

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

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 вариантового 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.Айбекидером, И.П.Петровым, инженерами С.К.Гильзяным и Г.А.Нациой.

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

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

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.1. 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, пучение 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

2.1. 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 15 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 трапецидальной, 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 трапецидальной 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. Трапецидальные компенсаторы-упоры проектируют с меньшим углом поворота оси трубопровода со стороны передачи усилия (порядка $25-45^{\circ}$) и большим углом поворота оси трубопровода (порядка $50-75^{\circ}$) со стороны, где величины продольных перемещений трубопровода ограничиваются проектом; углы поворота оси Z -образных компенсаторов устанавливают в пределах $45-75^{\circ}$.

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 6-12° 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 проводят расчет различных вариантов по нижеизложенной 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_H - наружный диаметр трубы, см;
- D_{BH} - внутренний диаметр трубы, см;
- δ -名义альная толщина стенки трубы, см;
- r - радиус инерции сечения стенок трубы, см;
- F - площадь сечения стенок трубы, см^2 ;

- W - момент сопротивления сечения стенок трубы, см³;
 J - момент инерции сечения стенок трубы, см⁴;
 α - коэффициент линейного расширения металла, град⁻¹;
 E - модуль упругости металла, кгс/см²;
 q_{tr} - масса единицы длины трубы, кг/см;
 R_z - нормативное сопротивление, кгс/см²;
 μ - коэффициент Пуассона для металла.

3.2. Физико-механические характеристики грунта:

- γ_{gr} - объемная масса, кг/см³;
 φ_{gr} - угол внутреннего трения, град;
 C_{gr} - сцепление, кгс/см²;
 E_{gr} - модуль деформации грунта, кгс/см²;
 ζ_{gr} - 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 трубам до стенки траншеи) к h_0 - расстоянию от верха засыпки до оси трубы;

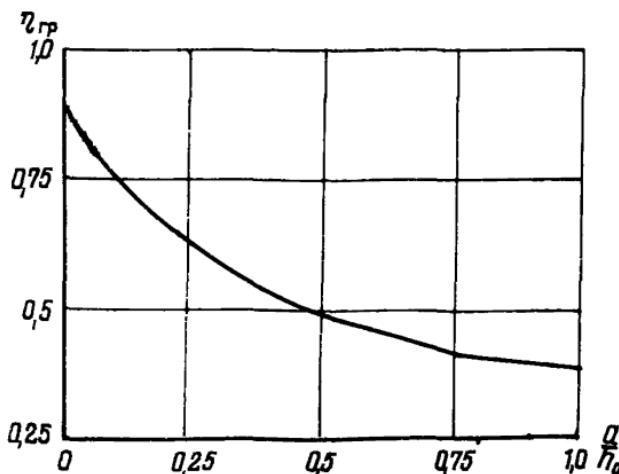
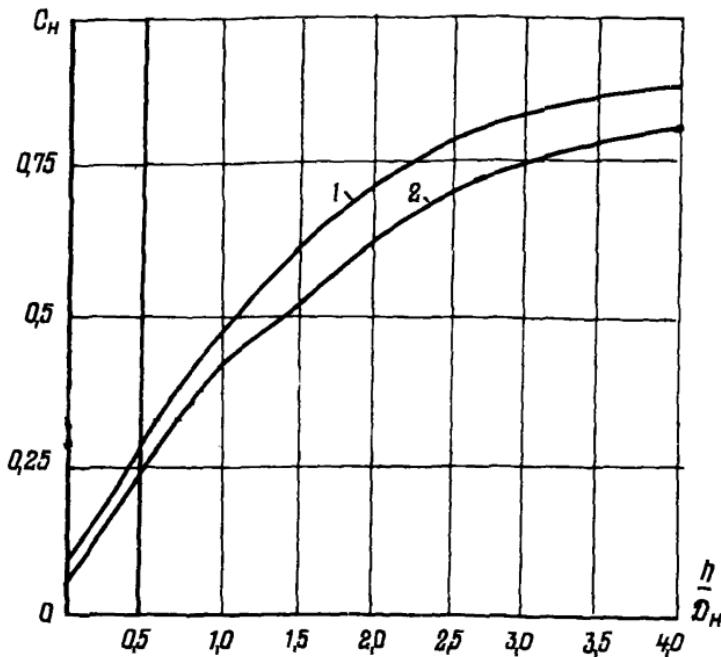


Рис. I. График для определения ζ_{gr}

C_H - коэффициент, учитывающий образование свода естественного равновесия, определяется по графику рис.2 в зависимости от отношения $\frac{h}{D_H}$ (расстояния от верха насмаки до верхней образующей трубы) к наружному диаметру трубы D_H ;



μ_{rp} - коэффициент Пуассона грунта. Для глин и твердых и полутвердых суглинков $\mu_{rp} = 0,1-0,15$; для тугопластичных суглинков $\mu_{rp} = 0,3-0,4$ и для текучих $\mu_{rp} = 0,45-0,5$; для супеси (в зависимости от консистенции) $\mu_{rp} = 0,15-0,30$; для песков $\mu_{rp} = 0,20-0,25$;

$C_{x,0}$ - обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта ($\text{кг}/\text{см}^2$). Для песчаных и супесчаных грунтов принимают

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

Причина. Модуль деформации грунта E_{gr} 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 ($h_0 = h + \frac{D_h}{2}$), см;

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

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

$R_{1,2,3,4,..}$ - радиус кривизны оси отводов, см.

3.4. Нагрузки и воздействия:

P - нормативное (рабочее) давление продукта, кгс/см²;

Δt - нормативный температурный перепад, °С, положительный при нагреваниях;

Z_1, 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 пре-небречь 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).

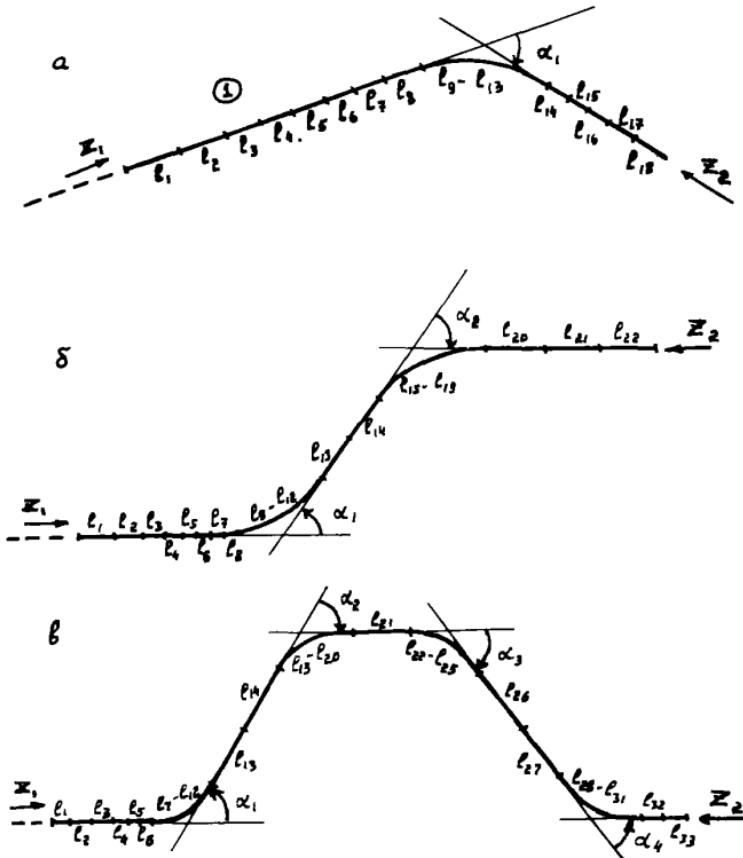


Рис.3. Схемы разбивки подземного трубопровода на элементы:
а-для угла поворота трассы; б-для Σ -образного компенсатора;
в-для трапециoidalного компенсатора

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 K или число элементов, равное $K + 1$, на которое разбивается вся система, в первую очередь определяется математическим обеспечением ЭВМ, в основном возможностью использования стандартных подпрограмм для решения линейных алгебраических уравнений порядка $8K$.

4.4. Первый прямолинейный участок трубы (см. рис. 3, б, в) рекомендуется разбивать на 6-11 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 18 (значения β_0 и γ_0 определяют по формулам (15) и (17)). Можно рекомендовать принимать $\ell_1 \approx 100 D_h$. Далее длины участков уменьшают пропорционально их номеру таким образом, чтобы длина последнего элемента на первом прямолинейном участке составляла 6-10 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 R_1 с углом поворота α_1 на совокупность n прямых.

