МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РУКОВОДСТВО

ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ-УПОРОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ

Р 203 — 75

Москва 1976

gost.e-ecolog.ru

УДК 622.692+621.643.43

В настоящем Руководстве изложены основные конструктивные решения подземных компенсаторов-упоров, методика расчета их напряженно-деформированного состояния и программа решения на ЭВМ. Контрольный экземпляр программы хранится в лаборатории математических методов исследований (ЛММИ) ВНИИСТа. На основе вариантного проектирования с учетом ограничений по предельному состоянию определяется рациональная конструктивная схема подземного компенсатора-упора для данных конкретных условий.

Руководство разработано лабораторией методов расчета и конструирования трубопроводов совместно с лабораторией математических методов исследований на основе анализа опубликованных работ, проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Руководство составлено кандидатами техн. наук А.Б.Айнбиндером, И.П.Петровым, инженерами С.К.Гильзиным и Г.А.Яцкой.

Замечания и предложения просим направлять по адресу: Москва 105058, Окружной проезд, 19, ВНИИСТ.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1976

ВНИИСТ	Руководство по применению подземных компенсаторов-упоров при строительстве трубопроводов больших диаметров	Р 203-75

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящее Руководство разработано в развитие главы СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования".

I.2. Проектирование подземных компенсаторов-упоров осуществляется в соответствии с действующими нормативными документами.

I.3. При проектировании и расчете подземных компенсаторов-упоров, сооружаемых на участках, где возможны деформации грунта, связанные с изменением его структуры (просадки, пучения и т.п.), необходимо учитывать связанные с этим дополнительные воздействия.

I.4. Определение физико-механических характеристик грунта производится в соответствии с требованиями Государственных стандартов при инженерных изысканиях трассы трубопровода.

I.5. Определение нагрузок и воздействий производится в соответствии с главами СНиП "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования" и "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования".

I.6. В проекте указывается минимальная и максимальная температуры замыкания трубопровода на расчетном участке, определенные в соответствии с принятым в расчете температурным перепадом.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

2.I. Подземные компенсаторы-упоры применяют с целью уменьшения перемещений подземных трубопроводов в местах выхода на

Внесено лабораторией методов расчета и конструирования трубопроводов ВНИИСТа	Утверждено Всесоюзным научно-исследовательским институтом по строительству магистральных трубопроводов I5 октября 1975 г.	Разработано впервые

поверхность у надземных переходов, около мест запуска и приема очистных устройств, в местах примыкания трубопроводов к компрессорным и газораспределительным станциям, в местах установки тройников и кранов, около подводных переходов и в других случаях.

2.2. Подземными компенсаторами-упорами называются уложенные в грунт участки трубопроводов трапецеидальной, Z -образной или иной формы, по очертанию аналогичные открытым компенсаторам. Такие участки трубопроводов частично компенсируют продольные деформации в прилегающем с одной стороны участке трубопровода (за счет смещений труб в грунте) и одновременно являются упорами, намного уменьшающими перемещения трубопровода с другой стороны компенсатора-упора, где продольные перемещения должны иметь ограниченную величину.

2.3. Компенсаторы-упоры трапецеидальной формы в большей степени ограничивают продольные перемещения трубопроводов, чем компенсаторы Z -образной формы.

С увеличением угла поворота трубопровода уменьшаются его продольные перемещения, но возрастают изгибные напряжения в трубах.

2.4. Трапецеидальные компенсаторы-упоры проектируют с меньшим углом поворота оси трубопровода со стороны передачи усилия (порядка 25–45^0) и большим углом поворота оси трубопровода (порядка 50–75^0) со стороны, где величины продольных перемещений трубопровода ограничиваются проектом; углы поворота оси Z -образных компенсаторов устанавливают в пределах 45–75^0.

При необходимости подземные компенсаторы-упоры можно совмещать с углом поворота оси трассы.

Вылет компенсаторов-упоров принимают равным 15–25 диаметрам труб.

Углы поворота и размеры элементов компенсаторов определяют расчетом.

2.5. Углы поворота компенсаторов-упоров выполняют из отводов, изготовленных в соответствии с действующими нормативными документами, с радиусом изгиба оси не менее 5 диаметров трубопроводов.

С целью уменьшения изгибных напряжений рационально применять отводы, изготовленные способом холодного гнутья со средним радиусом изгиба оси 30–60 диаметров труб.

Возможно выполнение углов поворота в компенсаторах-упорах из набора отводов $6\text{-}12^0$ с небольшими прямолинейными вставками между ними.

2.6. Компенсаторы-упоры следует располагать по возможности ближе к узлу, где величина продольных перемещений должна быть ограничена.

2.7. Компенсирующая способность компенсатора-упора возрастает с уменьшением плотности грунта вокруг компенсатора. Учитывая это, рекомендуется траншею в пределах компенсатора-упора и на прилегающих участках трубопровода в пределах 15–20 диаметров труб засыпать рыхлым податливым грунтом.

2.8. Для выбора рациональных параметров подземных компенсаторов-упоров производят расчет различных вариантов по ниже изложенной программе "ШАГ-1". Из рассмотренных вариантов принимают такой, который обеспечивает минимальное перемещение свободного конца компенсатора-упора при выполнении условий прочности и технологических требований.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Для расчета по программе "ШАГ-1" проектировщик должен иметь исходные данные, состоящие из геометрических и физико-механических характеристик трубы (п.3.1), определяемых из справочной литературы; физико-механических характеристик грунта(п.3.2), определяемых на основании данных инженерных изысканий; геометрических параметров компенсатора-упора (п.3.3), принимаемых на основании выбранного проектного решения; характеристик нагрузок и воздействий (п.3.4), определяемых в соответствии с главой СНиП "Магистральные трубопроводы.Нормы проектирования".

3.1. Геометрические и физико-механические характеристики трубы:

$D_н$ – наружный диаметр трубы, см;

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

δ – номинальная толщина стенки трубы, см;

r – радиус инерции сечения стенок трубы, см;

F – площадь сечения стенок трубы, $см^2$;

W – момент сопротивления сечения стенок трубы, $см^3$;

J – момент инерции сечения стенок трубы, $см^4$;

α – коэффициент линейного расширения металла, $град^{-1}$;

E – модуль упругости металла, $кгс/см^2$;

$q_{тр}$ – масса единицы длины трубы, кг/см;

$R_н^н$ – нормативное сопротивление, $кгс/см^2$;

μ – коэффициент Пуассона для металла.

3.2. Физико-механические характеристики грунта:

$\gamma_{гр}$ – объемная масса, $кг/см^3$;

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

$C_{гр}$ – сцепление, $кгс/см^2$;

$E_{гр}$ – модуль деформации грунта, $кгс/см^2$;

$\eta_{гр}$ – коэффициент снижения коэффициента нормального сопротивления грунта, учитывающий геометрические размеры траншеи, в которую уложен трубопровод, определяют по графику рис.I в зависимости от отношения a (минимального расстояния по горизонтали от трубы до стенки траншеи) к h_0 – расстоянию от верха засыпки до оси трубы;

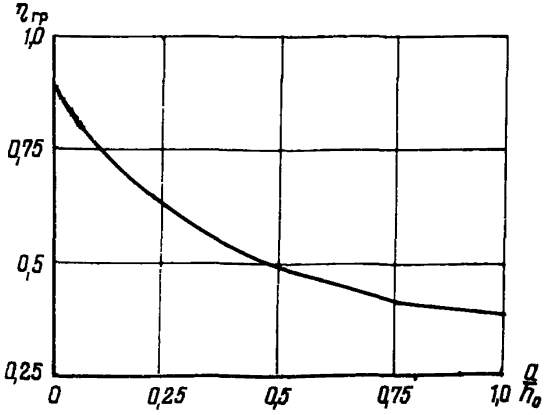

Рис.I. График для определения $\eta_{гр}$

$C_н$ - коэффициент, учитывающий образование свода естественного равновесия, определяется по графику рис.2 в зависимости от отношения h (расстояния от верха засыпки до верхней образующей трубы) к наружному диаметру трубы $D_н$;

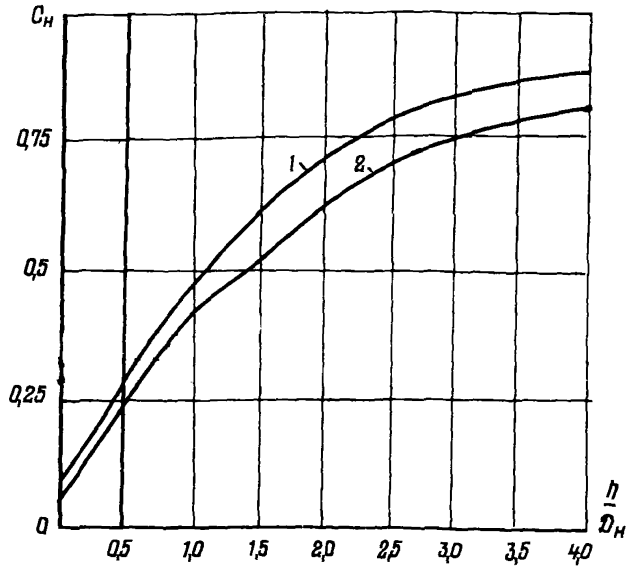

Рис.2. График для определения $C_н$:
I-песчаные грунты; 2-глинистые грунты

$\mu_{гр}$ - коэффициент Пуассона грунта. Для глин и твердых и полутвердых суглинков $\mu_{гр}$ = 0,I-0,I5; для тугопластичных суглинков $\mu_{гр}$= 0,3-0,4 и для текучих $\mu_{гр}$ = 0,45-0,5; для супеси (в зависимости от консистенции) $\mu_{гр}$ = 0,I5-0,30; для песков $\mu_{гр}$= 0,20-0,25;

$C_{х.о.}$ - обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта (кгс/см^3). Для песчаных и супесчаных грунтов принимают

равным 0,19-0,33 (для сухих рыхлых песков - 0,19, для плотной влажной супеси - 0,33); для глин и суглинков от 0,21 до 0,41 в зависимости от плотности.

Примечание. Модуль деформации грунта $E_{гр}$ можно определять на основании главы СНиП II-15-74 "Основания и фундаменты. Нормы проектирования".

3.3. Геометрические параметры компенсатора-упора:

h - расстояние от верха засыпки до верхней образующей трубы, см;

h_0 - то же до оси трубы ($h_0 = h + \frac{D_н}{2}$), см;

a - минимальное расстояние по горизонтали от трубы до стенки траншеи, см;

$\varphi_{1,2,3,4...}$ - углы поворота трубопровода, град;

$\rho_{1,2,3,4...}$ - радиусы кривизны оси отводов, см.

3.4. Нагрузки и воздействия:

P - нормативное (рабочее) давление продукта, кгс/см^2;

Δt - нормативный температурный перепад, ^{0}С, положительный при нагревании;

Z_1 и Z_2 - усилия (кгс), учитывающие граничные условия по концам компенсатора-упора, определяемые в соответствии с п.4.9.

4. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА, ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

4.1. В качестве расчетной схемы компенсаторов-упоров принято сочетание криволинейных (круговых) и прямолинейных участков. Наиболее часто встречающиеся схемы представлены на рис.3 (а,б,в).

Считается, что один из прямолинейных участков трубопровода (со стороны действия усилия Z_1) имеет длину до ближайшего угла поворота не менее 500 диаметров труб, когда можно пренебречь влиянием угла поворота на работу компенсатора-упора (рис.3,б,в).

Прямолинейный участок, расположенный с другой стороны компенсатора-упора, имеет ограниченную длину и на его конце приложена внешняя сила Z_2 (отпор от примыкающей конструкции).

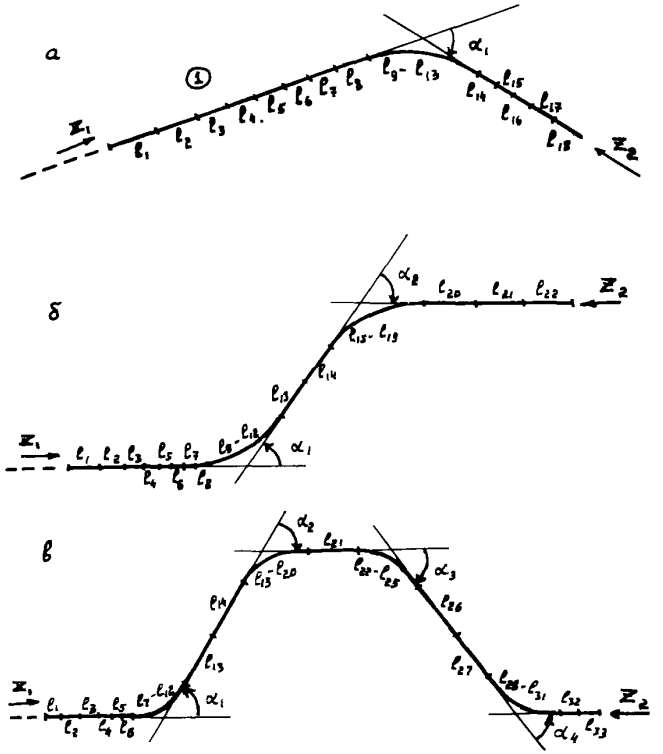

Рис.3. Схемы разбивки подземного трубопровода на элементы: а-для угла поворота трассы; б-для Z -образного компенсатора; в-для трапецеидального компенсатора

4.2. Рассчитываемая система разбивается на ряд прямолинейных и криволинейных (круговых) участков, при этом узловые точки обязательно назначаются в начале и конце каждой кривой. Система принята плоской, состоящей из упругих элементов трубчатого сечения. Зависимость напряжений от деформаций металла труб выражается обобщенным законом Гука.

