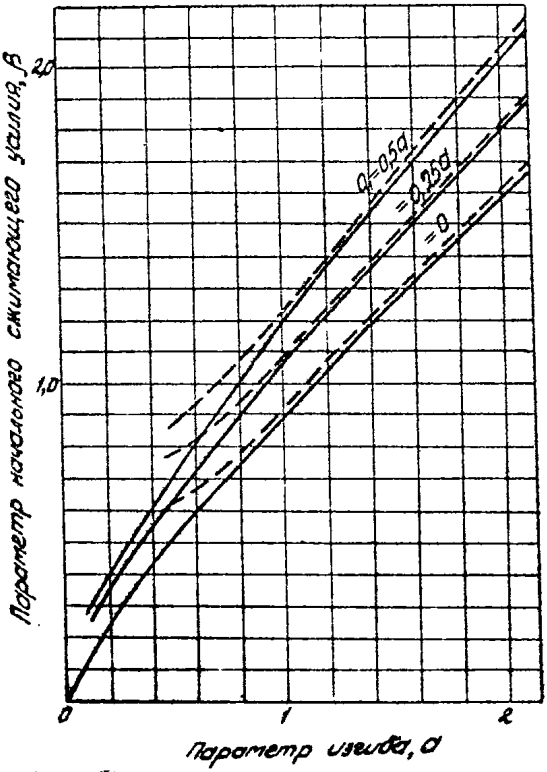

Рис. I8. Зависимость параметра начального сжимающего усилия от изгиба
--------- $Q_0=0$: -------- $Q_0=0,5$

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
I. 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	7
4. Выбор рациональной схемы размещения одиночных грузов и анкеров на криволинейном участке подземного трубопровода, выполненном коленом	I0
5. Расчет трубопроводов на поворотах, выполненных коленами и пригруженных сплошными грузами	I3
6. Выбор схемы закрепления трубопровода от продольных перемещений	I5
7. Выбор конструкции однопролетных переходов трубопроводов	I7
Литература	23
Приложение I. Порядок расчета трубопровода	24
Приложение П. Расчет трубопровода на ЭЦВМ "Наири-2"	32
Приложение Ш. Примеры расчета трубопровода на прочность и устойчивость и выбора рациональных конструктивных решений	34
Приложение IУ. Программы решения задач на ЭЦВМ "Наири-2"	42
Приложение У. Номограммы и схемы для иллюстрации изменения напряжения и перемещения трубопровода	5I

М Е Т О Д И К А

ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА

РД 39-30-613-81

ВНИИСПТнефть
450055, Уфа-55, пр.Октября, 144/3

Подписано в печать 4.II.82г. П03747
форма 60х90 1/16. Уч.изд.л.3.1. Тираж 150 экз.
Заказ 199

Ротапринт ВНИИСПТнефти.

gost.e-ecolog.ru