Длину каждой прямой определяют по формуле

$$l_n = 2\rho_1 \sin \frac{\alpha_1}{2n} . \quad (1)$$

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

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

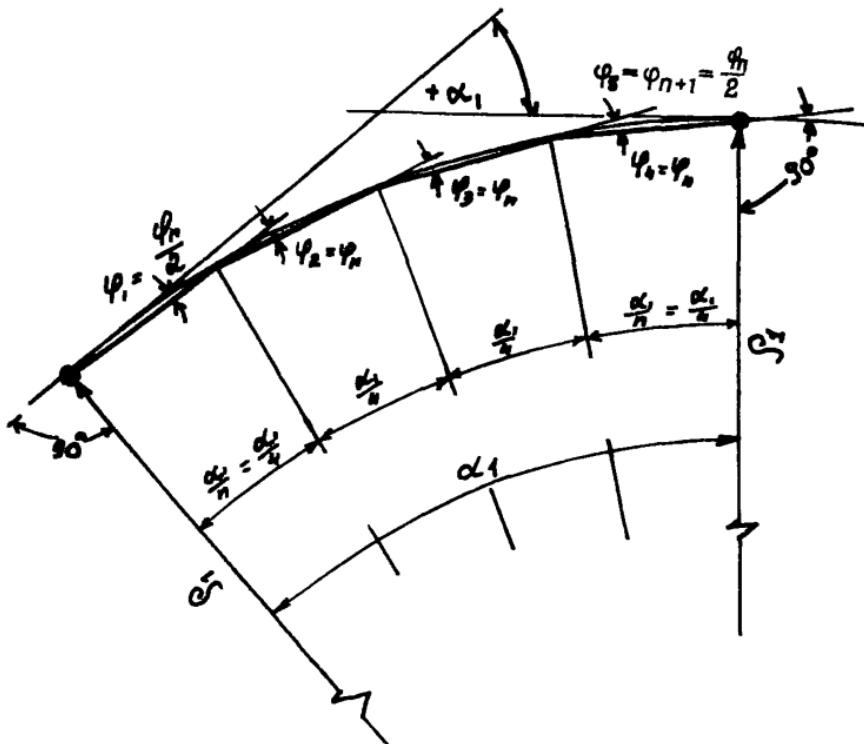


Рис.4. Схема замены кривой совокупностью прямых (для $n = 4$)

Углы поворотов остальных участков по формуле

$$\vartheta_2 = \vartheta_3 = \dots = \vartheta_n = \frac{\alpha_1}{n}. \quad (3)$$

(Все необходимые обозначения приведены на рис.4),

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

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 ϑ_i принимается положительным, если он образован вращением продолжения предыдущего элемента до направления последующего по часовой стрелке.

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

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

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

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

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:

$$\left. \begin{aligned} a_{(3i-2)(3i-5)} &= -4\beta_6^{(i)}; & a_{(3i-2)(3i-4)} &= -\frac{4}{\beta}\beta_4^{(i)}; \\ a_{(3i-2)(3i-3)} &= 0; & a_{(3i-2)(3i-2)} &= 2[\beta_1^{(i)} + \beta_1^{(i+1)}]; \\ a_{(3i-2)(3i-1)} &= \frac{1}{\beta} [\beta_2^{(i+1)} - \beta_2^{(i)} \cos \varphi_i]; & a_{(3i-2)(3i)} &= \frac{1}{\beta} \beta_2^{(i)} \sin \varphi_i; \\ a_{(3i-2)(3i+1)} &= -4\beta_6^{(i+1)}; & a_{(3i-2)(3i+2)} &= \frac{4}{\beta} \beta_4^{(i+1)} \cos \varphi_{i+1}; \\ a_{(3i-2)(3i+3)} &= -\frac{4}{\beta} \beta_4^{(i+1)} \sin \varphi_{i+1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{(3i-1)(3i-5)} &= \frac{4}{\beta} \beta_4^{(i)} \cos \varphi_i; & a_{(3i-1)(3i-4)} &= \frac{2}{\beta^2} \beta_5^{(i)} \cos \varphi_i; \\ a_{(3i-1)(3i-3)} &= -\frac{2\beta}{\gamma_i} \psi_2^{(i)} \sin \varphi_i; & a_{(3i-1)(3i-2)} &= \frac{1}{\beta} [\beta_2^{(i+1)} - \beta_2^{(i)} \cos \varphi_i]; \\ a_{(3i-1)(3i-1)} &= \frac{1}{\beta^2} [\beta_3^{(i)} \cos^2 \varphi_i + \beta_3^{(i+1)}] + \frac{2\beta}{\gamma_i} \psi_1^{(i)} \sin^2 \varphi_i; \\ a_{(3i-1)(3i)} &= \frac{1}{2} \sin 2\varphi_i \left[\frac{2\beta}{\gamma_i} \psi_1^{(i)} - \frac{1}{\beta^2} \beta_3^{(i)} \right]; \\ a_{(3i-1)(3i+1)} &= -\frac{4}{\beta} \beta_4^{(i+1)}; & a_{(3i-1)(3i+2)} &= \frac{2}{\beta^2} \beta_5^{(i+1)} \cos \varphi_{i+1}; \\ a_{(3i-1)(3i+3)} &= -\frac{2}{\beta^2} \beta_5^{(i+1)} \sin \varphi_{i+1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

Матрица свободных членов:

$$\left. \begin{aligned} p_{3i-2} &= 0; & p_{3i-1} &= \frac{2s\beta}{\gamma_i} \operatorname{th} \frac{\gamma_i l_i}{2} \sin \varphi_i - \frac{z_1}{EF} \frac{\sin \varphi_i}{\gamma_i \operatorname{sh} \gamma_i l_i} E_1(i); \\ p_{3i} &= 2s\beta \left(\frac{1}{\delta_i} \operatorname{th} \frac{\gamma_i l_i}{2} \cos \varphi_i + \frac{1}{\delta_{i+1}} \operatorname{th} \frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2} \right) - \\ &- \frac{z_1}{EF} \frac{\cos \varphi_i}{\gamma_i \operatorname{sh} \gamma_i l_i} E_1(i) + \frac{z_2}{EF} \frac{1 \cdot E_2(i)}{\gamma_{i+1} \operatorname{sh} \gamma_{i+1} l_{i+1}}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

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 прымкающей конструкции.

4.9. Невозвестное 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:

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

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

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

заглушки или угла поворота (пренебрегая отпором прымкающей 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):

$$\left. \begin{aligned} \rho_1^{(i)} &= \frac{\operatorname{sh} 2\beta_0 \ell^{(i)} + \sin 2\beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}} \\ \rho_2^{(i)} &= \frac{\operatorname{ch} 2\beta_0 \ell^{(i)} - \cos 2\beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\ \rho_3^{(i)} &= \frac{\operatorname{sh} 2\beta_0 \ell^{(i)} - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\ \rho_4^{(i)} &= \frac{\operatorname{sh} \beta_0 \ell^{(i)} \cdot \sin \beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\ \rho_5^{(i)} &= \frac{\operatorname{ch} \beta_0 \ell^{(i)} \cdot \sin \beta_0 \ell^{(i)} - \operatorname{sh} \beta_0 \ell^{(i)} \cdot \cos \beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}}; \\ \rho_6^{(i)} &= \frac{\operatorname{ch} \beta_0 \ell^{(i)} \cdot \sin \beta_0 \ell^{(i)} + \operatorname{sh} \beta_0 \ell^{(i)} \cdot \cos \beta_0 \ell^{(i)}}{Q^{(i)}}, \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

$$\left. \begin{aligned} Q^{(i)} &= \operatorname{ch} 2\beta_0 \ell^{(i)} + \cos 2\beta_0 \ell^{(i)} - 2 \\ \mu_1^{(i)} &= e^{-2\beta_0 \ell^{(i)}} + \cos 2\beta_0 \ell^{(i)} - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} - 2 \\ \mu_2^{(i)} &= e^{-2\beta_0 \ell^{(i)}} - \cos 2\beta_0 \ell^{(i)} - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} \\ \mu_3^{(i)} &= -e^{2\beta_0 \ell^{(i)}} - \cos 2\beta_0 \ell^{(i)} - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} + 2 \\ \mu_4^{(i)} &= e^{2\beta_0 \ell^{(i)}} - \cos 2\beta_0 \ell^{(i)} + \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} \\ \mu_5^{(i)} &= 2 \sin^2 \beta_0 \ell^{(i)} \\ \mu_6^{(i)} &= -e^{-2\beta_0 \ell^{(i)}} \\ \mu_7^{(i)} &= e^{2\beta_0 \ell^{(i)}} - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} + 1 \\ &\quad - \sin 2\beta_0 \ell^{(i)} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (I2)$$

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

$$\{X\} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ X_{11} \\ X_{12} \end{pmatrix} \quad \{P\} = \begin{pmatrix} \frac{2S\beta}{\gamma_1} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \sin \varphi_1 - \frac{2\beta z_1}{EF\gamma_1} \frac{\sin \varphi_1}{sh \theta^{(1)}} \\ 2S\beta \left[\frac{1}{\gamma_1} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \cos \varphi_1 + \frac{1}{\gamma_2} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \right] \frac{2\beta z_1 \operatorname{ctg} \theta^{(1)}}{EF\gamma_1 \sin \varphi_1} \\ \frac{2S\beta}{\gamma_2} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \sin \varphi_2 \\ 2S\beta \left[\frac{1}{\gamma_2} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \cos \varphi_2 + \frac{1}{\gamma_3} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \right] \\ \frac{2S\beta}{\gamma_3} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \sin \varphi_3 \\ 2S\beta \left[\frac{1}{\gamma_3} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \cos \varphi_3 + \frac{1}{\gamma_2} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \right] \\ \frac{2S\beta}{\gamma_4} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \sin \varphi_4 \\ 2S\beta \left[\frac{1}{\gamma_4} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \cos \varphi_4 + \frac{1}{\gamma_5} \operatorname{th} \frac{\theta^{(1)}}{2} \right] \frac{2\beta z_2}{EF\gamma_5} \frac{1}{sh \theta^{(1)}} \end{pmatrix}$$