4.3. Для определения напряженно-деформированного состояния подземного компенсатора-упора используется численный метод, являющийся одной из разновидностей метода конечных элементов. Он основан на замене исследуемой конструкции некоторым числом дискретных элементов.

В качестве конечного элемента принимают прямолинейный упругий стержень, находящийся в среде с двусторонними линейно - упругими связями. Криволинейные участки заменяют совокупностью прямых, являющихся хордами данного сектора.

Число узлов К или число элементов, равное К + I, на которое разбивается вся система, в первую очередь определяется математическим обеспечением ЭВМ, в основном возможностью использования стандартных подпрограмм для решения линейных алгебраических уравнений порядка ЗК.

4.4. Первый прямолинейный участок трубы (см.рис.3,б,в) рекомендуется разбивать на 6-II элементов, соответственно углы поворота между ними будут равны нулю. Длины первых двух-трех элементов принимают наибольшими возможными из условия, чтобы произведение $\beta_0 \ell_1$ или $\gamma_0 \ell_1$ не превышало величины I8 (значения β_0 и γ_0 определяют по формулам (I5) и (I7). Можно рекомендовать принимать $\ell_1 \approx 100\ D_н$. Далее длины участков уменьшают пропорционально их номеру таким образом, чтобы длина последнего элемента на первом прямолинейном участке составляла 6-I0 м. Прямолинейные вставки между криволинейными участками в зависимости от вылета компенсатора-упора и длины его полки разбивают на 2-4 элемента.

4.5. Круговые участки разбивают на совокупность прямых, соединенных под углом друг к другу, являющихся хордами сектора.

На рис.4 представлена схема замены круговой кривой радиуса ρ_1 с углом поворота α_1 на совокупность n прямых.

Длину каждой прямой определяют по формуле

$$\ell_n = 2\rho_1 \sin\frac{\alpha_1}{2n}. \qquad (1)$$

Углы поворотов стержней, примыкающих к первоначально прямолинейным участкам, определяют по формуле

$$\varphi_1 = \varphi_{n+1} = \frac{\alpha_1}{2n}. \qquad (2)$$

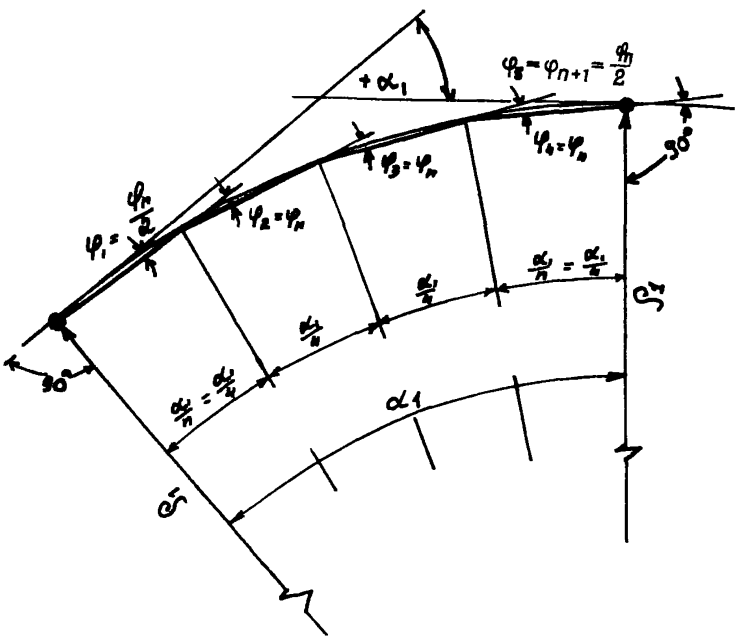

Рис.4. Схема замены кривой совокупностью прямых (для $n = 4$)

Углы поворотов остальных участков по формуле

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \ldots\ldots = \varphi_n = \frac{\alpha_1}{n} \cdot \qquad (3)$$

(Все необходимые обозначения приведены на рис.4).

Рекомендуется углы поворота более 45^0, выполненные с помощью отводов с радиусом изгиба оси $\rho = 5D_H$ заменять двумя-тремя прямыми, то есть принимать $n = 2\text{-}3$, а при применении отводов со средним радиусом изгиба оси $\rho = 40\text{-}70\,D_H$ при угле поворота более 30^0 принимать $n = 4\text{-}8$.

4.6. Зависимость сопротивления грунта от поперечных горизонтальных перемещений трубы принимается линейной, зависимость сопротивления грунта от продольных (осевых) перемещений трубы принимается нелинейной - билинейной.

Учет физической нелинейности грунта производят методом упругих решений.

Нумерация узлов и элементов принята слева направо (см. рис.3).

Угол поворота между элементами φ_i принимается положительным, если он образован вращением продолжения предыдущего элемента до направления последующего по часовой стрелке.

4.7. Составляются уравнения, выражающие кинематическую совместимость деформаций всей конструкции. Система уравнений линейна относительно узловых усилий X_C (усилий по концам элементов). Ниже приведена система уравнений для узла i:

$$\left.\begin{aligned} &a_{(3i-2)(3i-5)}X_{3i-5} + a_{(3i-2)(3i-4)}X_{3i-4} + a_{(3i-2)(3i-3)}X_{3i-3} + \\ &+ a_{(3i-2)(3i-2)}X_{3i-2} + a_{(3i-2)(3i-1)}X_{3i-1} + a_{(3i-2)(3i)}X_{3i} + \\ &+ a_{(3i-2)(3i+1)}X_{3i+1} + a_{(3i-2)(3i+2)}X_{3i+2} + a_{(3i-2)(3i+3)}X_{3i+3} = \\ &= P_{3i-2}; \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} &a_{(3i-1)(3i-5)}X_{3i-5} + a_{(3i-1)(3i-4)}X_{3i-4} + a_{(3i-1)(3i-3)}X_{3i-3} + \\ &+ a_{(3i-1)(3i-2)}X_{3i-2} + a_{(3i-1)(3i-1)}X_{3i-1} + a_{(3i-1)(3i)}X_{3i} + \\ &a_{(3i-1)(3i+1)}X_{3i+1} + a_{(3i-1)(3i+2)}X_{3i+2} + a_{(3i-1)(3i+3)}X_{3i+3} = P_{3i-1} \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

$$\left.\begin{aligned} &a_{(3i)(3i-5)}X_{3i-5}+a_{(3i)(3i-4)}X_{3i-4}+a_{(3i)(3i-3)}X_{3i-3}+\\ &+a_{(3i)(3i-2)}X_{3i-2}+a_{(3i)(3i-1)}X_{3i-1}+a_{(3i)(3i)}X_{3i}+\\ &+a_{(3i)(3i+1)}X_{3i+1}+a_{(3i)(3i+2)}X_{3i+2}+a_{(3i)(3i+3)}X_{3i+3}=p_{3i}. \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Уравнения составляются для всех узлов от I до K включительно (i изменяется от I до K).

4.8. Матрица коэффициентов a_{ij} при неизвестных (матрица податливости) определяется на основе начальных параметров от единичных узловых усилий.

Матрица свободных членов p_i (матрица нагрузки) определяется на основе начальных параметров от внутреннего давления и температуры.

Матрица коэффициентов:

$$\left.\begin{aligned} &a_{(3i-2)(3i-5)}=-4\rho_6^{(i)}; \qquad a_{(3i-2)(3i-4)}=-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i)};\\ &a_{(3i-2)(3i-3)}=0; \qquad a_{(3i-2)(3i-2)}=2\left[\rho_1^{(i)}+\rho_1^{(i+1)}\right];\\ &a_{(3i-2)(3i-1)}=\frac{1}{\beta}\left[\rho_2^{(i+1)}-\rho_2^{(i)}\cos\varphi_i\right]; \quad a_{(3i-2)(3i)}=\frac{1}{\beta}\rho_2^{(i)}\sin\varphi_i;\\ &a_{(3i-2)(3i+1)}=-4\rho_6^{(i+1)}; \quad a_{(3i-2)(3i+2)}=\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i+1)}\cos\varphi_{i+1};\\ &a_{(3i-2)(3i+3)}=-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i+1)}\sin\varphi_{i+1}. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

$$\left.\begin{aligned} &a_{(3i-1)(3i-5)}=\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i)}\cos\varphi_i; \qquad a_{(3i-1)(3i-4)}=\frac{2}{\beta^2}\rho_5^{(i)}\cos\varphi_i;\\ &a_{(3i-1)(3i-3)}=-\frac{2\beta}{\gamma_i}\psi_2^{(i)}\sin\varphi_i; \quad a_{(3i-1)(3i-2)}=\frac{1}{\beta}\left[\rho_2^{(i+1)}-\rho_2^{(i)}\cos\varphi_i\right];\\ &a_{(3i-1)(3i-1)}=\frac{1}{\beta^2}\left[\rho_3^{(i)}\cos^2\varphi_i+\rho_3^{(i+1)}\right]+\frac{2\beta}{\gamma_i}\psi_1^{(i)}\sin^2\varphi_i;\\ &a_{(3i-1)(3i)}=\frac{1}{2}\sin 2\varphi_i\left[\frac{2\beta}{\gamma_i}\psi_1^{(i)}-\frac{1}{\beta^2}\rho_3^{(i)}\right];\\ &a_{(3i-1)(3i+1)}=-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i+1)}; \quad a_{(3i-1)(3i+2)}=\frac{2}{\beta^2}\rho_5^{(i+1)}\cos\varphi_{i+1};\\ &a_{(3i-1)(3i+3)}=-\frac{2}{\beta^2}\rho_5^{(i+1)}\sin\varphi_{i+1}. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&a_{(3i)(3i-5)}=-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(i)}\sin\varphi_i; \quad a_{(3i)(3i-4)}=-\frac{2}{\beta^2}\rho_5^{(i)}\sin\varphi_i;\\
&a_{(3i)(3i-3)}=-\frac{2\beta}{\gamma_i}\psi_2^{(i)}\cos\varphi_i; \quad a_{(3i)(3i-2)}=\frac{1}{\beta}\rho_2^{(i)}\sin\varphi_i;\\
&a_{(3i)(3i-1)}=\frac{1}{2}\sin 2\varphi_i\cdot\left[\frac{2\beta}{\gamma_i}\psi_1^{(i)}-\frac{1}{\beta^2}\rho_3^{(i)}\right];\\
&a_{(3i)(3i)}=2\beta\left[\frac{\psi_1^{(i)}\cos^2\varphi_i}{\gamma_i}+\frac{\psi_1^{(i+1)}}{\gamma_{i+1}}\right]+\frac{1}{\beta^2}\rho_3^{(i)}\sin^2\varphi_i;\\
&a_{(3i)(3i+1)}=0; \quad a_{(3i)(3i+2)}=-\frac{2\beta}{\gamma_{i+1}}\psi_2^{(i+1)}\sin\varphi_{i+1}; \quad a_{(3i)(3i+3)}=-\frac{2\beta}{\gamma_{i+1}}\psi_2^{(i+1)}\cos\varphi_{i+1}.
\end{aligned}
\right\} \quad (9)
$$

Матрица свободных членов:

$$
\left.
\begin{aligned}
&P_{3i-2}=0; \quad P_{3i-1}=\frac{2\beta}{\gamma_i}\,th\,\frac{\gamma_i\ell_i}{2}\sin\varphi_i-\frac{Z_1}{EF}\frac{\sin\varphi_i}{\gamma_i sh\gamma_i\ell_i}E_1(i);\\
&P_{3i}=2\beta\left(\frac{1}{\gamma_i}\,th\,\frac{\gamma_i\ell_i}{2}\cos\varphi_i+\frac{1}{\gamma_{i+1}}\,th\,\frac{\gamma_{i+1}\ell_{i+1}}{2}\right)-\\
&-\frac{Z_1}{EF}\frac{\cos\varphi_i}{\gamma_i sh\gamma_i\ell_i}E_1(i)+\frac{Z_2}{EF}\frac{1\cdot E_2(i)}{\gamma_{i+1}sh\gamma_{i+1}\ell_{i+1}},
\end{aligned}
\right\} \quad (10)
$$

где Z_1 и Z_2 – усилия, учитывающие граничные условия на концах рассчитываемой системы;

Z_1 – усилие на левом конце рассматриваемого участка, который считается несмещающимся;

Z_2 – внешнее усилие, учитывающее отпор примыкающей конструкции.

4.9. Неизвестное X, индекс при котором $(3i-1)$, $(3i-2)$, $(3i-3)$, $(3i-4)$, $(3i-5)$ равен или меньше нуля или больше 3K, принимается равным нулю.

В формулах (10) функции $E_1(i)$ и $E_2(i)$ учитывают возможность действия внешнего усилия только по концам рассматриваемого участка и определяются следующим образом:

$$
E_1(i)=\begin{cases}1, & i=1\\ 0, & i\neq 1\end{cases}
$$

$$
E_2(i)=\begin{cases}1, & i=K\\ 0, & i\neq K\end{cases}
$$

Для рассматриваемых компенсаторов-упоров (см.рис.3,б,в) при длине левого участка более $500D_н$ $Z_1=SEF$; при наличии

загибки или угла поворота (пренебрегая отпором примыкающей конструкции) $Z_2 = 0$.

Для примера приведены матрицы коэффициентов при неизвестных и свободных членах для числа узлов K = 4, то есть числа элементов-стержней, равного 5.