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

$2[\dot{\beta}_1^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_2}{\beta}$	$\frac{\sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}}{\beta}$	$-4 \dot{\beta}_6^{(2)}$	$\frac{4 \cos \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	$-\frac{4 \sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	○	○	○	○	○	○	
$\dot{\beta}_2^{(1)} - \dot{\beta}_2^{(0)} \cos \Psi_2$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} + \dot{\beta}_2^{(1)} \cos^2 \Psi_2}{\beta} +$ $\frac{2 \dot{\beta}_2^{(1)} \beta^{(1)}}{\beta} + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_2$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(2)}$	$\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_2 \dot{\beta}_5^{(2)}$	$\frac{2}{\beta^2} \sin \Psi_2 \dot{\beta}_5^{(2)}$	○	○	○	○	○	○	○	
$\sin \Psi_2^{(1)}$	$\frac{2}{\beta} \dot{\beta}_2^{(0)} \Psi_2^{(1)} -$ $2 \dot{\beta}_2^{(1)} \left[\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} + \dot{\beta}_2^{(1)} \cos^2 \Psi_2}{\beta} + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_2 \right]$	○	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}$	○	○	○	○	○	○	○	
$-4 \dot{\beta}_6^{(2)}$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(2)}$	○	$2[\dot{\beta}_1^{(1)} + \dot{\beta}_1^{(2)}]$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_2}{\beta}$	$\frac{\sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}}{\beta}$	$-4 \dot{\beta}_6^{(3)}$	$\frac{4 \cos \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(3)}}{\beta}$	$-\frac{4 \sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(3)}}{\beta}$	○	○	○	
$\frac{4 \cos \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	$\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_2 \dot{\beta}_5^{(2)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_2^{(2)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_2}{\beta} +$ $\frac{2 \dot{\beta}_2^{(1)} \beta^{(1)}}{\beta} + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_2$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(3)}$	$-\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_3 \dot{\beta}_5^{(3)}$	$-\frac{2}{\beta^2} \sin \Psi_3 \dot{\beta}_5^{(3)}$	○	○	○	○	○	
$-\frac{4 \sin \Psi_2^{(1)} \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^2} \sin \Psi_2 \dot{\beta}_5^{(2)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_2 \dot{\beta}_2^{(2)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_2}{\beta} +$ $\frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(1)} \sin 2\Psi_2 + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_2$	○	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_3 \dot{\beta}_2^{(3)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_3 \dot{\beta}_2^{(3)}$	○	○	○	○	○	
○	○	○	$-4 \dot{\beta}_6^{(3)}$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(3)}$	○	$2[\dot{\beta}_1^{(1)} + \dot{\beta}_1^{(2)}]$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_3}{\beta}$	$\frac{\sin \Psi_3 \dot{\beta}_2^{(3)}}{\beta}$	$-4 \dot{\beta}_6^{(4)}$	$\frac{4 \cos \Psi_4 \dot{\beta}_4^{(4)}}{\beta}$	$-\frac{4 \sin \Psi_4 \dot{\beta}_4^{(4)}}{\beta}$	
○	○	○	$\frac{4 \cos \Psi_2 \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	$\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_3 \dot{\beta}_5^{(2)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_3 \dot{\beta}_2^{(2)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_3}{\beta} +$ $\frac{2 \dot{\beta}_2^{(1)} \beta^{(1)}}{\beta} + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_3$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(4)}$	$\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_4 \dot{\beta}_5^{(4)}$	$-\frac{2}{\beta^2} \sin \Psi_4 \dot{\beta}_5^{(4)}$	○	○	○
○	○	○	$-\frac{4 \sin \Psi_2 \dot{\beta}_4^{(2)}}{\beta}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^2} \sin \Psi_3 \dot{\beta}_5^{(2)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_3 \dot{\beta}_2^{(2)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_3}{\beta} +$ $\frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(1)} \sin 2\Psi_3 + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_3$	○	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(4)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(4)}$	○	○	○
○	○	○	○	○	○	$-4 \dot{\beta}_6^{(4)}$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(4)}$	○	$2[\dot{\beta}_1^{(4)} + \dot{\beta}_1^{(5)}]$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} - \dot{\beta}_2^{(1)} \cos \Psi_4}{\beta}$	$\frac{\sin \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(4)}}{\beta}$	
○	○	○	○	○	○	$\frac{4 \cos \Psi_4 \dot{\beta}_4^{(4)}}{\beta}$	$\frac{2}{\beta^2} \cos \Psi_5 \dot{\beta}_5^{(4)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \sin \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(4)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} + \dot{\beta}_2^{(1)} \cos^2 \Psi_4}{\beta} +$ $\frac{2 \dot{\beta}_2^{(1)} \beta^{(1)}}{\beta} + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_4$	$-\frac{4}{\beta} \dot{\beta}_4^{(5)}$	$-\frac{1}{2} \dot{\beta}_3^{(5)} \sin 2\Psi_4$	
○	○	○	○	○	○	$-\frac{4 \sin \Psi_4 \dot{\beta}_4^{(4)}}{\beta}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^2} \sin \Psi_4 \dot{\beta}_5^{(4)}$	$-\frac{2 \dot{\beta}}{\beta^{(2)}} \cos \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(4)}$	$\frac{\dot{\beta}_2^{(0)} + \dot{\beta}_2^{(1)} \cos^2 \Psi_4}{\beta} +$ $\frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(1)} \sin 2\Psi_4 + \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^{(2)} \sin^2 \Psi_4$	$\frac{\sin \Psi_4 \dot{\beta}_2^{(5)}}{\beta}$	$+\frac{1}{2} \dot{\beta}_3^{(5)} \sin^2 \Psi_4$	

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

$$\psi_i^{(i)} = \frac{ch \gamma_i^* \ell^{(i)}}{sh \gamma_i^* \ell^{(i)}}, \quad (13)$$

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

4.II. Параметры нормальной жесткости системы в формулах (7)–(9)

$$\beta_o = \sqrt{\frac{c_{y,o} \cdot D_H}{4E\gamma}}; \quad \beta = \beta_o r. \quad (15)$$

Коэффициент нормального сопротивления грунта, кгс/см³

$$c_{y,o} = \frac{0,012 E_{ep} \delta_{ep}}{(1 - \mu_{ep}^2) \sqrt{D_H}} \left(1 - e^{-\frac{2h_o}{D_H}} \right). \quad (16)$$

Параметры касательной жесткости системы

$$\gamma_o = \sqrt{\frac{\pi D_H c_{x,o}}{EF}}; \quad \gamma = \gamma_o r. \quad (17)$$

4.I2. Безразмерные значения колышевых напряжений, осевого и эквивалентного усилий в стенах трубы для неподвижного сечения в формуле (10):

$$\overline{\sigma}_{\kappa_4} = \frac{P_{\pi} D_{bh}^2}{2 E F}, \quad (18)$$

$$\overline{N}_c = -\alpha \Delta t + \mu \overline{\sigma}_{\kappa_4}, \quad (19)$$

$$S = -\alpha \Delta t - (1 - 2\mu) \frac{\overline{\sigma}_{\kappa_4}}{2}. \quad (20)$$

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

$$u_i^{(l)} = \left(-X_{3l-3} + \frac{Z_1}{E F} E_1(l) \right) \frac{ch y_i l^{(l)} (1 - \xi)}{y_i sh y_i l^{(l)}} + \left[X_{3i} \cos \varphi_i + \right. \\ \left. + X_{3i-1} \sin \varphi_i - \frac{Z_2}{E F} E_2(l-1) \right] \frac{ch y_i l^{(l)}}{sh y_i l^{(l)}} S \left[sh y_i l^{(l)} - \frac{ch y_i l^{(l)}}{sh y_i l^{(l)}} ch y_i l^{(l)} \right] \quad (21)$$

Величина продольных перемещений положительна, если она направлена слева направо.

Уравнение продольных усилий в стенках трубы по длине трубопровода

$$N_f^{(i)} = \left[X_{3i-3} - \frac{Z_1}{EF} E_1(t) \right] \frac{sh \gamma_i l^{(i)(1-\xi)}}{sh \gamma_i l^{(i)}} + \left[X_{3i-1}, \sin \varphi_i + X_i \cos \varphi_i \right] \\ - \frac{Z_2}{EF} E_2(t-1) \left[\frac{sh \gamma_i l^{(i)\xi}}{sh \gamma_i l^{(i)}} - s \frac{sh \gamma_i l^{(i)(1-\xi)} + sh \gamma_i l^{(i)\xi}}{sh \gamma_i l^{(i)}} + N_{\infty} \right]. \quad (22)$$

Здесь ξ безразмерная текущая координата ($\xi = \frac{x}{l_i}$) с началом отсчета на левом конце элемента; величина ξ изменяется от 0 до 1. По уравнениям (21), (22) производят вычисления для всех стержней, то есть при значениях $1 \leq i \leq K+1$.

Величина продольных осевых усилий N_f положительна при растяжении.

Уравнение поперечных перемещений по длине трубопровода

$$V_f^{(i)} = \frac{1}{4Q^{\text{max}} \beta} \left\{ e^{\beta_o l^{(i)} \xi} [A_o^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)\xi} + B_o^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)\xi}] + e^{-\beta_o l^{(i)} \xi} [C_o^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)\xi} + D_o^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)\xi}] + \right. \\ + D_o^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)\xi} + e^{\beta_o l^{(i)(1-\xi)}} [A_1^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)(1-\xi)} + B_1^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)(1-\xi)}] + \\ \left. + e^{\beta_o l^{(i)(1-\xi)}} [C_1^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)(1-\xi)} + D_1^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)(1-\xi)}] \right\}. \quad (23)$$

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

Уравнение изгибающих моментов по длине трубопровода

$$M_f^{(i)} = -\frac{\beta}{2Q^{\text{max}}} \left\{ e^{\beta_o l^{(i)} \xi} [A_o^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)\xi} - B_o^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)\xi}] + \right. \\ + e^{-\beta_o l^{(i)} \xi} [D_o^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)\xi} - C_o^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)\xi}] + \\ + e^{\beta_o l^{(i)(1-\xi)}} [A_1^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)(1-\xi)} - B_1^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)(1-\xi)}] + \\ \left. + e^{-\beta_o l^{(i)(1-\xi)}} [D_1^{(i)} \sin \beta_o l^{(i)(1-\xi)} - C_1^{(i)} \cos \beta_o l^{(i)(1-\xi)}] \right\}. \quad (24)$$

Величина магнитного момента M_f положительна, если растянуты нижние волокна элемента.

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

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

4.14. На первом этапе расчета в качестве характеристики 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)

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

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

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{t_{np}}{EFU_{cp}^{\omega}}} , \quad (27)$$

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

$$t_{np} = q_{tp} t_f \gamma_{rp} + 2 \gamma_{rp} C_H \pi D_H^2 t_f \gamma_{rp} + 0,6 \pi D_H C_H . \quad (28)$$

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

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

где γ_0 - начальный параметр касательного сопротивления грунта, определенный по формуле (17);

γ_i - текущий (данного этапа расчета) параметр секундного 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 элемента значение γ_i принимается значение, вычисленное по формуле (27).

4.17. 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

$$\frac{|\gamma_i \text{ (послед)} - \gamma_i \text{ (предыд)}|}{\gamma_i \text{ (послед)}} \leq 0,1 . \quad (30)$$

4.18. 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_{ζ} и соответствующее ему продольное усилие N_{ζ} .
 4.19. Эквивалентное продольное усилие в данном сечении трубопровода определяют по формуле

$$S = N - 0,5 G_{k_4}^H F . \quad (31)$$

Изгибающий момент с учетом продольно-поперечного изгиба определяют по формуле

$$M_{ges} = \frac{M}{\sqrt{1 + S/S_{kp}}} , \quad (32)$$

где

$$S_{kp} = 2 \sqrt{E Y D_H C_{y,0}} . \quad (33)$$

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

$$\sigma_{np}^H \leq \psi_3 \frac{C}{K_H} R_2^H , \quad (34)$$

где σ_{np}^H – максимальные продольные напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma_{np}^H = \frac{N}{F} \pm \frac{M_{ges}}{W} ; \quad (35)$$

ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла; он определяется по формулам:

при $\sigma_{np}^H < 0$

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{kp}^H}{\frac{C}{K_H} R_2^H} \right)^2} - 0,5 \frac{G_{k_4}^H}{\frac{C}{K_H} R_2^H} ; \quad (36)$$

при $\sigma_{np}^H > 0$ $\psi_3^H = 1$.

$\sigma_{kц}^H$ - кольцевые напряжения ($\text{кгс}/\text{см}^2$) от рабочего (нормативного) давления:

$$\sigma_{kц}^H = \frac{P D_{5H}^2}{2 \delta}; \quad (37)$$

R_2^H - нормативное сопротивление металла труб,

$$R_2^H = \sigma_{тек}^H;$$

C - коэффициент, который принимается равным 0,65 для категории В; 0,85 - для трубопроводов I и II категорий; равным 1 для III и IV категорий.

Коэффициент надежности принимается в соответствии с табл. I.

Таблица I

Условный диаметр трубопро- вода, мм	Значение коэффициента надежности K_H			
	Для газопроводов в зависимости от внут- реннего давления (P), $\text{кгс}/\text{см}^2$			Для неф- тепрово- дов и нефтепро- дуктопро- водов
	$P \leq 55$	$55 \leq P \leq 75$	$75 \leq P \leq 100$	
500 и менее	1,0	1,0	1,0	1,0
600-1000	1,05	1,05	1,05	1,0
1200	1,05	1,05	1,1	1,05
1400	1,05	1,1	1,15	1,1

5. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ПОДЗЕМНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ-УПОРОВ НА ЭЦВМ (ПРОГРАММА "ШАГ-1")

5.1. Программа расчета напряженно-деформированного состояния подземных компенсаторов-упоров написана на языке "АЛГОИ" 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 формулках	Идентификатор	Наменование параметров и массивов
K	K	Число узлов системы
i	i	Номер элемента
j	j	Целое положительное число
N_i	N_i	Номер приближения
E_{gr}	EGR	Модуль деформации грунта
E	E	Модуль упругости стали
φ_{tr}	FL	Угол внутреннего трения грунта
Δt	DT	Температурный перепад
Z_1	Z_1	Начальная внешняя осевая сила
Z_2	Z_2	Конечная внешняя осевая сила
ζ_{gr}	$ETAG$	Безразмерный коэффициент
μ_{gr}	MUG	Коэффициент Пуассона грунта
D_H	DN	Наружный диаметр трубы
h_0	HO	Высота засыпки над трубой
γ_{gr}	$GAMMAG$	Объемная масса грунта
C_H	CN	Безразмерный коэффициент
C_{gr}	CGR	Сцепление грунта
D_{vn}	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	MU	Коэффициент Пуассона стали
γ	IP	Момент инерции сечения трубы
q_{tr}	$KUTP$	Масса единицы длины трубопровода
$C_{x,0}$	CHO	Коэффициент касательного сопротивления грунта
β_0	BO	Параметр нормального сопротивления грунта
β	B	Безразмерный параметр
$C_{y,0}$	CYD	Коэффициент нормального сопротивления грунта
t_{np}	TPR	Предельное сопротивление грунта сдвигу

Продолжение табл.2

Принятое обозначение в формах	Идентификатор	Наименование параметров и массивов
N_{co}	NS	Усилие в защемленном сечении
S	S	Эквивалентное осевое усилие
σ	$SIGMA$	Кольцевые напряжения
	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}$	Рабочие ячейки
Ω	OM	Безразмерный коэффициент
ℓ_i	$L[1:K+1]$	Длина элемента
φ_i	$GAMMA[1:K]$	Угол поворота
ρ_1, ρ_2, ρ_3	R_{01}, R_{02}, R_{03}	Вспомогательные функции
	$N2$	Рабочий массив
	$R_{11}[1:K+1]$	Рабочий массив
ρ_4, ρ_5, ρ_6	$R_{04}[1:K+1], R_{05}[1:K+1], R_{06}[1:K+1]$	
μ_1, μ_2, μ_3	$MJU_1[1:K+1], MJU_2[1:K+1], MJU_3[1:K+1]$	Вспомогательные функции
$\mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_0$	$MJU_4[1:K+1], MJU_5[1:K+1], MJU_6[1:K+1], MJU_7[1:K+1], NOP[1:K+1]$	

Окончание табл.2

Принятое обозначение в форматах	Идентификатор	Наменование параметров и массивов
γ	$N[1: K+1]$	
ψ_1	$PSI1[1: K+1]$	
ψ_2	$PSI2[1: K+1]$	
A	$A[1: 3 \times K, 1: 3 \times K]$	Массив коэффициентов
X	$X[1: 3 \times K]$	Массив неизвестных
p	$P[1: 3 \times K]$	Массив свободных членов
U_x	$UKSI[1: K+1]$	Продольные перемещения
U_z	$UKSI[1: K+1]$	Поперечные перемещения
M_x	$MKSI[1: K+1]$	Изгибающий момент
N_T	$NKSI[1: K+1]$	Продольное осевое усилие
A_o	$A_{01}[1: K+1]$	
B_o	$B_{01}[1: K+1]$	
C_o	$C_{01}[1: K+1]$	
D_o	$D_{01}[1: K+1]$	
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-І" задаются в виде целых десятичных чисел (только для K) и реальных чисел (для всех остальных данных).

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

2 цифры), либо в виде числа с кодовой запятой (например, +100,0). В этом случае порядок числа не задается. Представление реальных чисел в виде целого числа (без запятой) не допускается.

В 1-м массиве задаются следующие исходные данные: K , E_{gr} , E , φ_{gr} , t^o , Z_1 , Z_2 ; во 2-м массиве - ζ_{gr} , μ_{gr} , D_H , h_o , γ_{gr} , C_H , C_{gr} , D_{BH} ; в 3-м массиве - α , P_o , F , r , μ , β , φ_{gr} , $C_{x.o}$; 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-1" 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_x , N_x , V_F , M_x .

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

1) набрать на ПМ (пимущей машинке) задание для ЭВМ:

ВЫ- ААААА; ПМ ◇ ♦ААААА + М22 — 0000010A₁₀ 0000 ◇

2) установить на фотоввод перфоленту с программой "ШАГ-1", при этом переключить фотоввод на пятидорожечный режим;

3) набрать директиву: ст - ; 17777 ◇ (стирание МОЗУ);

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

5) установить на фотоввод перфоленту "Варшант с исходными данными";

6) набрать директиву: ПУ - 17461 ◇ .