4.10. Безразмерные параметры в формулах (7)-(9), характеризующие взаимодействие трубопровода с грунтом (в поперечном направлении):

$$
\left.
\begin{aligned}
\mathcal{P}_1^{(i)} &= \frac{sh\,2\beta_0 e^{(i)} + \sin 2\beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}} \\
\mathcal{P}_2^{(i)} &= \frac{ch\,2\beta_0 e^{(i)} - \cos 2\beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\
\mathcal{P}_3^{(i)} &= \frac{sh\,2\beta_0 e^{(i)} - \sin 2\beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\
\mathcal{P}_4^{(i)} &= \frac{sh\,\beta_0 e^{(i)} \cdot \sin \beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\
\mathcal{P}_5^{(i)} &= \frac{ch\,\beta_0 e^{(i)} \cdot \sin \beta_0 e^{(i)} - sh\,\beta_0 e^{(i)} \cdot \cos \beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\
\mathcal{P}_6^{(i)} &= \frac{ch\,\beta_0 e^{(i)} \cdot \sin \beta_0 e^{(i)} + sh\,\beta_0 e^{(i)} \cdot \cos \beta_0 e^{(i)}}{Q^{(i)}}, \\
Q^{(i)} &= ch\,2\beta_0 e^{(i)} + \cos 2\beta_0 e^{(i)} - 2
\end{aligned}
\right\} \quad (11)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
\mu_1^{(i)} &= e^{-2\beta_0 e^{(i)}} + \cos 2\beta_0 e^{(i)} - \sin 2\beta_0 e^{(i)} - 2 \\
\mu_2^{(i)} &= e^{-2\beta_0 e^{(i)}} - \cos 2\beta_0 e^{(i)} - \sin 2\beta_0 e^{(i)} \\
\mu_3^{(i)} &= -e^{2\beta_0 e^{(i)}} - \cos 2\beta_0 e^{(i)} - \sin 2\beta_0 e^{(i)} + 2 \\
\mu_4^{(i)} &= e^{2\beta_0 e^{(i)}} - \cos 2\beta_0 e^{(i)} + \sin 2\beta_0 e^{(i)} \\
\mu_5^{(i)} &= 2 \sin^2 \beta_0 e^{(i)} \\
\mu_6^{(i)} &= -e^{-2\beta_0 e^{(i)}} - \sin 2\beta_0 e^{(i)} + 1 \\
\mu_7^{(i)} &= e^{2\beta_0 e^{(i)}} - \sin 2\beta_0 e^{(i)} - 1
\end{aligned}
\right\} \quad (12)
$$

Матрица неизвестных и свободных членов (правые части) для системы уравнений (4)-(6) при К = 4

$$\{A\} \times \{X\} = \{P\}$$

$\{A\}$ - матрица коэффициентов канонических уравнений;

$\{X\}$ - матрица-столбец неизвестных;

$\{P\}$ - матрица-столбец свободных членов

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X_{11} \\ X_{12} \end{Bmatrix} \quad \{P\} = \begin{Bmatrix} \frac{2,5\beta}{\gamma_1} th \frac{\theta^{(1)}}{2} \cdot \sin\varphi_1 - \frac{2\beta z_1}{EF\gamma_1} \frac{\sin\varphi_1}{sh\,\theta^{(1)}} \\ 2,5\beta\left[\frac{1}{\gamma_1} th \frac{\theta^{(1)}}{2} \cdot \cos\varphi_1 + \frac{1}{\gamma_2} th \frac{\theta^{(2)}}{2}\right] \frac{2\beta z_1}{EF\gamma_1} \frac{\cos\varphi_1}{sh\,\theta^{(1)}} \\ \frac{2,5\beta}{\gamma_2} th \frac{\theta^{(2)}}{2} \sin\varphi_2 \\ 2,5\beta\left[\frac{1}{\gamma_2} th \frac{\theta^{(2)}}{2} \cos\varphi_2 + \frac{1}{\gamma_3} th \frac{\theta^{(3)}}{2}\right] \\ \frac{2,5\beta}{\gamma_3} th \frac{\theta^{(3)}}{2} \sin\varphi_3 \\ 2,5\beta\left[\frac{1}{\gamma_3} th \frac{\theta^{(3)}}{2} \cos\varphi_3 + \frac{1}{\gamma_4} th \frac{\theta^{(4)}}{2}\right] \\ \frac{2,5\beta}{\gamma_4} \cdot th \frac{\theta^{(4)}}{2} \sin\varphi_4 \\ 2,5\beta\left[\frac{1}{\gamma_4} th \frac{\theta^{(4)}}{2} \cos\varphi_4 + \frac{1}{\gamma_5} th \frac{\theta^{(5)}}{2}\right] \frac{2\beta z_4}{EF\gamma_5} \cdot \frac{1}{sh\,\theta^{(5)}} \end{Bmatrix}$$

Матрица коэффициентов при неизвестных для системы уравнений (4)–(6) при $K=4$

$2[\rho_1^{(4)}+\rho_2^{(4)}]$	$\frac{\rho_2^{(4)}-\rho_1^{(4)}\cos\varphi_2}{\beta}$	$\frac{\sin\varphi_2}{\beta}\rho_2^{(4)}$	$-4\rho_6^{(4)}$	$\frac{4\cos\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$-\frac{4\sin\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(4)}$	◯	◯	◯	◯	◯
$\frac{\rho_2^{(4)}-\rho_1^{(4)}\cos\varphi_2}{\beta}$	$\frac{\rho_1^{(4)}+\rho_3^{(4)}\cos^2\varphi_2}{\beta}+\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\psi_4^{(4)}\sin^2\varphi_2$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(4)}}\psi_4^{(4)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(4)}\right]\sin 2\varphi_2$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_2\rho_5^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_2\rho_5^{(4)}$	◯	◯	◯	◯	◯
$\frac{\sin\varphi_2}{\beta}\rho_2^{(4)}$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(4)}}\psi_1^{(4)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(4)}\right]\sin 2\varphi_2+\frac{1}{\beta^2}\sin^2\varphi_2\rho_3^{(4)}$	$2\beta\left[\frac{\psi_2^{(4)}}{\gamma^{(4)}}+\frac{\psi_4^{(4)}}{\gamma^{(4)}}\cos^2\varphi_2\right]$	◯	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\sin\varphi_2\psi_2^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\cos\varphi_2\psi_2^{(4)}$	◯	◯	◯	◯	◯
$-4\rho_6^{(4)}$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	◯	$2[\rho_1^{(4)}+\rho_2^{(4)}]$	$\frac{\rho_2^{(5)}-\rho_1^{(5)}\cos\varphi_2}{\beta}$	$\frac{\sin\varphi_2}{\beta}\rho_2^{(5)}$	$-4\rho_6^{(5)}$	$\frac{4\cos\varphi_3}{\beta}\rho_4^{(5)}$	$-\frac{4\sin\varphi_3}{\beta}\rho_4^{(5)}$	◯	◯
$\frac{4\cos\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_2\rho_5^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\sin\varphi_2\psi_2^{(4)}$	$\frac{\rho_2^{(5)}-\rho_1^{(5)}\cos\varphi_2}{\beta}$	$\frac{\rho_3^{(5)}+\rho_4^{(5)}\cos^2\varphi_2}{\beta}+\frac{2\beta}{\gamma^{(5)}}\psi_4^{(5)}\sin^2\varphi_2$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(5)}}\psi_4^{(5)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(5)}\right]\sin 2\varphi_2$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(5)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_3\rho_5^{(5)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_3\rho_5^{(5)}$	◯	◯
$-\frac{4\sin\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_2\rho_5^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\cos\varphi_2\psi_2^{(4)}$	$\frac{\sin\varphi_2}{\beta}\rho_2^{(4)}$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(4)}}\psi_4^{(4)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(4)}\right]\sin 2\varphi_2$	$2\beta\left[\frac{\psi_2^{(4)}}{\gamma^{(4)}}+\frac{\psi_4^{(4)}}{\gamma^{(4)}}\cos^2\varphi_2\right]+\frac{1}{\beta^2}\sin^2\varphi_2\rho_3^{(4)}$	◯	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(5)}}\sin\varphi_3\psi_2^{(5)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(5)}}\cos\varphi_3\psi_2^{(5)}$	◯	◯
◯	◯	$-4\rho_6^{(3)}$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(3)}$	◯	$2[\rho_1^{(4)}+\rho_2^{(4)}]$	$\frac{\rho_2^{(6)}-\rho_1^{(6)}\cos\varphi_3}{\beta}$	$\frac{\sin\varphi_3}{\beta}\rho_2^{(6)}$	$-4\rho_6^{(4)}$	$\frac{4\cos\varphi_4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$-\frac{4\sin\varphi_4}{\beta}\rho_4^{(4)}$
◯	◯	$\frac{4\cos\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(3)}$	$\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_2\rho_5^{(3)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(3)}}\sin\varphi_2\psi_2^{(3)}$	$\frac{\rho_2^{(6)}-\rho_1^{(6)}\cos\varphi_3}{\beta}$	$\frac{\rho_3^{(6)}+\rho_4^{(6)}\cos^2\varphi_3}{\beta}+\frac{2\beta}{\gamma^{(6)}}\psi_4^{(6)}\sin^2\varphi_3$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(6)}}\psi_4^{(6)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(6)}\right]\sin 2\varphi_3$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_4\rho_5^{(4)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_4\rho_5^{(4)}$
◯	◯	$-\frac{4\sin\varphi_2}{\beta}\rho_4^{(3)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_2\rho_5^{(3)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(3)}}\cos\varphi_2\psi_2^{(3)}$	$\frac{\sin\varphi_2}{\beta}\rho_2^{(3)}$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(6)}}\psi_4^{(6)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(6)}\right]\sin 2\varphi_3$	$2\beta\left[\frac{\psi_2^{(6)}}{\gamma^{(6)}}+\frac{\psi_4^{(6)}}{\gamma^{(6)}}\cos^2\varphi_3\right]+\frac{1}{\beta^2}\sin^2\varphi_3\rho_3^{(6)}$	◯	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\sin\varphi_4\psi_2^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\cos\varphi_4\psi_2^{(4)}$
◯	◯	◯	◯	◯	$-4\rho_6^{(4)}$	$-\frac{4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	◯	$2[\rho_3^{(4)}+\rho_4^{(4)}]$	$\frac{\rho_2^{(6)}-\rho_3^{(6)}\cos\varphi_4}{\beta}$	$\frac{\sin\varphi_4}{\beta}\rho_2^{(6)}$
◯	◯	◯	◯	◯	$\frac{4\cos\varphi_4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2}\cos\varphi_4\rho_5^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\sin\varphi_4\psi_2^{(4)}$	$\frac{\rho_2^{(5)}-\rho_3^{(5)}\cos\varphi_4}{\beta}$	$\frac{\rho_2^{(5)}+\rho_3^{(5)}\cos^2\varphi_4}{\beta}+\frac{2\beta}{\gamma^{(5)}}\psi_4^{(5)}\sin^2\varphi_4$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(5)}}\psi_4^{(5)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(5)}\right]\sin 2\varphi_4$
◯	◯	◯	◯	◯	$-\frac{4\sin\varphi_4}{\beta}\rho_4^{(4)}$	$-\frac{2}{\beta^2}\sin\varphi_4\rho_5^{(4)}$	$-\frac{2\beta}{\gamma^{(4)}}\cos\varphi_4\psi_2^{(4)}$	$\frac{\sin\varphi_4}{\beta}\rho_2^{(5)}$	$\left[\frac{\beta}{\gamma^{(5)}}\psi_4^{(5)}-\frac{1}{2\beta^2}\rho_3^{(5)}\right]\sin 2\varphi_4$	$2\beta\left[\frac{\psi_2^{(5)}}{\gamma^{(5)}}+\frac{\psi_4^{(5)}}{\gamma^{(5)}}\cos^2\varphi_4\right]+\frac{1}{\beta^2}\sin^2\varphi_4\rho_3^{(5)}$

Безразмерные параметры в формулах (7)-(9), характеризующие взаимодействие трубопровода с грунтом (в продольном направлении):

$$\psi_1^{(i)} = \frac{ch\gamma_i \ell^{(i)}}{sh\gamma_i \ell^{(i)}}, \qquad (13)$$

$$\psi_2^{(i)} = \frac{1}{sh\gamma_i \ell^{(i)}}. \qquad (14)$$

4.11. Параметры нормальной жесткости системы в формулах (7)-(9)

$$\beta_0 = \sqrt[4]{\frac{C_{y.o} \cdot D_H}{4EJ}}; \quad \beta = \beta_0 r. \qquad (15)$$

Коэффициент нормального сопротивления грунта, кгс/см^3

$$C_{y.o} = \frac{0{,}012 E_{гр} \ell_{гр}}{(1-\mu_{гр}^2)\sqrt{D_H}} \left(1 - e^{-\frac{2h_o}{D_H}}\right). \qquad (16)$$

Параметры касательной жесткости системы

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi D_H C_{xo}}{EF}}; \quad \gamma = \gamma_0 r. \qquad (17)$$

4.12. Безразмерные значения кольцевых напряжений, осевого и эквивалентного усилий в стенках трубы для неподвижного сечения в формуле (10):

$$\overline{\sigma}_{кц} = \frac{P\pi D_{вн}^2}{2EF}, \tag{18}$$

$$\overline{N}_{сз} = -\alpha\Delta t + \mu\overline{\sigma}_{кц}, \tag{19}$$

$$\varepsilon = -\alpha\Delta t - (1-2\mu)\frac{\overline{\sigma}_{кц}}{2}. \tag{20}$$

4.13. Решается система линейных алгебраических уравнений (4)-(6), определяются обобщенные узловые усилия X. По последним определяются параметры, описывающие напряженно-деформированное состояние каждого элемента системы. Основными параметрами, характеризующими напряженно-деформированное состояние трубопровода, являются продольные перемещения, осевые продольные усилия, поперечные перемещения и изгибающие моменты.