При этом происходит ввод перфоленты, начинается решение.

Конец решения - остановов 17551.

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

набрать директиву: 34 - I7530; 0Ф ;

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

Возможны остановы со следующими номерами:

0II6 - в $SH/x/$ при $|x| \geq 63 \ell n 2$ (необходимо уменьшить L);

0III - в $EX_p/x/$ при $|x| \geq 63 \ell n 2$ (необходимо уменьшить L);

0IOI - 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"

- 2 -

ТРАНСЛЯТОР МЗИ-3

```

        OUTPLT(4,"(Z+0.0)*1)
        X=H0*1,
        R0=R1*K0*1,0,PI*TERP0,5*H0*T1*1.01*DA'
        X=H0*1,
        R1=EXPT1/(1.0)*ELT1/(1.0),
        -21=SH(R1),
        -22=TERP1*X1,
        R4=(FYD(R3)+FMP(-R3))/2.0.,
        R5=SH(R2),
        -61=F1*(1.0-X1),
        UKST(/1/1):=(-Y7/(3/)+(1IF'1=1'THEN'1'0.0'ELSE'Z1/(EX
        F)))*((EXP(R6)+EXP(-R6))/(2.0*XH1/(1.0)*R2)+(X31/(0/)*C0
        S(GAMMA1/(1/))+Y31/(1/)*SIN(GAMMA1/(1/))-(1IF'1=K+1'T
        HEN'1'0.0'ELSE'Z2/(EXF)))*R4/(N/(1/)*R2)-S/N/(1/)*R5-
        ((EXP(R1)+EXP(-R1))/2.0-1.0)*R4/R2),
        UKST(/1/1):=UKST1/(1/1)*R,
        -17=PKS1*(1/1),
        UKST1/(1/1):=(Y7/(3/)-(1IF'1=1'THEN'1'0.0'ELSE'Z1/(EXF
        ))*XH2*R6)/R2+(X31/(1/)*SIN(GAMMA1/(1/))+Y31/(0/)*COS
        (GAMMA1/(1/))-(1IF'1=K+1'THEN'1'0.0'ELSE'Z2/(EXF)))*R5
        /R2-S*(SH(R6)+R5)/R2+NS,
        UKST1/(1/1):=PKS1*(1/1)*EXF,
        R011/(1/1):=Y31/(2/)*XH1U1/(1/)-X31/(4/)*M1J15/(1/1)*R,
        R011/(1/1):=Y31/(2/)*XH1U2/(1/)+X31/(4/)*M1J16/(1/1)*R,
        C016/(1/1):=Y31/(2/)*XH3U3/(1/)-X31/(4/)*M1J15/(1/1)*R,
        C016/(1/1):=Y31/(2/)*XH3U4/(1/)+X31/(4/)*M1J17/(1/1)*R,
        R11/(1/1):=Y31/(2/)*XH3U1/(1/)-(-Y31/(1/)*COS(GAMMA1/(1/
        1))+Y31/(2/)*SIN(GAMMA1/(1/)))*M1J15/(1/1)*R,
        R11/(1/1):=-X31/(2/)*XH2U2/(1/)+(-Y31/(1/)*COS(GAMMA1/(1/
        1))+Y31/(2/)*SIN(GAMMA1/(1/)))*M1J16/(1/1)*R,
        C11/(1/1):=Y31/(2/)*XH3U3/(1/)-(-Y31/(1/)*COS(GAMMA1/(1/

```

```

      -93-
) ) + X31(/2/) * SIN(GAMMA(/I/)) ) * MJU5(/1/) / B.,,
D1(/1/):=X31(/2/)-MJU4(/1/)+(-X31(/1/))*COS(GAMMA(/1/),
) ) + X31(/0/)*SIN(GAMMA(/I/))) * MJU7(/1/) / B.,
R1:=L(/1/)*KSI*B0.,
R2:=SIN(R1).,
R3:=COS(R1).,
R4:=L(/1/)*(1.0-KS1)*B0.,
R5:=SIN(R4).,
R6:=COS(R4).,
VKSI(/1/):=(EXP(R1)*(A01(/1/)*R2+B01(/1/)*R3)+EXP(-R
1)*(C01(/1/)*R2+D01(/1/)*R3)+EXP(R4)*(A1(/1/)*R5+B1(
/I/)*R6)+EXP(-R4)*(C1(/1/)*R5+D1(/1/)*R6))/(4.0*q(/1
/)*B.),,
VKSI(/1/):=VKSI(/1/)/B0.,
NKSI(/1/):=(EXP(R1)*(A01(/1/)*R3-B01(/1/)*R2)+EXP(-R
1)*(D01(/1/)*R2-C01(/1/)*R3)+EXP(R4)*(A1(/1/)*R6-B1(
/I/)*R5)+EXP(-R4)*(D1(/1/)*R5-C1(/1/)*R6))*5/(-2.0*q
(/1/)).,
MKSI(/1/):=NKSI(/1/)*E*x/F/B0.,
R1:=UKSI(/1/).,
R2:=NKSI(/1/).,
R3:=VKSI(/1/).,
R4:=MKSI(/1/).,
'IF N1=-1 THEN'
'BEGIN'
OUTPUT(4,'(T'),'(:;B:B:B:B:B:B:B)'),,
OUTPUT(4,'(Z+00.20'),KSI),,
OUTPUT(4,'(T'),'(:;B:B:B:B:B:B:B)'),,
OUTPUT(4,'(Z+00.70'),R1),,
OUTPUT(4,'(T'),'(:;B:B:B)'),,
OUTPUT(4,'(Z+00.70'),R2).'

```

```

      = 75 =
      INPUT(4,1)(T1),1(C3;B1;B1))..,
      INPUT(4,1)(Z+20,70),83),..,
      INPUT(4,1)(T1),1(C3;B1;B1))..,
      INPUT(4,1)(Z+20,70),84),
      ENDIF,..,
      ENDIF,
      ENDIF,..,
      ENDIF,..,
      IF(UT(1,1),..,
      OUTPUT(3,1)(50),L3),..,
      ENDIF(1,GAMMA),..,
      OUTPUT(3,1)(50),GAMMA),..,
      PI:=PI*3.141593/180.0.,.
      FORT(J)=1'STEPL'INTL/K+90/GAMMA(J/J);=GAMMA(J/J)*3.14
      1593/180.0.,.
      CY0:=(1.0-EXP(-2.0*H0/0.1))*0.12*EGR*FTAG*((1.0-MJUG**2)
      *1.0*FCRT(DV)),..,
      R0:=(CUD*0.1/(4.0*PI*IP))*0.25,..,
      R:=R0*P,,.
      T0:=FCRT*TAU*(E1*42.0*GAMMA*CN*3.141593*DNU**2*TAN(E1)+.
      2.0*3.141593*DNU*FCR),..,
      SIGMA:=3.141593*DNU**2/(2.0*E**2),..,
      R1:=ALPHA*D,,.
      R01:=-R1+M0*0.1*SIGMA,,.
      S1:=R1-(1.0-2.0*H0)*SIGMA/2.0.,.
      T1:=SQRT(3.141593*DNU*FCR/(E**2)),..,
      M1:=0.,.
      FORT(J)=1'STEPL'INTL/K+1'00/100/(10):=I,
      ENDIF(1,L3),..,
      FORT(J)=1'STEPL'INTL/K+1'00/
      PREST

```

```

- 85 -
' IF(K1EQ1)THEN'
  BEGIN
    R1:=3.0*I/(17),;
    R2:=2.0*R1,,;
    R3:=SIN(R2),;
    R4:=COS(R2),;
    R5:=SH(R2),;
    R6:=(EXP(R2)+EXP(-R2))/2.0,,;
    R7:=SIN(R1),;
    R8:=COS(R1),;
    R9:=SH(R1),;
    R10:=(EXP(R1)+EXP(-R1))/2.0,,;
    Q(17):=R5+R4-2.0,,;
    ' IF(Q(17)=0.0)THEN'
    BEGIN
      OUTPUT(3,'E'),11,I,,;
      GOTO'NEXTD';
    END;
    R01(I17):=(R5+R3)/Q(17),;
    R02(I17):=(R6-R4)/Q(17),;
    R03(I17):=(R5-R3)/Q(17),;
    R04(I17):=R02*R7/R03/2.0/I17,,;
    R05(I17):=(R1**R7-R04*R9)/2.0/I17,,;
    R06(I17):=(R10*R7+R04*R9)/2.0/I17,,;
    R6:=EXP(-R2),;
    R7:=1.0/R4,,;
    R101(I17):=R6+R4-R3-2.0,,;
    R105(I17):=R7**R7**2.0,,;
    R102(I17):=R6-R4-R3,,;
    R104(I17):=-R5+R3+1.0,,;
    R103(I17):=-R5-R4-R3+2.0,,;

```

```

-06-
MJIU4(/I/):=R5-R4+R3.,
"JU7(/I/):=R5-R3-1.0.,
'END',
N(/I/):=40F(/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)/3**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.,

```

```

      -^7-
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/
/))×P05(/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/))×PS12(/I/)/N(/I/),
A(/3×I-3,3×I/):=A(/3×I,3×I-3/):=-2.0×B×COS(GAMMA
(/I/))×PS12(/I/)/N(/I/),
END.,
FOR I:=1 TO F1 UNTIL K#D#;
IF C#N#0 THEN
  P(/3×I-2/):=0.0.,
  R1:=N0F(/I/)*I(/I/),
  R2:=R1/2.0.,
  R3:=SH(R1),
  R4:=(EXP(R2)-EXP(-R2))/(EXP(R2)+EXP(-R2)),
  R1:=N0F(/I+1/)*L(/I+1/),
  R2:=P1/2.0.,
  R3:=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×Y(/I
/))×R3)),
  P(/3×I/):=2.0×S×B×(R6×COS(GAMMA(/I/))/N(/I/)+R6/4(/I
/+1))-(IF'I#=1'THEN'0.0'ELSE'Z1×2.0×B×COS(GAMMA(/I/
/))/((E×F×Y(/I/))×R3))-(IF'I#=K'THEN'0.0'ELSE'Z2×2.0×B
/(E×F×Y(/I+1/))×R5));

```

-08-

```
'F ID',,
J:=3*K,,,
S0(1,J,A),,
S0(3,J,J,1,A,P,X),,
PECHAT,,,
OUTPUT(3,'(E'),N0F),,
'FOR' I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'N2(/I/):=SQRT(TPR/(E*x*xAB
S(R11(/I/))),,
OUTPUT(3,'(E'),N2),,
'FOR' I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
'REGIN'
    OM:=N2(/I/)/N0F(/I/),,
    'IF' OM'GE'1'THEN'N2(/I/):=N0F(/I/),,
'END',,
'FOR' I:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'
'REGIN'
    'IF' ABS(N2(/I/)-N0F(/I/))/N2(/I/)'GT'0.1'THEN'
        'REGIN'
            NI:=NI+1,,,
            OUTPUT(3,'(E'),N2),,
            'FOR' J:=1'STEP'1'UNTIL'K+1'DO'N0F(/J/):=N2(/J/),,
            STOP,,,
            'GOTO' I;
        'END'
    'END'
'END',,
OUTPUT(3,'(E'),22),,
NI:=-1,,,
PECHAT,,,
'END',,
NSTOP;
'END',,
```

ТРАНСЛЯТОР МЭИ-3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАМЯТИ:

К-ПЕРЕМ 'I' АДРЕС:0101
I-ПЕРЕМ 'I' АДРЕС:0102
J-ПЕРЕМ 'I' АДРЕС:0103
N1-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 трапецидальной формы, геометрическая схема и размеры которого представлены на рис.5.*). Углы поворота выполнены из гибких отводов с радиусом оси изгиба $\rho_c = 71\text{м}$ для углов $\varphi = 45^\circ$ и $\rho = 53\text{м}$ для углов $\varphi = 60^\circ$.

Газопровод, прокладываемый на участке II категории, выполнен из труб сечением $1420 \times 17\text{мм}$, имеющих предел текучести $\sigma_{tek} = 4200 \text{ кгс/см}^2$, временное сопротивление металла трубы $G_{sp} = 5700 \text{ кгс/см}^2$. Рабочее (нормативное) давление $P = 75 \text{ кгс/см}^2$, расчетный температурный перепад $\Delta t = +70^\circ\text{C}$. Глубина заложения газопровода (до оси трубы) $h_o = 170\text{см}$.

Физико-механические характеристики грунта в контрольном примере: объемная масса $\gamma_{rp} = 1400 \text{ кг/м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi_{rp} = 25^\circ$, сцепление $C_{rp} = 0$, коэффициент Пуассона грунта $\mu_{rp} = 0,2$, обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта $C_{x,o} = 0,19 \text{ кгс/см}^2$, модуль упругости грунта $E_{rp} = 100 \text{ кгс/см}^2$, $\zeta_{rp} = 1$.

Модуль упругости металла трубы $E = 0,21 \times 10^7 \text{ кгс/см}^2$, коэффициент линейного расширения металла $\alpha = 0,12 \times 10^{-4} \text{ град}^{-1}$.

Геометрические характеристики поперечного сечения трубы: радиус инерции $r = 0,496 \times 10^2 \text{ см}$, площадь сечения стенок $F = 750 \text{ см}^2$, момент сопротивления сечения стенок $W = 2600 \text{ см}^3$, момент инерции $I = 0,1851 \times 10^7 \text{ см}^4$.

Масса единицы длины трубы $\gamma_{tp} = 5,9 \text{ кг/см}$. Коэффициент C_H определяется по графику рис.2, при $\frac{h}{D_H} = \frac{100}{142} = 0,7$, $C_H = 0,35$. Величины Z_1 и Z_2 определяют согласно п.4.9 и 4.12

$$\bar{G}_{k4} = \frac{75 \cdot (138,6)^2}{2 \cdot 0,21 \cdot 10^7 \cdot 750} = 0,144 \cdot 10^{-3};$$

*). Рассматриваемый компенсатор-упор является лишь условным примером, иллюстрирующим задание входной информации к программе "ШАГ-1" и нахождение напряжений в наиболее опасном сечении.

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

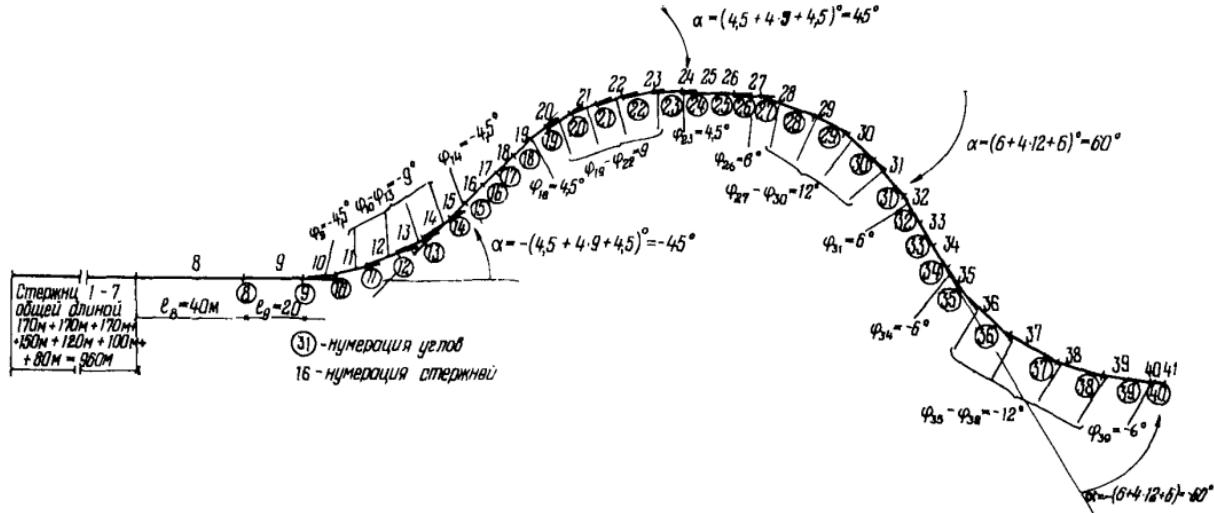


Рис.5. Геометрическая схема и размеры подземного компенсатора-упора для контрольного примера расчета на ЗВМ

$$S = -0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 70 - (1-2 \cdot 0,3) \frac{0,144 \cdot 10^{-3}}{2} = -0,113 \cdot 10^{-2};$$

$$Z_1 = -SER = 0,113 \cdot 10^{-2} \cdot 0,21 \cdot 10^7 \cdot 750 = 0,178 \cdot 10^7 \text{ кгс};$$

$$Z_2 = 0.$$

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

$$\begin{aligned} \ell_1 - \ell_3 &= 0,17 \cdot 10^5 \text{ (см)}; \quad \ell_4 = 0,15 \cdot 10^5; \quad \ell_5 = 0,12 \cdot 10^5; \\ \ell_6 &= 0,1 \cdot 10^5; \quad \ell_7 = 0,8 \cdot 10^4; \quad \ell_8 = 0,4 \cdot 10^4; \quad \ell_9 = 0,2 \cdot 10^4; \\ \ell_{10} - \ell_{14} &= 0,11147 \cdot 10^4; \quad \ell_{15} - \ell_{18} = 0,7 \cdot 10^3; \quad \ell_{19} - \ell_{23} = \\ &= 0,11147 \cdot 10^4; \quad \ell_{24} - \ell_{25} = 0,5 \cdot 10^3; \quad \ell_{26} = 0,4 \cdot 10^3; \quad \ell_{27} - \ell_{31} = \\ &= 0,11147 \cdot 10^4; \quad \ell_{32} - \ell_{34} = 0,7567 \cdot 10^3; \quad \ell_{35} - \ell_{39} = 0,11147 \cdot 10^4; \\ \ell_{40} - \ell_{41} &= 0,35 \cdot 10^3; \\ \varphi_1 - \varphi_8 &= 0; \quad \varphi_9 = -4,5^\circ; \quad \varphi_{10} - \varphi_{13} = -9^\circ; \quad \varphi_{14} = -4,5^\circ; \\ \varphi_{15} - \varphi_{17} &= 0; \quad \varphi_{18} = 4,5^\circ; \quad \varphi_{19} - \varphi_{22} = 9^\circ; \quad \varphi_{23} = 4,5^\circ; \\ \varphi_{24} - \varphi_{25} &= 0; \quad \varphi_{26} = 6^\circ; \quad \varphi_{27} - \varphi_{30} = 12^\circ; \quad \varphi_{31} = 6^\circ; \\ \varphi_{32} - \varphi_{33} &= 0; \quad \varphi_{34} = -6^\circ; \quad \varphi_{35} - \varphi_{38} = -12^\circ; \quad \varphi_{39} = -6^\circ; \\ \varphi_{40} &= 0. \end{aligned}$$