Ниже приведены уравнения, описывающие изменение этих параметров по длине, полученные на основе решения дифференциальных уравнений равновесия конечного элемента, который находится в среде с двусторонними (продольными и поперечными) линейными связями под воздействием узловых усилий, температуры и внутреннего давления.

Уравнение продольных перемещений по длине трубопровода

$$U_{\xi}^{(i)} = \left(-X_{3i-3} + \frac{Z_1}{EF}E_{1(i)}\right)\frac{ch\gamma_i\ell^{(i)}(1-\xi)}{\gamma_i sh\gamma_i\ell^{(i)}} + \left[X_{3i}\cos\varphi_i + X_{3i-1}\sin\varphi_i - \frac{Z_2}{EF}E_{2(i-1)}\right]\frac{ch\gamma_i\ell^{(i)}\xi}{sh\gamma_i\ell^{(i)}}\frac{\varepsilon}{\gamma_i}\left[sh\gamma_i\ell_{\xi}^{(i)} - \frac{chy_i\ell^{(i)}-1}{sh\gamma_i\ell^{(i)}}ch\gamma_i\ell_{\xi}^{(i)}\right] \tag{21}$$

Величина продольных перемещений положительна, если она направлена слева направо.

Уравнение продольных усилий в стенках трубы по длине трубопровода

$$N_{\xi}^{(i)}=\left[X_{3i-3}-\frac{Z_1}{EF}E_1(i)\right]\frac{sh\gamma_i\ell^{(i)}(1-\xi)}{sh\gamma_i\ell^{(i)}}+\left[X_{3i-1}\sin\varphi_i+X_{3i}\cos\varphi_i-\right.$$

$$\left.-\frac{Z_2}{EF}E_2(i-1)\right]\frac{sh\gamma_i\ell^{(i)}\xi}{sh\gamma_i\ell^{(i)}}-S\frac{sh\gamma_i\ell^{(i)}(1-\xi)+sh\gamma_i\ell^{(i)}\xi}{sh\gamma_i\ell^{(i)}}+\overline{N_{\infty}}. \qquad (22)$$

Здесь ξ безразмерная текущая координата ($\xi=\frac{x}{\ell_i}$) с началом отсчета на левом конце элемента; величина ξ изменяется от 0 до I. По уравнениям (2I), (22) производят вычисления для всех стержней, то есть при значениях $1\le i\le K+1$.

Величина продольных осевых усилий N_{ξ} положительна при растяжении.

Уравнение поперечных перемещений по длине трубопровода

$$V_{\xi}^{(i)}=\frac{1}{4Q^{(i)}\beta}\left\{e^{\beta_0\ell^{(i)}\xi}\left(A_0^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}\xi+B_0^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}\xi\right)+e^{-\beta_0\ell^{(i)}\xi}\left(C_0^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}\xi+\right.\right.$$

$$\left.+D_0^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}\xi\right)+e^{\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)}\left[A_1^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)+B_1^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)\right]+ \qquad (23)$$

$$\left.+e^{-\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)}\left[C_1^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)+D_1^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)\right]\right\}.$$

Величина поперечных перемещений $V_{\xi}^{(i)}$ положительна, если она направлена вниз от оси элемента.

Уравнение изгибающих моментов по длине трубопровода

$$M_{\xi}^{(i)}=-\frac{\beta}{2Q^{(i)}}\left\{e^{+\beta_0\ell^{(i)}\xi}\left(A_0^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}\xi-B_0^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}\xi\right)+\right.$$

$$+e^{-\beta_0\ell^{(i)}\xi}\left(D_0^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}\xi-C_0^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}\xi\right)+$$

$$+e^{+\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)}\left[A_1^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)-B_1^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)\right]+ \qquad (24)$$

$$\left.+e^{-\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)}\left[D_1^{(i)}\sin\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)-C_1^{(i)}\cos\beta_0\ell^{(i)}(1-\xi)\right]\right\}.$$

Величина изгибающего момента M_F положительна, если растянуты нижние волокна элемента.

В уравнениях (23) и (24) значения коэффициентов вычисляются по формулам

$$
\left.
\begin{aligned}
A_0^{(i)} &= X_{3i-5}\,\mu_1^{(i)} - \frac{1}{\beta}\,X_{3i-4}\,\mu_5^{(i)};\\
B_0^{(i)} &= X_{3i-5}\,\mu_2^{(i)} + \frac{1}{\beta}\,X_{3i-4}\,\mu_6^{(i)};\\
C_0^{(i)} &= X_{3i-5}\,\mu_3^{(i)} - \frac{1}{\beta}\,X_{3i-4}\,\mu_5^{(i)};\\
D_0^{(i)} &= X_{3i-5}\,\mu_4^{(i)} + \frac{1}{\beta}\,X_{3i-4}\,\mu_7^{(i)};\\
A_1^{(i)} &= X_{3i-2}\,\mu_1^{(i)} - \frac{1}{\beta}\left(X_{3i}\sin\varphi_i - X_{3i-1}\cos\varphi_i\right)\mu_5^{(i)};\\
B_1^{(i)} &= X_{3i-2}\,\mu_2^{(i)} + \frac{1}{\beta}\left(X_{3i}\sin\varphi_i - X_{3i-1}\cos\varphi_i\right)\mu_6^{(i)};\\
C_1^{(i)} &= X_{3i-2}\,\mu_3^{(i)} - \frac{1}{\beta}\left(X_{3i}\sin\varphi_i - X_{3i-1}\cos\varphi_i\right)\mu_5^{(i)};\\
D_1^{(i)} &= X_{3i-2}\,\mu_4^{(i)} + \frac{1}{\beta}\left(X_{3i}\sin\varphi_i - X_{3i-1}\cos\varphi_i\right)\mu_7^{(i)}.
\end{aligned}
\right\} \qquad (25)
$$

4.14. На первом этапе расчета в качестве характеристик линейно-упругих связей принимаются начальные коэффициенты пропорциональности между сопротивлениями грунта и перемещениями, то есть начальные коэффициенты нормального и касательного сопротивления грунта.

Далее производится учет физической нелинейности грунта при продольных перемещениях трубы. Для этого определяют продольные перемещения середины каждого элемента системы. Продольное перемещение вычисляется для середины каждого элемента по уравнению (21)

$$U_{cp}^{(i)} = \left| U^{(i)} \right| \text{ при } \xi = 0{,}5\,. \qquad (26)$$

4.15. Используя аналитическую зависимость сопротивления грунта от перемещения, по найденному перемещению определяют секущий коэффициент пропорциональности, то есть усредненный коэффициент касательного сопротивления грунта для каждого элемента

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{t_{пр}}{EF U_{ср}^{(i)}}}\ , \qquad (27)$$

где предельное сопротивление грунта продольным перемещениям трубопровода (кгс/см) определяется по формуле

$$t_{пр} = q_{тр} tg\,\varphi_{гр} + 2\gamma_{гр} C_н \pi D_н^2 tg\,\varphi_{гр} + 0{,}6\pi D_н C_{гр}\ . \qquad (28)$$

4.I6. Корректируются значения коэффициентов γ_i на каждом этапе расчета в следующей последовательности: вычисляется для всех элементов значение

$$\Omega^{(i)} = \frac{\gamma_0}{\gamma_i}\ , \qquad (29)$$

где γ_0 – начальный параметр касательного сопротивления грунта, определенный по формуле (I7);

γ_i – текущий (данного этапа расчета) параметр секущего модуля элемента, определенный по формуле (27).

Если $\Omega^{(i)} < 1$, то для данного элемента значение γ_i принимается равным γ_0 ; если $\Omega^{(i)} \geq 1$, то для данного значения γ_i принимается значение, вычисленное по формуле (27).

4.I7. По новым значениям коэффициентов (массиву коэффициентов) расчет повторяется заново, начиная с составления уравнений (4)-(6). Процесс продолжается до тех пор, пока для всех элементов не будет выполнено поставленное условие сходимости

$$\frac{\left|\gamma_i\ (\text{послед}) - \gamma_i\ (\text{предид})\right|}{\gamma_i\ (\text{послед})} \leq 0{,}1\ . \qquad (30)$$

4.I8. При выполнении условия (30) вычисляются значения продольных перемещений, продольных осевых усилий в стенке трубы, поперечных перемещений и изгибающих моментов. Рекомендуется вычисление производить для трех сечений каждого элемента: $\xi = 0;\ 0{,}5;\ 1$.

Определяется сечение, в котором имеет место наибольший изгибающий момент M_{ξ} и соответствующее ему продольное усилие N_{ξ}.

4.19. Эквивалентное продольное усилие в данном сечении трубопровода определяют по формуле

$$S = N - 0{,}5\,\sigma^{н}_{кц} F\,. \tag{31}$$

Изгибающий момент с учетом продольно-поперечного изгиба определяют по формуле

$$M_{деф} = \frac{M}{\sqrt{1 + S/S_{кр}}}\,, \tag{32}$$

где

$$S_{кр} = 2\sqrt{E\,\mathcal{Y}\,D_{н}\,C_{y.o}}\,. \tag{33}$$

4.20. В качестве предельного состояния для подземных компенсаторов-упоров принимается условие

$$\sigma^{н}_{пр} \leq \Psi_{3}\,\frac{C}{K_{н}}\,R^{н}_{2}\,, \tag{34}$$

где $\sigma^{н}_{пр}$ – максимальные продольные напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma^{н}_{пр} = \frac{N}{F} \pm \frac{M_{деф}}{W}\,; \tag{35}$$

Ψ_{3} – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла; он определяется по формулам:

при $\sigma^{н}_{пр} < 0$

$$\Psi_{3} = \sqrt{1 - 0{,}75\left(\frac{\sigma^{н}_{кц}}{\frac{C}{K_{н}}\,R^{н}_{2}}\right)^{2}} - 0{,}5\,\frac{\sigma^{н}_{кц}}{\frac{C}{K_{н}}\,R^{н}_{2}}\,; \tag{36}$$

при $\sigma_{пр}^{н} > 0$ $\quad \psi_3^{н} = 1$.

$\sigma_{кц}^{н}$ – кольцевые напряжения (кгс/см^2) от рабочего (нормативного) давления:

$$\sigma_{кц}^{н} = \frac{P D_{вн}^2}{2\delta}; \qquad (37)$$

$R_2^{н}$ – нормативное сопротивление металла труб, $R_2^{н} = \sigma_{тек}$;

C – коэффициент, который принимается равным 0,65 для категории В; 0,85 – для трубопроводов I и II категорий; равным I для III и IУ категории.

Коэффициент надежности принимается в соответствии с табл.I.

Таблица I

Условный диаметр трубопровода, мм	Значение коэффициента надежности $K_н$			
	Для газопроводов в зависимости от внутреннего давления (Р), кгс/см^2			Для нефтепроводов и нефтепродуктопроводов
	$P \leqslant 55$	$55 \leqslant P \leqslant 75$	$75 \leqslant P \leqslant 100$	
500 и менее	I,0	I,0	I,0	I,0
600–I000	I,05	I,05	I,05	I,0
I200	I,05	I,05	I,I	I,05
I400	I,05	I,I	I,I5	I,I

5. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ПОДЗЕМНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ-УПОРОВ НА ЭЦВМ (ПРОГРАММА "ШАГ-I")

5.I. Программа расчета напряженно-деформированного состояния подземных компенсаторов-упоров написана на языке "АЛГОЛ" с применением условных обозначений входного языка транслятора "МЭИ-3" для ЭЦВМ "Минск-22", "Минск-32", которые приведены в табл.2.