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, имеющийся в компенсаторе, разбит на 5 участков. Длину каждого из таких участков определяют по формуле (1)

$$\ell_{19-23} = 2 \cdot 71 \cdot 10^2 \sin \frac{45^\circ}{2 \cdot 5} = 0,11147 \cdot 10^4 \text{ см}.$$

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

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

$$\varphi_{19} - \varphi_{22} = \frac{45}{2 \cdot 5} = 9^\circ \text{ по формуле (3).}$$

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

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НА ЭВМ

Входная информация

+9999999+02 Еср	*1399999+02 Гг	+5899999+01 q _{тр}	+1999999+04 E _g
+299999+07 Е	*3500009+00 Си	+1899999+00 Сх _о 2р	+1114700+04 E ₁₀
+249999+02 Гр	*0000000+00 Сгр	+1700000+05 E ₁	+1114700+04 E ₁₁
+699999+02 Ат	*1386000+03 D _н	+1700000+05 E ₂	+1114700+04 E ₁₂
+1774600+07 Z ₁	*1200000+06 α	+1700000+05 E ₃	+1114700+04 E ₁₃
+0000000+00 Z ₂	*7500000+02 Р	+1499999+03 E ₄	+1114700+04 E ₁₄
+999999+00 Z _{2р}	*7500000+03 Р	+1199999+05 E ₅	+6999999+03 E ₁₅
+1999999+00 Мгр	*4960000+02 Г	+9999999+04 E ₆	+6999999+03 E ₁₆
+1420000+03 D _н	*2999999+00 М	+6800000+04 E ₇	+6999999+03 E ₁₇
+1700000+03 h ₀	*1851000+07 Џ	+3999999+04 E ₈	+6999999+03 E ₁₈

+1114700+04 E ₉	*1114700+04 E ₂₉	+1114700+04 E ₃₉	+0000000+00 Ψ ₇
+1114700+04 E ₂₀	*1114700+04 E ₃₀	+3500000+03 E ₄₀	+0000000+00 Ψ ₈
+1114700+04 E ₂₁	*1114700+04 E ₃₁	+3500000+03 E ₄₁	-4499999+01 Ψ ₉
+1114700+04 E ₂₂	*7566999+03 E ₃₂		-8999999+01 Ψ ₁₀
+1114700+04 E ₂₃	*7566999+03 E ₃₃	+0000000+00 Ψ ₁	-8999999+01 Ψ ₁₁
+4999999+03 E ₂₄	*7566999+03 E ₃₄	+0000000+00 Ψ ₂	-8999999+01 Ψ ₁₂
+4999999+03 E ₂₅	*1114700+04 E ₃₅	+0000000+00 Ψ ₃	-8999999+01 Ψ ₁₃
+39998999+03 E ₂₆	*1114700+04 E ₃₆	+0000000+00 Ψ ₄	-4499999+01 Ψ ₁₄
+1114700+04 E ₂₇	*1114700+04 E ₃₇	+0000000+00 Ψ ₅	+0000000+00 Ψ ₁₅
+1114700+04 E ₂₈	*1114700+04 E ₃₈	+0000000+00 Ψ ₆	+0000000+00 Ψ ₁₆

+00000000+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	+6000000+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

<u>3</u>	<u>U, см</u>	<u>N, кгс</u>	<u>V, см</u>	<u>M кгс·см</u>
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
+0,00	+0,00000709	-644089,8000000+0,0000000		+0,0000000
+0,50	+0,00000976	-644067,5000000+0,0000000		+0,0000000
+1,00	+0,00000864	-644064,3000000+0,0000000		+0,0000000
		i= +1		
+0,00	+0,00000113	-644064,3000000+0,0000000		+0,0000000
+0,50	+0,00000003	-644063,8000000+0,0000000		+0,0000000
+1,00	+0,00000010	-644062,5000000+0,0000000		+0,0000000
		i= +2		
+0,00	+0,00000226	-644062,5000000+0,0000000		+0,0000000
+0,50	+0,0000195	-644056,6000000+0,0000000		+0,0000000
+1,00	+0,00001605	-644011,8000000+0,0000000		+0,0000000
		i= +3		
+0,00	+0,00001424	-644011,8000000+0,0000000		+0,0000000
+0,50	+0,00001110	-643767,5000000+0,0000000		+0,0000011
+1,00	+0,000016196	-642375,6000000+0,0000000		+0,0000000
		i= +4		
+0,00	+0,0046283	-642375,6000000+0,0000000		+0,0000000
+0,50	+0,0183826	-637273,1000000+0,0000000		-0,0005523
+1,00	+0,0747600	-616748,2000000+0,0000001		+0,0026555
		i= +5		
+0,00	+0,0787609	-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= +6		
+0,00	+0,7686120	-366156,7000000+0,0000051		-33,5485100
+0,50	+1,5736000	-270478,8000000+0,0003365		-13,3206100
+1,00	+2,7259840	-94244,9000000+0,0119716		+77107,1400000
		i= +7		
+0,00	+2,7259840	-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= +8		
+0,00	+4,2759860	-36517,2100000-0,0921527		-5483086,0000000
+0,50	+6,7177500	+67442,9400000+1,5011460		-9631616,0000000
+1,00	+5,3881440	+101477,7000000+3,1214210		+9069172,0000000
		i= +9		
+0,00	+4,7623430	+101159,2000000+5,5120640		+9069172,0000000
+0,50	+5,0201490	+118790,2000000+7,4190100		+1692823,0000000
+1,00	+5,3023670	+137393,5000000+8,9826520+25337740,0000000		
		i= +10		
+0,00	+3,9318860	+137976,9000000+9,7015360+25337740,0000000		
+0,50	+4,1117220	+155665,400000010,1387400		+447940,5000000
+1,00	+4,3980490	+174614,600000010,2562000+18003710,0000000		
		i= +11		
+0,00	+2,7394650	+175436,900000010,8179400+18003710,0000000		
+0,50	+3,0325600	+193239,300000010,3191900		-4498989,0000000
+1,00	+3,3322780	+212870,1000000+9,8918670+16538040,0000000		
		i= +12		
+0,00	+1,7435240	+212420,500000010,2913600+16338040,0000000		
+0,50	+2,05980170	+230461,8000000+9,3496230		-1411152,0000000
+1,00	+2,3631440	+251448,4000000+8,2591350+20032670,0000000		
		i= +13		
+0,00	+1,0420030	+251168,3000000+8,5271250+20032670,0000000		
+0,50	+1,3619280	+269663,9000000+6,6285510		-943576,1000000
+1,00	+1,6892770	+293139,6000000+4,6199670		+5865849,0000000
		i= +14		
+0,00	+1,3215930	+293204,5000000+4,7382640		+5865849,0000000
+0,50	+1,3311860	+305304,4000000+3,3951170		-2404106,0000000
+1,00	+1,7436670	+319194,6000000+2,1131800		-5851614,0000000
		i= +15		