Таблица 2

Принятое обозначение в формулах	Идентификатор	Наименование параметров и массивов
K	K	Число узлов системы
i	I	Номер элемента
j	J	Целое положительное число
N_i	NI	Номер приближения
$E_{гр}$	EGR	Модуль деформации грунта
E	E	Модуль упругости стали
$\varphi_{гр}$	FI	Угол внутреннего трения грунта
Δt	DT	Температурный перепад
Z_1	$Z1$	Начальная внешняя осевая сила
Z_2	$Z2$	Конечная внешняя осевая сила
$\eta_{гр}$	$ETAG$	Безразмерный коэффициент
$\mu_{гр}$	$MJUG$	Коэффициент Пуассона грунта
$D_н$	DN	Наружный диаметр трубы
h_0	HO	Высота засыпки над трубой
$\gamma_{гр}$	$GAMMAG$	Объемная масса грунта
$C_н$	CN	Безразмерный коэффициент
$C_{гр}$	CGR	Сцепление грунта
$D_{вн}$	DYN	Внутренний диаметр трубы
α	$ALPHA$	Коэффициент линейного расширения
P_0	PO	Рабочее (нормативное) давление
F	F	Площадь сечения стенок трубы
r	R	Радиус инерции сечения
μ	MJU	Коэффициент Пуассона стали
J	IP	Момент инерции сечения трубы
$q_{тр}$	$KUTP$	Масса единицы длины трубопровода
$C_{х.о}$	CXO	Коэффициент касательного сопротивления грунта
β_0	BO	Параметр нормального сопротивления грунта
β	B	Безразмерный параметр
$C_{уо}$	CYO	Коэффициент нормального сопротивления грунта
$t_{пр}$	TPR	Предельное сопротивление грунта сдвигу

Продолжение табл.2

Принятое обозначение в формулах	Идентификатор	Наименование параметров и массивов
N_{co}	NS	Усилие в защемленном сечении
S	S	Эквивалентное осевое усилие
σ	SIGMA	Кольцевые напряжения
	R_1	Рабочие ячейки
	R_2	
	R_3	
	R_4	
	R_5	
	R_6	
	R_7	
	R_8	
	R_9	
	R_{10}	
Ω	OM	Безразмерный коэффициент
ℓ_i	L[/1:K+1/]	Длина элемента
γ_i	GAMMA[/1:K/]	Угол поворота
ρ_1	R_{01}	Вспомогательные функции
ρ_2	R_{02}	
ρ_3	R_{03}	
	N2	Рабочий массив
	R_{11}[/1:K+1/]	Рабочий массив
ρ_4	R_{04}[/1:K+1/]	Вспомогательные функции
ρ_5	R_{05}[/1:K+1/]	
ρ_6	R_{06}[/1:K+1/]	
μ_1	MjU_1[/1:K+1/]	
μ_2	MjU_2[/1:K+1/]	
μ_3	MjU_3[/1:K+1/]	
μ_4	MjU_4[/1:K+1/]	
μ_5	MjU_5[/1:K+1/]	
μ_6	MjU_6[/1:K+1/]	
μ_7	MjU_7[/1:K+1/]	
γ_0	NOP[/1:K+1/]	

Окончание табл.2

Принятое обозначение в формулах	Идентификатор	Наименование параметров и массивов
γ	N[/1:K+1/]	Вспомогательные функции
Ψ_1	PSI1[/1:K+1/]	
Ψ_2	PSI2[/1:K+1/]	
A	A[/1:3xK,1:3xK/]	Массив коэффициентов
X	X[/1:3xK/]	Массив неизвестных
P	P[/1:3xK/]	Массив свободных членов
U_ξ	UKSI[/1:K+1/]	Продольные перемещения
V_ξ	VKSI[/1:K+1/]	Поперечные перемещения
M_ξ	MKSI[/1:K+1/]	Изгибающий момент
N_ξ	NKSI[/1:K+1/]	Продольное осевое усилие
A_0	A_{01}[/1:K+1/]	Вспомогательные функции
B_0	B_{01}[/1:K+1/]	
C_0	C_{01}[/1:K+1/]	
D_0	D_{01}[/1:K+1/]	
A_1	A_1[/1:K+1/]	
B_1	B_1[/1:K+1/]	
C_1	C_1[/1:K+1/]	
D_1	D_1[/1:K+1/]	
	X_{3i} [/0:5/]	Вспомогательный массив для выборки корней
ξ	KSI	Текущая безразмерная координата

5.2. Задание входной информации производится следующим образом.

Исходные данные для расчета по программе "ШАГ-I" задаются в виде целых десятичных чисел (только для К) и реальных чисел (для всех остальных данных).

Реальные числа могут быть записаны либо в виде числа с плавающей запятой (мантисса - 7 цифр, знак порядка и порядок -

2 цифры), либо в виде числа с кодовой запятой (например, +I00,0). В этом случае порядок числа не задается. Представление реальных чисел в виде целого числа (без запятой) не допускается.

В I-м массиве задаются следующие исходные данные: K, $E_{гр}$, E, $\gamma_{гр}$, t^{o}, z_1, z_2; во 2-м массиве - $h_{гр}$, $\mu_{гр}$, $D_н$, h_o, $\gamma_{гр}$, $C_н$, $C_{гр}$, $D_{вн}$; в 3-м массиве - α, P_o, F, r, μ, J, $q_{гр}$, $C_{х.о}$; в 4-м - ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3, ..., ℓ_{K+1}; в 5-м массиве - φ_1, φ_2, φ_3, ..., φ_K.

5.3. Перфорация исходных данных.

Исходные данные набиваются массивами на одной перфоленте в цифровом коде "Минск-22". Все числа десятичные.

5.4. Печать результатов.

Результаты расчета по программе "ШАГ-I" печатают на БПМ и АЦПУ.

После ввода исходных данных, перед началом расчета, на БПМ печатают все исходные данные в том порядке, в каком они записываются и набиваются на перфоленту.

Затем печатается номер приближения /NI/, массив NOF, массив N2, массив N2 после сравнения с NOF, затем, если найдено решение, то печатается признак "22", а на АЦПУ - U_ξ, N_ξ, V_ξ, M_ξ.

5.5. Работа за пультом ЭВМ. (Инструкция написана для работы на ЭВМ "Минск-32" в режиме "совместимость"):

I) набрать на ПМ (пишущей машинке) задание для ЭВМ:

ВЫ- АААА; ПМ ◇ ↑АААА ↑ М22 ␣␣ 00000I0A$_{10}$ 0000◇

2) установить на фотоввод перфоленту с программой "ШАГ-I", при этом переключить фотоввод на пятидорожечный режим;

3) набрать директиву: ст -; I7777◇ (стирание МОЗУ);

4) набрать директиву: ВЦ ◇ (контр.сумма - 777.....7);

5) установить на фотоввод перфоленты "Вариант с исходными данными";

6) набрать директиву: ПУ - I746I◇ .

При этом происходит ввод перфоленты, начинается решение. Конец решения - останов I755I.

В начале решения возможен останов I753I. В этом случае необходимо выполнить следующие действия:

набрать директиву: 3Ч - I7530; 0◇ ;

набрать директиву: ПУ-I753I ◇ (решение будет продолжено).

Возможны остановы со следующими номерами:

0II6 - в SH /x/ при $|x| \geqslant 63\ ln 2$ (необходимо уменьшить L);

0III - в $EXp/x/$ при $|x| \geqslant 63\ ln 2$ (необходимо уменьшить L);

0I0I - массив не помещается в МОЗУ (необходимо уменьшить K);

В случае одного из этих остановов - исправить исходные данные и повторить решение.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Текст программы расчета на языке "АЛГОЛ"

-01-

ТРАНСЛЯТОР МЗИ-3

```
'BEGIN'
    'INTEGER'K,I,J,NI,,
    'REAL'EGR,E,FI,DT,Z1,Z2,ETAG,MJUG,DN,HO,GAMMAG,CN,CGR,DVN,
    ALPHA,PO,F,R,MJU,IP,KUTR,CX0,RO,S,CVO,TPR,NS,S,SIGMA,T,R1,
    R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8,R9,R10,OM,,
    INPUT(1,K,EGR,T,FI,DT,Z1,Z2),,
    OUTPUT(3,'(E')',K,EGR,E,FI,DT,Z1,Z2),,
    INPUT(1,ETAG,MJUG,DN,HO,GAMMAG,CN,CGR,DVN),,
    OUTPUT(3,'(E')',ETAG,MJUG,DN,HO,GAMMAG,CN,CGR,DVN),,
    INPUT(1,ALPHA,PO,F,R,MJU,IP,KUTR,CX0),,
    OUTPUT(3,'(E')',ALPHA,PO,F,R,MJU,IP,KUTR,CX0),,
    'BEGIN'
        'ARRAY'L(/1:K+1/),GAMMA(/1:K/),G,R01,R02,R03,N2,R11,R04
        ,R05,R06,MJU1,MJU2,MJU3,MJU4,MJU5,MJU6,MJU7(/1:K+1/),N0
        *K/),P(/1:3*K/),,
        'PROCEDURE'RECHAT,,
        'BEGIN'
            'ARRAY'DKSI,VKSI,MKSI,NKSI(/1:K+1/),A01,R01,C01,D01,
            A1,B1,C1,D1(/1:K+1/),X3I(/0:5/),,
            'REAL'KSI,,
            'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
            'BEGIN'
            'FOR'J:=0'STEP'1'UNTIL'5'DO'X3I(/J/):='IF'3*I-J'LT'1
            'OR'3*I-J'GT'3*K'THEN'0.0'ELSE'X(/3*I-J/),,
            'IF'NI=-1'THEN'
            'BEGIN'
            OUTPUT(4,'(T')',('(/:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:8:
            8:8:8:8:8:8:8:8:8:8
```

```
CNTRL'(4,'(/+CP'),I)
'END',,
'-DP'KS'I:=0.0'STEP'0.5'UNTIL'1.01'DO'
'BEGI'
R1:=A*SF(/I/)*L'/I/).,
R2:=SH(R1).,
R3:=PI*1.01.,
R4:=(EXP(R3)+EXP(-R3))/2.0.,
R5:=SH(R3).,
R6:=PI*(1.0-XSI).,
UKSI(/I/):=(-X3I(/3/)+('IF'I=/1'THEN'0.0'ELSE'Z1/(E*
F)))*(EXP(R6)+EXP(-R6))/(2.0*N(/I/)*R2)+(X3I(/0/)*CO
S(GAMMA(/I/))+Y3I(/1/)*SIN(GAMMA(/I/))-('IF'I=/K+1'T
HEN'0.0'ELSE'Z2/(E*F)))*R4/(N(/I/)*R3)-S/N(/I/)*(R5-
((EXP(R1)+EXP(-R1))/2.0-1.0)*R4/R2).,
UKSI(/I/):=UKSI(/I/)*R.,
'FOR'XSI:=0.5'STEP'R11(/I/):=UKS'(/I/).,
'KSI(/I/):=(-X3I(/3/)-('IF'I=/1'THEN'0.0'ELSE'Z1/(E*F
))*SH(R6)/R2+(X3I(/1/)*SIN(GAMMA'(/I/))+X3I(/0/)*COS
(GAMMA(/I/))-('IF'I=/K+1'THEN'0.0'ELSE'Z2/(E*F)))*R5
/R2-S*(SH(R4)*R5)/R2+NS.,
'KSI(/I/):=UKS'(/I/)*E*F.,
AU1(/I/):=Y3I(/5/)*MJU1(/I/)-X3I(/4/)*MJU5(/I/)/R.,
AU2(/I/):=X3I(/5/)*MJU2(/I/)+X3I(/4/)*MJU6(/I/)/R.,
AU3(/I/):=Y3I(/5/)*MJU3(/I/)-X3I(/4/)*MJU5(/I/)/R.,
AU4(/I/):=X3I(/5/)*MJU4(/I/)+X3I(/4/)*MJU7(/I/)/R.,
AU1(/I/):=X3I(/0/)*'JU1(/I/)-(-Y3I(/1/)*COS(GAMMA(/I/
))+Y3I(/0/)*SIN(GAMMA(/I/)))*MJU5(/I/)/R.,
AU2(/I/):=X3I(/0/)*'JU2(/I/)+(-X3I(/1/)*COS(GAMMA(/I/
))+Y3I(/0/)*SIN(GAMMA(/I/)))*MJU6(/I/)/R.,
AU3(/I/):=X3I(/0/)*'JU3(/I/)-(-X3I(/1/)*COS(GAMMA(/I/
```

```
))+X3I(/0/)*SIN(GAMMA(/I/)))*MJU5(/I/)/B.;
D1(/I/):=X3I(/2/)*MJU4(/I/)+(-X3I(/1/)*COS(GAMMA(/I/
))+X3I(/0/)*SIN(GAMMA(/I/)))*MJU7(/I/)/B.;
R1:=L(/I/)*KSI*80.;
R2:=SIN(R1).;
R3:=COS(R1).;
R4:=L(/I/)*(1.0-KSI)*80.;
R5:=SIN(R4).;
R6:=COS(R4).;
VKSI(/I/):=(EXP(R1)*(A01(/I/)*R2+B01(/I/)*R3)+EXP(-R
1)*(C01(/I/)*R2+D01(/I/)*R3)+EXP(R4)*(A1(/I/)*R5+B1(
/I/)*R6)+EXP(-R4)*(C1(/I/)*R5+D1(/I/)*R6))/(4.0*Q(/I
/)*B).;
VKSI(/I/):=VKSI(/I/)/80.;
MKSI(/I/):=(EXP(R1)*(A01(/I/)*R3-B01(/I/)*R2)+EXP(-R
1)*(D01(/I/)*R2-C01(/I/)*R3)+EXP(R4)*(A1(/I/)*R6-B1(
/I/)*R5)+EXP(-R4)*(D1(/I/)*R5-C1(/I/)*R6))*B/(-2.0*Q
(/I/)).;
MKSI(/I/):=MKSI(/I/)*E*F/80.;
R1:=UKSI(/I/).;
R2:=NKSI(/I/).;
R3:=VKSI(/I/).;
R4:=MKSI(/I/).;
'IF'NI=-1'THEN'
'BEGIN'
OUTPUT(4,'(T')','(:/:B:B:B:B:B:B:B:B:B:B')).;
OUTPUT(4,'(Z+00.2D')',KSI).;
OUTPUT(4,'(T')','(:B:B:B:B:B:B:B:B:B')).;
OUTPUT(4,'(Z+00.7D')',R1).;
OUTPUT(4,'(T')','(:B:B:B:B')).;
OUTPUT(4,'(Z+00.7D')',R2).;
```

```
                                                                  -`'-
                                                                  ''TP(T'Z,'(T'),'(:;:;:R;:R'),,
                                                                  ''TP(T'4,'(Z+R?.?D'),R3),,
                                                                  ;ITP(T(4,'(T'),'(:;:R;:R;:R'),,
                                                                  ''UTP(T'4,'(Z+R?.?D'),34)
                                                                  'E'D',,
                                                                  'E'D'
                                                                  'E'D',,
                                                              'E'D',,
                                                              I; U'(1,1),,
                                                              O;TPUT(?,'(F'),L),,
                                                              I'-UT(1,GA''A),,
                                                              OUTPUT(?,'(F'),GA''A),,
                                                              P;:=PI*3.141593/180.0,,
                                                              'FOR'J:=1'STEP'1'UNTIL'K'DO'GAMMA(/J/):=GA''A(/J/)*3.14
                                                              1593/180.0,,
                                                              CYO:=(1.0-EXP(-?.?*HO/O'))*0.12*EGR*ETAG/((1.0-MJUG**2)
                                                              *(1.0*SQRT(DN)),,
                                                              RO:=(FU?*D'/(4.?*?*IP))**0.25,,
                                                              R:=RO*D,,
                                                              TOR:=KUTR*T*N(F)+2.0*GAMMAG*PN*3.141593*DN**?*TAN(FI)+
                                                              0.6*3.141593*D'*EGR,,
                                                              SIGMA:=3.141593*RO*DVN**2/(2.0*5*F),,
                                                              R:=ALOGA*D',,
                                                              NO:=-D1+'JU'*SI'',,
                                                              S:=-D1-(1.0-?.?*'JU)*SIGMA/?.0,,
                                                              T:=SQRT(3.1'1593*DN*CKO/(F*F)),,
                                                              N:=0.,
                                                              'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'NOF(/I/):=I.
                                                              'U;OUTPUT(?,'(F'),NI),,
                                                              'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
                                                              'BEGIN'
```

```
      R1=SIN(T1)
      R2=COS(T1)
      R3=SIN(T2)
      R4=COS(T2)
      R5=SIN(T3)
      R6=(EXP(R2)+EXP(-R2))/2.0
      R7=SIN(T3)
      R8=COS(T3)
      R9=SIN(T1)
      R10=(EXP(R1)+EXP(-R1))/2.0
      Q(1)=-.5+(I-1)*.0
      PRINT 1,(Q(I),I=1,11)
    1 FORMAT(1X,11F6.1)
      PRINT 2
    2 FORMAT(' ')
      R11=(R6+R3)/3(1)
      R12=(R8-R4)/3(1)
      R13=(R5-R7)/Q(1)
      R14=R9/Q(1)
      R15=(R1*R7-R9*R8)/3(1)
      R16=(R1*R8+R9*R7)/3(1)
      R17=EXP(-T3)
      R18=SIN(T3)
      R19=COS(T3)
      R20=SIN(T2)
      R21=COS(T2)
      R22=SIN(T1)
      R23=COS(T1)
      R24=SIN(T3)
      R25=COS(T3)
      R26=SIN(T2)
      R27=COS(T2)
      R28=SIN(T1)
      R29=COS(T1)
      R30=EXP(-T3)
      R31=(R30+R17)/3(1)
      R32=(R30-R17)/3(1)
      R33=(R28*R25-R29*R26)/3(1)
      R34=(R28*R26+R29*R25)/3(1)
      R35=(R23*R19-R27*R20)/3(1)
      R36=(R23*R20+R27*R19)/3(1)
      R37=(R21*R17-R24*R18)/3(1)
      R38=(R21*R18+R24*R17)/3(1)
      R39=(R15*R35-R16*R36)/3(1)
      R40=(R15*R36+R16*R35)/3(1)
      R41=(R11*R37-R12*R38)/3(1)
      R42=(R11*R38+R12*R37)/3(1)
      R43=(R13*R39-R14*R40)/3(1)
      R44=(R13*R40+R14*R39)/3(1)
      R45=(R41*R31-R42*R32)/3(1)
      R46=(R41*R32+R42*R31)/3(1)
      R47=(R43*R33-R44*R34)/3(1)
      R48=(R43*R34+R44*R33)/3(1)
      R49=(R45*R33-R46*R34)/3(1)
      R50=(R45*R34+R46*R33)/3(1)
      R51=(R47*R31-R48*R32)/3(1)
      R52=(R47*R32+R48*R31)/3(1)
      R53=(R49*R35-R50*R36)/3(1)
      R54=(R49*R36+R50*R35)/3(1)
      R55=(R51*R37-R52*R38)/3(1)
      R56=(R51*R38+R52*R37)/3(1)
      R57=(R53*R39-R54*R40)/3(1)
      R58=(R53*R40+R54*R39)/3(1)
      R59=(R55*R41-R56*R42)/3(1)
      R60=(R55*R42+R56*R41)/3(1)
      R61=(R57*R43-R58*R44)/3(1)
      R62=(R57*R44+R58*R43)/3(1)
      R63=(R59*R45-R60*R46)/3(1)
      R64=(R59*R46+R60*R45)/3(1)
      R65=(R61*R47-R62*R48)/3(1)
      R66=(R61*R48+R62*R47)/3(1)
      R67=(R63*R49-R64*R50)/3(1)
      R68=(R63*R50+R64*R49)/3(1)
      R69=(R65*R51-R66*R52)/3(1)
      R70=(R65*R52+R66*R51)/3(1)
      R71=(R67*R53-R68*R54)/3(1)
      R72=(R67*R54+R68*R53)/3(1)
      R73=(R69*R55-R70*R56)/3(1)
      R74=(R69*R56+R70*R55)/3(1)
      R75=(R71*R57-R72*R58)/3(1)
      R76=(R71*R58+R72*R57)/3(1)
      R77=(R73*R59-R74*R60)/3(1)
      R78=(R73*R60+R74*R59)/3(1)
      R79=(R75*R61-R76*R62)/3(1)
      R80=(R75*R62+R76*R61)/3(1)
      R81=(R77*R63-R78*R64)/3(1)
      R82=(R77*R64+R78*R63)/3(1)
      R83=(R79*R65-R80*R66)/3(1)
      R84=(R79*R66+R80*R65)/3(1)
      R85=(R81*R67-R82*R68)/3(1)
      R86=(R81*R68+R82*R67)/3(1)
      R87=(R83*R69-R84*R70)/3(1)
      R88=(R83*R70+R84*R69)/3(1)
      R89=(R85*R71-R86*R72)/3(1)
      R90=(R85*R72+R86*R71)/3(1)
      R91=(R87*R73-R88*R74)/3(1)
      R92=(R87*R74+R88*R73)/3(1)
```

```
    MJU4(/I/):=R5-R4+R3.;
    MJU7(/I/):=R5-R3-1.0.;
    'END'.;
    N(/I/):=NOF(/I/)×R.;
    R1:=NOF(/I/)×L(/I/).;
    PSI1(/I/):=(EXP(R1)+EXP(-R1))/(2.0×SH(R1)).;
    PSI2(/I/):=1.0/SH(R1)
'END'.;
'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'3×K'DO''FOR'J:=1'STEP'1'UNTIL'3×
K'DO'A(/I,J/):=0.0.;
'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K'DO'
'BEGIN'
    A(/3×I-2,3×I-2/):=2.0×(R01(/I/)+R01(/I+1/)).;
    A(/3×I-2,3×I-1/):=A(/3×I-1,3×I-2/):=(R02(/I+1/)-R02(
    /I/)×COS(GAMMA(/I/)))/B.;
    A(/3×I-2,3×I/):=A(/3×I,3×I-2/):=SIN(GAMMA(/I/))×R02(
    /I/)/B.;
    A(/3×I-1,3×I-1/):=(R03(/I+1/)+R03(/I/)×(COS(GAMMA(/I
    /)))××2)/B××2+2.0×B×PSI1(/I/)×(SIN(GAMMA(/I/)))××2/N
    (/I/).;
    A(/3×I-1,3×I/):=A(/3×I,3×I-1/):=(B×PSI1(/I/)/N(/I/)-
    R03(/I/)/(2.0×B××2))×SIN(2.0×GAMMA(/I/)).;
    A(/3×I,3×I/):=2.0×B×(PSI1(/I+1/)/N(/I+1/)+PSI1(/I/)×
    (COS(GAMMA(/I/)))××2/N(/I/))+(SIN(GAMMA(/I/)))××2×R0
    3(/I/)/B××2
'END'.;
'FOR'I:=2'STEP'1'UNTIL'K'DO'
'BEGIN'
    A(/3×I-5,3×I-2/):=A(/3×I-2,3×I-5/):=-4.0×R06(/I/).;
    A(/3×I-5,3×I-1/):=A(/3×I-1,3×I-5/):=4.0×COS(GAMMA(/I
    /))×R04(/I/)/B.;
```

```
          -87-
    A(/3*I-5,3*I/):=A(/3*I,3*I-5/):=-4.0*SIN(GAMMA(/I/))
    *R04(/I/)/B.,
    A(/3*I-4,3*I-2/):=A(/3*I-2,3*I-4/):=-4.0*R04(/I/)/B.
    ,
    A(/3*I-4,3*I-1/):=A(/3*I-1,3*I-4/):=2.0*COS(GAMMA(/I
    /))*R05(/I/)/B**2.,
    A(/3*I-4,3*I/):=A(/3*I,3*I-4/):=-2.0*SIN(GAMMA(/I/))
    *R05(/I/)/B**2.,
    A(/3*I-3,3*I-1/):=A(/3*I-1,3*I-3/):=-2.0*B*SIN(GAMMA
    (/I/))*PSI2(/I/)/N(/I/).,
    A(/3*I-3,3*I/):=A(/3*I,3*I-3/):=-2.0*B*COS(GAMMA(/I/
    ))*PSI2(/I/)/N(/I/)
'END'.,
'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K'DO'
'BEGIN'
    P(/3*I-2/):=0.0.,
    R1:=NOF(/I/)*L(/I/).,
    R2:=R1/2.0.,
    R3:=SH(R1).,
    R4:=(EXP(R2)-EXP(-R2))/(EXP(R2)+EXP(-R2)).,
    R1:=NOF(/I+1/)*L(/I+1/).,
    R2:=R1/2.0.,
    R5:=SH(R1).,
    R6:=(EXP(R2)-EXP(-R2))/(EXP(R2)+EXP(-R2)).,
    P(/3*I-1/):=2.0*S*B*R4*SIN(GAMMA(/I/))/N(/I/)-('IF'I
    =/1'THEN'0.0'ELSE'Z1*2.0*B*SIN(GAMMA(/I/))/(E*F*N(/I
    /)*R3)).,
    P(/3*I/):=2.0*S*B*(R4*COS(GAMMA(/I/))/N(/I/)+R6/N(/I
    +1/))-('IF'I=/1'THEN'0.0'ELSE'Z1*2.0*B*COS(GAMMA(/I/
    ))/(E*F*N(/I/)*R3))-('IF'I=/K'THEN'0.0'ELSE'Z2*2.0*B
    /(E*F*N(/I+1/)*R5))
```

```
        'END',;
        J:=3*K.;
        SP(1,J,A).;
        SP(3,J,J,1,A,P,X).;
        PECHAT.;
        OUTPUT(3,'(E'),NOF).;
        'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'N2(/I/):=SQPT(TPR/(E*F*AB
        S(R11(/I/)))).;
        OUTPUT(3,'(E'),N2).;
        'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
        'BEGIN'
           OM:=N2(/I/)/NOF(/I/).;
           'IF'OM'GE'1'THEN'N2(/I/):=NOF(/I/).;
        'END'.;
        'FOR'I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
        'BEGIN'
           'IF'ABS(N2(/I/)-NOF(/I/))/N2(/I/)'GT'0.1'THEN'
           'BEGIN'
           NI:=NI+1.;
           OUTPUT(3,'(E'),N2).;
           'FOR'J:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'NOF(/J/):=N2(/J/).;
           STOP.;
           'GOTO'M
           'END'
        'END'.;
        OUTPUT(3,'(E'),22).;
        NI:=-1.;
        PECHAT.;
     'END'.;
     MSTOP:
  'END'.;
```

ТРАНСЛЯТОР МЭИ-3

```
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАМЯТИ:
K-ПЕРЕМ 'I'  АДРЕС:0101
I-ПЕРЕМ 'I'  АДРЕС:0102
J-ПЕРЕМ 'I'  АДРЕС:0103
NI-ПЕРЕМ 'I'  АДРЕС:0104
EGR-ПЕРЕМ 'R'  АДРЕС:0105
E-ПЕРЕМ 'R'  АДРЕС:0106
```

Контрольный пример расчета подземного компенсатора

Определим напряженно-деформированное состояние подземного компенсатора-упора трапецеидальной формы, геометрическая схема и размеры которого представлены на рис.5.*) Углы поворота выполнены из гнутых отводов с радиусом оси изгиба ρ = 7Iм для углов $\varphi = 45^0$ и ρ = 53м для углов $\varphi = 60^0$.

Газопровод, прокладываемый на участке II категории, выполнен из труб сечением I420xI7мм, имеющих предел текучести $\sigma_{тек} = 4200$ кгс/см^2, временное сопротивление металла труб $\sigma_{вр} = 5700$ кгс/см^2. Рабочее (нормативное) давление P = = 75 кгс/см^2, расчетный температурный перепад $\Delta t = +70^0$C. Глубина заложения газопровода (до оси трубы) h_0 = I70см.

Физико-механические характеристики грунта в контрольном примере: объемная масса $\gamma_{гр}$= I400 кг/м^3, угол внутреннего трения $\varphi_{гр}$ = 25^0, сцепление $C_{гр}$= 0, коэффициент Пуассона грунта $\mu_{гр}$= 0,2, обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта $C_{х.о}$ = 0,I9 кгс/см^3, модуль упругости грунта $E_{гр} = I00$ кгс/см^2, $k_{гр} = I$.