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

$\begin{matrix} & & & & \downarrow 16 \\ *0,00 & +1,7436630 & +319194,6000000 & +2,1131790 & -5051614,0000000 \\ *0,50 & +1,9590420 & +351053,8000000 & +0,9817234 & -4184630,0000000 \\ *1,00 & +2,1771510 & +344301,7000000 & -0,8217308 & -1676909,0000000 \\ & & & \downarrow 17 & \\ *0,00 & +2,1771470 & +344301,6000000 & -0,8217305 & -1676908,0000000 \\ *0,50 & +2,3980630 & +356011,7000000 & -0,9720824 & +802200,4000000 \\ *1,00 & +2,6217690 & +368859,9000000 & -1,9435590 & +1671236,0000000 \\ & & & \downarrow 18 & \\ *0,00 & +2,6217690 & +368859,5000000 & -1,9435580 & +1671236,0000000 \\ *0,50 & +2,8480750 & +380468,0000000 & -2,9394020 & -679164,7000000 \\ *1,00 & +3,0771280 & +393042,7000000 & -3,9408890 & -7917670,0000000 \\ & & & \downarrow 19 & \\ *0,00 & +2,7584390 & +393025,4000000 & -4,1701690 & -7917671,0000000 \\ *0,50 & +3,1285590 & +411041,2000000 & -5,4415310 & -1538272,0000000 \\ *1,00 & +3,5054560 & +431343,1000000 & -6,4373340 & -17903360,0000000 \\ & & & \downarrow 20 & \\ *0,00 & +2,6552750 & +431748,7000000 & -6,9064530 & -17903360,0000000 \\ *0,50 & +2,8391660 & +449876,4000000 & -7,1017140 & -467708,5000000 \\ *1,00 & +3,2298190 & +470656,3000000 & -7,0606800 & -12756880,0000000 \\ & & & \downarrow 21 & \\ *0,00 & +2,0855220 & +471166,0000000 & -7,4790060 & -12756880,0000000 \\ *0,50 & +2,4833130 & +489462,2000000 & -6,9866090 & +2658827,8000000 \\ *1,00 & +2,8881490 & +510972,7000000 & -6,5115600 & -11255800,0000000 \\ & & & \downarrow 22 & \\ *0,00 & +1,8339550 & +510776,5000000 & -6,8832000 & -11255800,0000000 \\ *0,50 & +2,2457800 & +529247,1000000 & -6,0463850 & +1397536,0000000 \\ *1,00 & +2,6684050 & +551479,3000000 & -5,1922200 & -11308760,0000000 \\ & & & \downarrow 23 & \\ *0,00 & +1,8260520 & +551836,7000000 & -5,5056570 & -11308760,0000000 \\ *0,50 & +2,2523730 & +570367,0000000 & -4,2360080 & +4717170,0000000 \\ *1,00 & +2,6859810 & +592804,7000000 & -3,2235810 & +2871857,0000000 \\ & & & \downarrow 24 & \\ *0,00 & +2,4246210 & +593164,9000000 & -3,4263770 & +2871857,0000000 \\ *0,50 & +2,8216850 & +601828,8000000 & -3,6973600 & +7913237,0000000 \\ *1,00 & +2,8201790 & +611171,8000000 & -2,8924680 & +10333590,0000000 \\ & & & \downarrow 25 & \\ *0,00 & +2,8201770 & +611171,8000000 & -2,8924680 & +10333590,0000000 \\ *0,50 & +3,0280920 & +619727,7000000 & -2,8509690 & +10302970,0000000 \\ *1,00 & +3,2214430 & +628871,6000000 & -2,9724200 & +7856410,0000000 \\ & & & \downarrow 26 & \\ *0,00 & +3,2286490 & +628871,6000000 & -2,9724210 & +7856409,0000000 \\ *0,50 & +3,3846410 & +635698,8000000 & -3,1516420 & +4096555,0000000 \\ *1,00 & +3,5464430 & +642862,1000000 & -3,3916830 & -1371643,0000000 \\ & & & \downarrow 27 & \\ *0,00 & +3,1724850 & +642213,9000000 & -3,7438090 & -1371646,0000000 \\ *0,50 & +3,6388060 & +660379,9000000 & -4,4290810 & +1161957,0000000 \\ *1,00 & +4,0959910 & +681011,8000000 & -5,0834150 & -14884680,0000000 \\ & & & \downarrow 28 & \\ *0,00 & +2,9495840 & +681039,2000000 & -5,8239350 & -14884680,0000000 \\ *0,50 & +3,4216510 & +699282,8000000 & -5,8383920 & -716308,7000000 \\ *1,00 & +3,9006530 & +720249,4000000 & -5,6320130 & -10977370,0000000 \\ & & & \downarrow 29 & \\ *0,00 & +2,6464500 & +720933,1000000 & -6,5199320 & -10977370,0000000 \\ *0,50 & +3,1306410 & +739283,3000000 & -5,7100970 & +2957426,0000000 \\ *1,00 & +3,6238760 & +760745,8000000 & -5,1031800 & -8877607,0000000 \\ & & & \downarrow 30 & \\ *0,00 & +2,4832580 & +760613,0000000 & -5,7470670 & -8877607,0000000 \\ *0,50 & +2,9834960 & +779040,4000000 & -4,8595380 & +1043487,0000000 \\ *1,00 & +3,4988550 & +800864,3000000 & -3,9195310 & -9414975,0000000 \\ & & & \downarrow 31 & \\ *0,00 & +2,5996540 & +800866,8000000 & -4,5596700 & -9414975,0000000 \\ *0,50 & +3,1141340 & +819268,2000000 & -3,2643470 & +1271582,0000000 \\ *1,00 & +3,6357150 & +841007,5000000 & -1,9794770 & -1747606,0000000$

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

$\text{Lz} = +32$
 $+0,00 +3,4088890 +841088,9000000 -2,3486700 -1747606,0000000$
 $+0,50 +3,7671490 +853770,7000000 -1,4792570 +2518387,0000000$
 $+1,00 +4,1286120 +867724,7000000 -0,6866819 +3513850,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +33$
 $+0,00 +4,1286120 +867724,7000000 -0,6866820 +3513850,0000000$
 $+0,50 +4,4992630 +880277,7000000 -0,0198126 +3362297,0000000$
 $+1,00 +4,8610390 +893897,4000000 +0,5229827 +3152488,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +34$
 $+0,00 +4,8610390 +893897,4000000 +0,5229827 +3152488,0000000$
 $+0,50 +5,2319870 +906358,6000000 +0,9662261 +3933918,0000000$
 $+1,00 +5,6060220 +919739,9000000 +1,2185370 +6519308,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +35$
 $+0,00 +5,6479400 +919880,9000000 +1,7978510 +6519308,0000000$
 $+0,50 +6,0045000 +937853,9000000 +1,8555770 +3453109,0000000$
 $+1,00 +6,3577430 +957584,1000000 +1,9847720 +8060849,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +36$
 $+0,00 +6,0947270 +958330,9000000 +2,9156530 +8060849,0000000$
 $+0,50 +6,6648950 +976256,0000000 +2,2078700 +1583839,0000000$
 $+1,00 +7,2416920 +995792,9000000 +1,3114140 +4308407,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +37$
 $+0,00 +6,8107870 +996472,9000000 +2,7883890 +4308407,0000000$
 $+0,50 +7,3944490 +1014356,8000000 +1,7013770 -325466,5000000$
 $+1,00 +7,9847020 +1033718,9000000 +0,3927980 +2174647,0000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +38$
 $+0,00 +7,9869650 +1034168,0000000 +2,2399580 +2174647,0000000$
 $+0,50 +8,2839650 +1052015,0000000 +1,0702970 -859474,2000000$
 $+1,00 +8,8275170 +1071203,0000000 -0,8604898 +612562,5000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +39$
 $+0,00 +8,7038700 +1071727,8000000 +1,7866520 +612562,5000000$
 $+0,50 +9,3161650 +1089540,8000000 +0,6786462 -1334963,0000000$
 $+1,00 +9,9329710 +1108566,0000000 -0,3434360 -403139,1000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +40$
 $+0,00 +9,9144390 +1108521,0000000 +0,6967239 -403138,1000000$
 $+0,50 +10,1094800 +1114230,0000000 +0,3870272 -415936,2000000$
 $+1,00 +10,3051700 +1120049,0000000 +0,0805126 -268686,9000000$
 $\quad \quad \quad \text{Lz} = +41$
 $+0,00 +10,3051700 +1120049,0000000 +0,0805126 -268686,9000000$
 $+0,50 +10,3015000 +1125750,0000000 -0,2239805 -88093,6400000$
 $+1,00 +10,6794700 +1131560,0000000 -0,5275566 -0,2389603$

На основании результатов расчета на ЭВМ могут быть построены эпюры продольных σ и поперечных U 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 $M = 0,253 \cdot 10^8$ кгс/см; $N = +0,137 \cdot 10^6$ кгс или $N = -0,138 \cdot 10^6$ кгс.

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

$$\sigma_{KU}^H = \frac{75 \cdot 138,6}{2 \cdot 1,7} = 3050 \text{ кгс/см}^2.$$

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

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

По формуле (33) находят критическое усилие

$$S_{kp} = 2 \sqrt{2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,1851 \cdot 10^7 \cdot 142 \cdot 0,0953} = 14,4 \cdot 10^6 \text{ кгс.}$$

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

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

По формуле (35) определяют наибольшие напряжения в скатой зоне

$$\sigma_{pp}^H = \frac{0,137 \cdot 10^6}{750} - \frac{0,264 \cdot 10^8}{26000} = 180 - 980 = -800 \text{ кгс/см}^2$$

то же в растянутой зоне

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

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

$$\Psi_3 = \sqrt{I - 0,75 \left(\frac{3050 \cdot I \cdot I}{4200} \right)^2} - 0,5 \frac{3050 \cdot I \cdot I}{4200} = 0,32.$$

Вычисляем правую часть условия (34):

для сжатой зоны

$$\Psi_3 \frac{C}{K_H} R_2^H = \frac{0,32 \cdot I \cdot 4200}{I \cdot I} = 1220 \text{ кгс/см}^2;$$

для растянутой зоны

$$\frac{C}{K_H} R_2^H = \frac{I \cdot 4200}{I \cdot I} = 3820 \text{ кгс/см}^2.$$

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 $\xi = I$ для $i = 4I$, дает согласно проведенному расчету величины продольных перемещений $U = 10,7 \text{ см}$ и поперечных перемещений $V = 0,53 \text{ см}$, то есть полных перемещений $\sqrt{(10,7)^2 + (0,53)^2} = 10,72 \text{ см}$.

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 I-46-73) составила 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

1. 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 ЭЦМ (программа "МАГ-1")...	23
Приложения	29

РУКОВОДСТВО

по применению подземных компенсаторов-упоров
при строительстве трубопроводов больших
диаметров

Р 203-75

Редактор И.Р.Беликова

Корректор А.А.Хоревский

Технический редактор Т.В.Беренкова

— 4- 28066 Недавно в печать 23/УИ.1976г. №ернаг 60х84/16
Неч.л. 3,5 Уч.-изд.л. 2,5 Усл.неч.л. 3,2
Тираж 500 экз. Цена 25 коп. Заказ №

Редакция ИИИСта