Модуль упругости металла труб $E = 0,2IxI0^7$ кгс/см^2, коэффициент линейного расширения металла $\alpha = 0,I2xI0^{-4}$ град$^{-I}$

Геометрические характеристики поперечного сечения трубы: радиус инерции $r = 0,496xI0^2$см, площадь сечения стенок $F = 750$ см^2, момент сопротивления сечения стенок W = = 2600 см^3, момент инерции $J = 0,I85IxI0^7$ см^4.

Масса единицы длины трубы $q_{тр} = 5,9$ кг/см. Коэффициент $C_н$ определяется по графику рис.2, при $\frac{h}{D_н} = \frac{I00}{I42}$ = = 0,7, $C_н = 0,35$. Величины Z_1 и Z_2 определяют согласно п.4.9 и 4.I2

$$\overline{\sigma}_{кц} = \frac{75 \cdot (I38,6)^2}{2 \cdot 0,2I \cdot I0^7 \cdot 750} = 0,I44 \cdot I0^{-3};$$

---

*) Рассматриваемый компенсатор-упор является лишь условным примером, иллюстрирующим задание входной информации к программе "ЕАГ-I" и нахождение напряжений в наиболее опасном сечении.

Геометрические параметры реального компенсатора в каждом конкретном случае должны выбираться на основании вариантного проектирования (п.2.8).

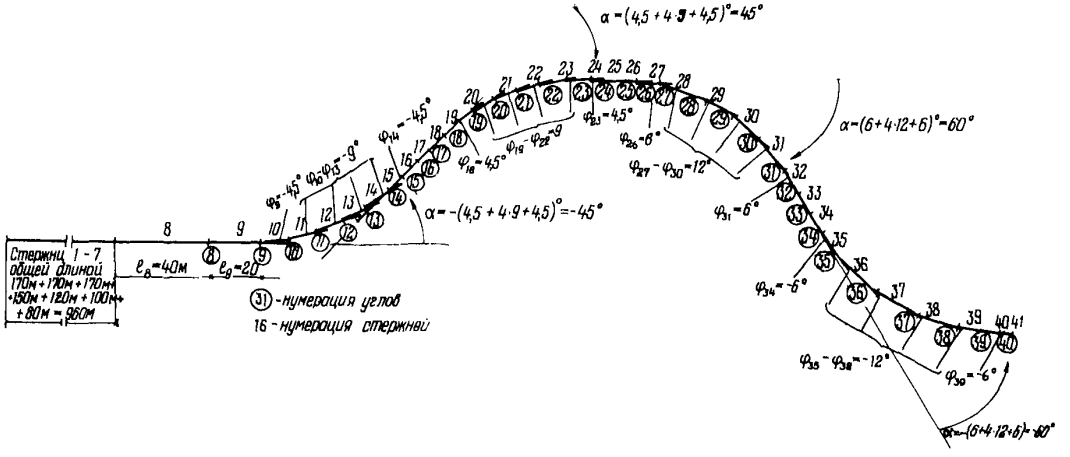

Рис.5. Геометрическая схема и размеры подземного компенсатора-упора для контрольного примера расчета на ЭВМ

$$S = -0{,}12\cdot10^{-4}\cdot70 - (1-2\cdot0{,}3)\,\frac{0{,}144\cdot10^{-3}}{2} = -0{,}113\cdot10^{-2};$$

$$Z_1 = -SER = 0{,}113\cdot10^{-2}\cdot0{,}21\cdot10^{7}\cdot750 = 0{,}178\cdot10^{7} \text{ кгс};$$

$$Z_2 = 0.$$

Узловые точки показаны кружками (см.рис.5), соответствующие длины конечных элементов (расстояния между узловыми точками) и углы между элементами приведены ниже:

$\ell_1 - \ell_3 = 0{,}17\cdot10^{5}$ (см); $\ell_4 = 0{,}15\cdot10^{5}$; $\ell_5 = 0{,}12\cdot10^{5}$; $\ell_6 = 0{,}1\cdot10^{5}$; $\ell_7 = 0{,}8\cdot10^{4}$; $\ell_8 = 0{,}4\cdot10^{4}$; $\ell_9 = 0{,}2\cdot10^{4}$; $\ell_{10} - \ell_{14} = 0{,}11147\cdot10^{4}$; $\ell_{15} - \ell_{18} = 0{,}7\cdot10^{8}$; $\ell_{19} - \ell_{23} = 0{,}11147\cdot10^{4}$; $\ell_{24} - \ell_{25} = 0{,}5\cdot10^{3}$; $\ell_{26} = 0{,}4\cdot10^{3}$; $\ell_{27} - \ell_{31} = 0{,}11147\cdot10^{4}$; $\ell_{32} - \ell_{34} = 0{,}7567\cdot10^{8}$; $\ell_{35} - \ell_{39} = 0{,}11147\cdot10^{4}$; $\ell_{40} - \ell_{41} = 0{,}35\cdot10^{8}$;

$\varphi_1 - \varphi_8 = 0$; $\varphi_9 = -4{,}5^0$; $\varphi_{10} - \varphi_{13} = -9^0$; $\varphi_{14} = -4{,}5^0$; $\varphi_{15} - \varphi_{17} = 0$; $\varphi_{18} = 4{,}5^0$; $\varphi_{19} - \varphi_{22} = 9^0$; $\varphi_{23} = 4{,}5^0$; $\varphi_{24} - \varphi_{25} = 0$; $\varphi_{26} = 6^0$; $\varphi_{27} - \varphi_{30} = 12^0$; $\varphi_{31} = 6^0$; $\varphi_{32} - \varphi_{33} = 0$; $\varphi_{34} = -6^0$; $\varphi_{35} - \varphi_{38} = -12^0$; $\varphi_{39} = -6^0$; $\varphi_{40} = 0$.

При вычислении углов и длин необходимо учесть замену отводов в углах компенсатора ломаной линией, состоящей из хорд данного сектора (п.4.5). Так в нашем случае каждый угол, входящий в компенсатор, разбит на 5 участков. Длину каждого из таких участков определяют по формуле (1)

$$\ell_{19-23} = 2\cdot71\cdot10^{2}\,\sin\frac{45^0}{2\cdot5} = 0{,}11147\cdot10^{4} \text{ см}.$$

Углы поворота вычисляют по формулам (2) и (3). Так например:

$$\varphi_{18} = \varphi_{23} = \frac{45}{2\cdot5} = 4{,}5^0 \text{ по формуле (2)}.$$

$$\varphi_{19} - \varphi_{22} = \frac{45}{2\cdot5} = 9^0 \text{ по формуле (3)}.$$

Далее производят расчет на ЭЦВМ по программе "НАГ-1" в соответствии с ранее изложенным алгоритмом и инструкцией по использованию программы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НА ЭЦВМ

Входная информация

+9999999+02	$E_{гр}$	+1399999+02	$T_{гг}$	+5899999+01	$q_{тр}$	+1999999+04	ℓ_9
+2099999+07	E	+3500000+00	$C_н$	+1899999+00	$C_{хо}$ гр	+1114700+04	ℓ_{10}
+2499999+02	$\varphi_{гр}$	+0000000+00	$C_{гр}$	+1700000+05	ℓ_1	+1114700+04	ℓ_{11}
+6999999+02	Δt	+1386000+03	$D_{бн}$ гр	+1700000+05	ℓ_2	+1114700+04	ℓ_{12}
+1773600+07	Z_1	+1200000+04	α	+1700000+05	ℓ_3	+1114700+04	ℓ_{13}
+0000000+00	$\frac{Z_2}{z_{гр}}$ гр*	+7500000+02	ρ	+1499999+05	ℓ_4	+1114700+04	ℓ_{14}
+9999999+00		+7500000+03	F	+1199999+05	ℓ_5	+6999999+03	ℓ_{15}
+1999999+00	$\mu_{гр}$	+4960000+02	r	+9999999+04	ℓ_6	+6999999+03	ℓ_{16}
+1420000+03	$\mathfrak{D}_м$	+2999999+00	μ	+6000000+04	ℓ_7	+6999999+03	ℓ_{17}
+1700000+03	h_0	+1851000+07	J	+3999999+04	ℓ_8	+6999999+03	ℓ_{18}

+1114700+04	ℓ_{19}	+1114700+04	ℓ_{29}	+1114700+04	ℓ_{39}	+0000000+00	φ_7
+1114700+04	ℓ_{20}	+1114700+04	ℓ_{30}	+3500000+03	ℓ_{40}	+0000000+00	φ_8
+1114700+04	ℓ_{21}	+1114700+04	ℓ_{31}	+3500000+03	ℓ_{41}	-4499999+01	φ_9
+1114700+04	ℓ_{22}	+7566999+03	ℓ_{32}			-8999999+01	φ_{10}
+1114700+04	ℓ_{23}	+7566999+03	ℓ_{33}	+0000000+00	φ_1	-8999999+01	φ_{11}
+4999999+03	ℓ_{24}	+7566999+03	ℓ_{34}	+0000000+00	φ_2	-8999999+01	φ_{12}
+4999999+03	ℓ_{25}	+1114700+04	ℓ_{35}	+0000000+00	φ_3	-8999999+01	φ_{13}
+3998999+03	ℓ_{26}	+1114700+04	ℓ_{36}	+0000000+00	φ_4	-4499999+01	φ_{14}
+1114700+04	ℓ_{27}	+1114700+04	ℓ_{37}	+0000000+00	φ_5	+0000000+00	φ_{15}
+1114700+04	ℓ_{28}	+1114700+04	ℓ_{38}	+0000000+00	φ_6	+0000000+00	φ_{16}

+0000000+00	φ_{17}	+1199999+02	φ_{27}	-1199999+02	φ_{37}
+4499999+01	φ_{18}	+1199999+02	φ_{28}	-1199999+02	φ_{38}
+8999999+01	φ_{19}	+1199999+02	φ_{29}	-6000000+01	φ_{39}
+8999999+01	φ_{20}	+1199999+02	φ_{30}	+0000000+00	φ_{40}
+8999999+01	φ_{21}	+6000000+01	φ_{31}		
+8999999+01	φ_{22}	+0000000+00	φ_{32}		
+4499999+01	φ_{23}	+0000000+00	φ_{33}		
+0000000+00	φ_{24}	-6000000+01	φ_{34}		
+0000000+00	φ_{25}	-1199999+02	φ_{35}		
+6000000+01	φ_{26}	-1199999+02	φ_{36}		

*Границы массивов входной информации.

Выходная информация

z	U, см	N, кгс	V, см	M кгс·см
1	2	3	4	5

i= +1

+0,00	+0,0000709	-644089,	8000000+0·0000000	+0,0000000
+0,50	+0,0000896	-644067,	5000000+0·0000000	+0,0000000
+1,00	+0,0000004	-644064,	3000000+0·0000000	+0,0000000

i= +2

+0,00	+0,0000813	-644064,	3000000+0·0000000	+0,0000000
+0,50	+0,0000003	-644063,	8000000+0·0000000	+0,0000000
+1,00	+0,0000810	-644062,	8000000-0·0000000	+0,0000000

i= +3

+0,00	+0,0000026	-644062,	8000000-0·0000000	+0,0000000
+0,50	+0,0000195	-644056,	6000000+0·0000000	+0,0000000
+1,00	+0,0001405	-644011,	8000000-0·0000000	+0,0000000

i= +4

+0,00	+0,0001424	-644011,	8000000+0·0000000	+0,0000000
+0,50	+0,0008110	-643767,	3000000+0·0000000	-0,0000011
+1,00	+0,0046196	-642375,	6000000+0·0000000	+0,0000000

i= +5

+0,00	+0,0046203	-642375,	6000000-0·0000000	+0,0000000
+0,50	+0,0185826	-637273,	1000000-0·0000000	-0,0005523
+1,00	+0,0767600	-616748,	2000000-0·0000001	+0,0026555

i= +6

+0,00	+0,0767609	-616748,	2000000+0·0000001	+0,0026555
+0,50	+0,2384620	-556936,	3000000+0·0000000	+0,2879551
+1,00	+0,7686122	-366156,	7000000+0·0000055	-33,5485100

i= +7

+0,00	+0,7686120	-366156,	7000000+0·0000051	-33,5485100
+0,50	+1,5736000	-270478,	8000000-0·0003365	-13,3286100
+1,00	+2,7259840	-94244,	9000000+0·0119716	+77107,1400000

i= +8

+0,00	+2,7259830	-94244,	9000000+0·0119712	+77107,1400000
+0,50	+3,4595150	-36143,	9900000-0·0980542	+370959,5000000
+1,00	+4,2759850	+36517,	2200000-0·0921529	-5483086,0000000

i= +9

+0,00	+4,2759860	+36517,	2100000-0·0921527	-5483086,0000000
+0,50	+4,7177580	+67442,	9400000+1·5011460	-9631616,0000000
+1,00	+5,1881440	+101477,	7000000+5·1214210	+9069172,0000000

i= +10

+0,00	+4,7683430	+101159,	2000000+5·5128640	+9069172,0000000
+0,50	+5,0291490	+118790,	2000000+7·4190100	+1692823,0000000
+1,00	+5,3023690	+137393,	5000000+8·9826520	+25337740,0000000

i= +11

+0,00	+3,0318860	+137976,	9000000+9·7015360	+25337740,0000000
+0,50	+4,1117220	+155665,	4000000010·1387400	+447940,5000000
+1,00	+4,3980490	+174614,	6000000010·2562000	+18003710,0000000

i= +12

+0,00	+2,7394650	+175436,	9000000010·8179400	+18003710,0000000
+0,50	+3,0325600	+193239,	3000000010·3191900	-4498989,0000000
+1,00	+3,3322700	+212870,	1000000+9·8918670	+16338040,0000000

i= +13

+0,00	+1,7438240	+212428,	5000000010·2913600	+16338040,0000000
+0,50	+2,0580170	+230461,	8000000+9·3496230	-1411152,0000000
+1,00	+2,3651140	+251448,	4000000+8·2391350	+20032670,0000000

i= +14

+0,00	+1,0420030	+251168,	3000000+8·5271250	+20032670,0000000
+0,50	+1,3619280	+269663,	9000000+6·6285516	-943576,1000000
+1,00	+1,6892770	+293139,	4000000+4·6199670	+5865849,0000000

i= +15

+0,00	+1,3215930	+293204,	5000000+4·7382640	+5865849,0000000
+0,50	+1,9311860	+305304,	4000000+3·3951170	-2404106,0000000
+1,00	+1,7456670	+319194,	6000000+2·1131800	-5851614,0000000

1	2	3	4	5

i= +16

+0,00	+1,7436630	+319194,6000000	+2·1131790	-5051614,0000000
+0,50	+1,9590420	+331053,8000000	+0·9817234	-4184630,0000000
+1,00	+2,1771510	+344301,7000000	-0·8217308	-1676909,0000000

i= +17

+0,00	+2,1771470	+344301,6000000	-0·8217305	-1676908,0000000
+0,50	+2,3980630	+356011,7000000	-0·9720824	+802200,4000000
+1,00	+2,6217090	+368859,5000000	-1·9435590	+1671236,8000000

i= +18

+0,00	+2,6217090	+368859,5000000	-1·9435580	+1671236,0000000
+0,50	+2,8480750	+380468,0000000	-2·9594020	-679164,7000000
+1,00	+3,0771280	+393042,9000000	-3·9408890	-7917670,0000000

i= +19

+0,00	+2,7584390	+393025,4000000	-4·1701690	-7917671,0000000
+0,50	+3,1285590	+411041,2000000	-5·4415310	-1538272,0000000
+1,00	+3,5054960	+431343,1000000	-6·4373340	-17903360,0000000

i= +20

+0,00	+2,6552750	+431748,7000000	-6·9064530	-17903360,0000000
+0,50	+2,8391060	+449876,4000000	-7·1017140	-467708,8000000
+1,00	+3,2298190	+470656,3000000	-7·0606800	-12758880,0000000

i= +21

+0,00	+2,0855220	+471166,0000000	-7·4790060	-12758880,0000000
+0,50	+2,4833190	+489462,2000000	-6·9866090	+2658827,0000000
+1,00	+2,8881490	+510972,7000000	-6·5115600	-11255800,0000000

i= +22

+0,00	+1,8339520	+510776,5000000	-6·8832000	-11255800,0000000
+0,50	+2,2457800	+529247,1000000	-6·0463850	+1397536,0000000
+1,00	+2,6648050	+551479,3000000	-5·1522200	-11308760,0000000

i= +23

+0,00	+1,8260420	+551836,7000000	-5·5056570	-11308760,0000000
+0,50	+2,2583730	+570367,0000000	-4·2360080	+4717170,0000000
+1,00	+2,6859810	+592804,5000000	-3·2255810	+2871857,0000000

i= +24

+0,00	+2,4246210	+593164,9000000	-3·4263770	+2871857,0000000
+0,50	+2,8216850	+601828,8000000	-3·8973600	+7913237,0000000
+1,00	+2,8201790	+611171,8000000	-2·8924680	+10333590,0000000

i= +25

+0,00	+2,8201770	+611171,8000000	-2·8924680	+10333590,0000000
+0,50	+3,0280920	+619727,7000000	-2·8509690	+10302970,8000000
+1,00	+3,2214130	+628871,6000000	-2·9724200	+7856410,0000000

i= +26

+0,00	+3,2214090	+628871,6000000	-2·9724210	+7856409,0000000
+0,50	+3,3834810	+635698,8000000	-3·1616420	+4096555,0000000
+1,00	+3,5464430	+642862,1000000	-3·3916830	-1371643,0000000

i= +27

+0,00	+3,1724850	+642213,9000000	-3·7438090	-1371646,0000000
+0,50	+3,6388060	+660379,9000000	-4·4290810	+1161957,0000000
+1,00	+4,0939910	+681011,8000000	-5·0834150	-14884680,0000000

i= +28

+0,00	+2,9495840	+681039,9000000	-5·8239350	-14884680,0000000
+0,50	+3,4216510	+699282,8000000	-5·8383920	-716308,7000000
+1,00	+3,9006530	+720249,4000000	-5·6320130	-10977370,0000000

i= +29

+0,00	+2,6444500	+720933,1000000	-6·5199320	-10977370,0000000
+0,50	+3,1306410	+739283,3000000	-5·7100970	+2057426,0000000
+1,00	+3,6238760	+760745,8000000	-5·1051800	-8877607,0000000

i= +30

+0,00	+2,4832580	+760613,0000000	-5·7470670	-8877607,0000000
+0,50	+2,9834960	+779040,4000000	-4·8595380	+1043487,0000000
+1,00	+3,4988530	+800864,3000000	-3·9195310	-9414975,0000000

i= +31

+0,00	+2,5996540	+800866,8000000	-4·5596700	-9414975,0000000
+0,50	+3,1141340	+819268,2000000	-3·2643470	+1271582,0000000
+1,00	+3,8357130	+841007,5000000	-1·9794770	-1747606,0000000

1	2	3	4	5

i= +32

+0,00	+3,4088850	+841088,5000000	-2.3486700	-1747606,0000000
+0,50	+3,7671490	+853770,7000000	-1.4792570	+2318387,0000000
+1,00	+4,1286120	+867724,7000000	-0.6866819	+3513850,0000000

i= +33

+0,00	+4,1286120	+867724,7000000	-0.6866820	+3513850,0000000
+0,50	+4,4952630	+880277,7000000	-0.0198126	+3362297,0000000
+1,00	+4,8610390	+893897,4000000	+0.5229827	+3152488,0000000

i= +34

+0,00	+4,8610500	+893897,4000000	+0.5229827	+3152488,0000000
+0,50	+5,2319870	+906358,6000000	+0.9462261	+3933918,0000000
+1,00	+5,6060220	+919739,9000000	+1.2185370	+6519308,0000000

i= +35

+0,00	+5,4479400	+919880,9000000	+1.7978510	+6519308,0000000
+0,50	+6,0045000	+937853,9000000	+1.8555770	+3453109,0000000
+1,00	+6,5677430	+957584,1000000	+1.5847720	+8060849,0000000

i= +36

+0,00	+6,0947270	+958330,5000000	+2.9156530	+8060849,0000000
+0,50	+6,6648950	+976256,0000000	+2.2078700	+1583839,0000000
+1,00	+7,2416920	+995792,9000000	+1.3114140	+4308407,0000000

i= +37

+0,00	+6,8107870	+996472,5000000	+2.7883890	+4308407,0000000
+0,50	+7,3944490	+1014356,0000000	+1.7013770	-325466,3000000
+1,00	+7,9847020	+1033718,0000000	+0.5927980	+2174647,0000000

i= +38

+0,00	+7,6869650	+1034168,0000000	+2.2399580	+2174647,0000000
+0,50	+8,2839650	+1052815,0000000	+1.0702970	-859474,2000000
+1,00	+8,8875170	+1071203,0000000	-0.0604898	+612562,5000000

i= +39

+0,00	+8,7058700	+1071727,0000000	+1.7886520	+612562,5000000
+0,50	+9,3161650	+1089540,0000000	+0.6786462	-1334963,0000000
+1,00	+9,9329710	+1108566,0000000	-0.3434360	-403139,1000000

i= +40

+0,00	+9,9144390	+1108521,0000000	+0.6967239	-403138,7000000
+0,50	+10,1094800	+1114230,0000000	+0.3870272	-415936,2000000
+1,00	+10,3051700	+1120049,0000000	+0.0805126	-268686,9000000

i= +41

+0,00	+10,3051700	+1120049,0000000	+0.0805128	-268686,8000000
+0,50	+10,5015000	+1125750,0000000	-0.2239005	-88093,6400000
+1,00	+10,6984700	+1131560,0000000	-0.5275566	-0,2389603

На основании результатов расчета на ЭВМ могут быть построены эпюры продольных U и поперечных V перемещений, продольного осевого усилия N и изгибающего момента M.

Далее проверяем выполнение условия (34). В качестве расчетного принимаем сечение, где наибольший изгибающий момент. Таким сечением является узел между I0 и II элементами, где $M = 0{,}253 \times 10^8$ кгс/см; $N = +0{,}137 \times 10^6$ кгс или $N = -0{,}138 \times 10^6$ кгс.

По формуле (37) определяют кольцевые напряжения от рабочего (нормативного) давления

$$\sigma^{н}_{кц} = \frac{75 \cdot 138{,}6}{2 \cdot 1{,}7} = 3050 \text{ кгс/см}^2.$$

По формуле (31) - эквивалентное продольное усилие для данного сечения

$$S = 0{,}138 \cdot 10^6 - 0{,}5 \cdot 3050 \cdot 750 = -1{,}0 \cdot 10^6 \text{ кгс}.$$

По формуле (16) определяют коэффициент нормального сопротивления грунта

$$C_{у.о} = \frac{0{,}012 \cdot 100 \cdot 1{,}0}{(1-0{,}2)^2 \sqrt{142}} \left(1 - \frac{-2 \cdot 170}{142}\right) = 0{,}0953 \text{ кгс/см}^3.$$

По формуле (33) находят критическое усилие

$$S_{кр} = 2\sqrt{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}185 \cdot 10^7 \cdot 142 \cdot 0{,}0953} = 14{,}4 \cdot 10^6 \text{ кгс}.$$

По формуле (32) - изгибающий момент с учетом продольно-поперечного изгиба

$$M_{деф} = \frac{0{,}253 \cdot 10^8}{\sqrt{1 + \frac{-1{,}0 \cdot 10^6}{14{,}4 \cdot 10^6}}} = 0{,}264 \cdot 10^8 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

По формуле (35) определяют наибольшие напряжения в сжатой зоне

$$\sigma^{н}_{пр} = \frac{0{,}137 \cdot 10^6}{750} - \frac{0{,}264 \cdot 10^8}{26000} = 180 - 980 = -800 \text{ кгс/см}^2$$

то же в растянутой зоне

$$\sigma_{пр}^{н} = \frac{0{,}138 \cdot 10^{6}}{750} + \frac{0{,}264 \cdot 10^{8}}{26000} = 180 + 980 = 1160 \text{ кгс/см}^2.$$

По формуле (36) находят коэффициент, учитывающий двухосное разнозначное состояние

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0{,}75 \left(\frac{3050 \cdot 1{,}1}{4200}\right)^2} - 0{,}5 \frac{3050 \cdot 1{,}1}{4200} = 0{,}32.$$

Вычисляем правую часть условия (34):

для сжатой зоны

$$\psi_3 \frac{C}{K_н} R_2^{н} = \frac{0{,}32 \cdot 1 \cdot 4200}{1{,}1} = 1220 \text{ кгс/см}^2;$$

для растянутой зоны

$$\frac{C}{K_н} R_2^{н} = \frac{1 \cdot 4200}{1{,}1} = 3820 \text{ кгс/см}^2.$$

Таким образом, для сжатой зоны $800 < 1220$ и для растянутой зоны $1160 < 3820$, то есть условие (34) выполнено, следовательно, данная конструкция удовлетворяет предельному состоянию.

Рассчитанный компенсатор-упор, предназначенный для уменьшения перемещений свободного конца, то есть сечения $\xi = 1$ для $i = 41$, дает согласно проведенному расчету величины продольных перемещений $U = 10{,}7$ см и поперечных перемещений $V = 0{,}53$ см, то есть полных перемещений $\sqrt{(10{,}7)^2 + (0{,}53)^2} = 10{,}72$ см.

При отсутствии компенсатора-упора величина аналогичных перемещений, подсчитанная по формуле (48а) "Указаний по проектированию и методике расчета магистральных газопроводов из труб диаметром 1420 мм" (ВСН 1-46-73) составляла бы 35 см.

Таким образом применение компенсатора-упора позволило уменьшить перемещение в 3,3 раза.

Однако рассмотренная для примера условная конструкция компенсатора не является наиболее рациональной. Путем изменения конструктивных параметров (длины концевого участка, углов компенсатора, вылета) и учитывая, что рассмотренная конструкция имеет некоторый запас по напряжениям, можно подобрать такую конструкцию, которая будет передавать значительно меньшие перемещения на свободный конец и удовлетворять при этом условию предельного состояния.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Конструктивные решения 3

3. Исходные данные для расчета 5

4. Расчетная схема, основные принципы и алгоритм расчета 8

5. Реализация метода расчета подземных компенсаторов-упоров на ЭЦВМ (программа "ПАГ-I")... 23

Приложения 29

РУКОВОДСТВО

по применению подземных компенсаторов-упоров при строительстве трубопроводов больших диаметров

Р 203-75

Редактор И.Р.Беляева Корректор А.А.Хоронова
Технический редактор Т.В.Березова

Подп. в печать 23/VIII.1976г. Формат 60х84/16
Печ.л. 3,5 Уч.-изд.л. 2,5 Усл.печ.л. 3,2
Тираж 500 экз. Цена 25 коп. Заказ 70

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru