ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

ВНИИСТ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора института
по научной работе, к.т.н.
_____ Р.Д.Краулин
"16" _____ 1984 года.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ. МЕТОДЫ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА НА ЭВМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МНОГОПРОЛЕТНОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ПОДВИЖНУЮ НАГРУЗКУ

1-я редакция

Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

Разработаны: Всесоюзным научно-исследовательским институтом по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ)

Исполнители: И.С. Герштейн, В.Д. Фомичев

Методические рекомендации устанавливают метод расчета трубопроводов на действие движущейся с постоянной скоростью инерционной нагрузки, распределенной на некоторой конечной длине.

Рассмотрен трубопровод с осевой линией произвольной конфигурации, включающий прямолинейные и криволинейные участки, имеющий промежуточные опоры и участки с упругим основанием.

В методических рекомендациях описан метод решения задачи о действии подвижной нагрузки на трубопровод, дан алгоритм определения напряжений и перемещений в трубопроводе.

Программа расчета, составленная на языке ФОРТРАН применительно к ЕС ЭВМ, хранится во Всесоюзном научно-исследовательском институте по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ).

Методические рекомендации предназначены для работников НИИ, КБ и могут быть использованы при расчете динамических процессов в трубопроводах и стержневых системах при действии подвижной нагрузки.

I. ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

I.I. Геометрические и физические характеристики трубы:

$D_н$ – наружный диаметр, см;

δ – толщина стенки, см;

$\rho_т$ – плотность материала трубы, кг/см3;

E – модуль упругости материала трубы, МПа;

G – модуль сдвига материала трубы, МПа;

μ – коэффициент Пуассона материала трубы;

$i=\sqrt{\frac{J}{F}}$ – радиус инерции сечения трубопровода, см;

$J = \frac{3.14[D_н^4 - (D_н - 2\delta)^4]}{64}$ - момент инерции сечения трубы, см4;

$F = \frac{3.14[D_н^2 - (D_н - 2\delta)^2]}{4}$ - площадь сечения трубы, см2.

I.2. Конструктивные характеристики трубопровода:

N - число характерных участков, геометрия или конструкция которых отлична от соответствующих характеристик смежных с ним участков;

L_n - длина характерного участка, см;

$K_{1n} = R_{1n}^{-1}$ - начальная кривизна оси трубопровода в вертикальной плоскости на n - м участке;

R_{1n} - соответствующий радиус кривизны (n - номер характерного участка, отсчитываемый от начала рассматриваемой конструкции в направлении движения нагрузки);

$K_{2n} = R_{2n}^{-1}$ - начальная кривизна оси трубопровода в горизонтальной плоскости на n - м участке;

K_{3n} - начальное кручение оси трубопровода на n - м участке (см. п. 2.7).

I.3. Механические характеристики надземного трубопровода и упругого основания:

C_{1n}^{on} - жесткость опоры на конце n - го характерного участка в направлении, e_1, Н/см;

C_{2n}^{on} - жесткость опоры на конце n - го участка в направлении e_2, Н/см;

C_{3n}^{on} - жесткость опоры в направлении, e_3, Н/см3;

$C_{1n}^{осн}$ - жесткость основания в направлении, e_1, МПа;

$C_{2n}^{осн}$ - жесткость основания в направлении, e_2, МПа;

$C_{3n}^{осн}$ - жесткость основания в направлении, e_3, МПа.

I.4. Характеристики движущейся нагрузки:

$m_н$ - масса подвижной нагрузки на единицу длины, кг/см;

V - скорость движения нагрузки, см/с;

$L_н$ - длина нагрузки, см;

I.5. Кинематические и безразмерные параметры:

$\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3$ - перемещения упругой оси в проекциях на оси e_1, e_2, e_3;

φ_3 - угол поворота сечения вокруг продольной оси e_3;

$\bar{S}$ - продольная координата вдоль оси трубопровода от начала рассматриваемой в расчете конструкции, см;

$\bar{t}$ - время, сек;

$S = \bar{S}/L$ - безразмерная продольная координата;

$W_к = \bar{W}_к/i$ - безразмерные перемещения трубопровода;

$L = (\sum_{n=1}^{N} L_n)/N$ - средняя длина характерного участка, см (N - число участков);

$\bar{L}_n = L_n/L$ - безразмерная длина n - го характерного участка;

R_n - радиус кривизны трубопровода (R_{1n} или R_{2n});

$t = \bar{t}\, L^{-2}\sqrt{m_т/(E \cdot J \cdot 10)}$ - безразмерный параметр времени ($\bar{t}$ - время);

$\bar{q}_т = 980\, m_т d$ - безразмерная вертикальная нагрузка от массы трубы; $d = L^4/(10EJi)$

$\bar{V} = 3{,}14V/V_к$ - безразмерная скорость;

$V_к = 3{,}14\sqrt{10EJ/(m_т L^2)}$ - критическая скорость;

$\mathcal{R}_1 = K_1/L$; $\mathcal{R}_2 = K_2/L$; $\mathcal{R}_3 = K_3/L$;

$\bar{C}^{оп}_{1n} = C^{оп}_{1n} \cdot i \cdot d$; $\bar{C}^{оп}_{2n} = C^{оп}_{2n} \cdot i \cdot d$; $\bar{C}^{оп}_{3n} = C^{оп}_{3n} \cdot i \cdot d$;

$\bar{C}^{осн}_{1n} = C^{осн}_{1n} \cdot i \cdot d$ $\bar{C}^{осн}_{2n} = C^{осн}_{2n} \cdot i \cdot d$; $\bar{C}^{осн}_{3n} = C^{осн}_{3n} \cdot i \cdot d$;

$$H^{н} = \begin{cases} 1 - \text{на участке трубопровода, где находится движущаяся нагрузка;} \\ 0 - \text{во всех других случаях;} \end{cases}$$

$$H_n^{оп} = \begin{cases} 1 - \text{в месте действия } n \text{ - й опоры;} \\ 0 - \text{во всех других случаях;} \end{cases}$$

$$H_n^{осн} = \begin{cases} 1 - \text{на участке , имеющем упругое основание;} \\ 0 - \text{во всех других случаях;} \end{cases}$$

$\bar{q} = 980\, m_н\, d$ - безразмерная нагрузка от движущейся массы;

$$b = L/i; \qquad a = \bar{q}/q_т; \qquad e = L^2 \cdot F/J$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Основу расчета составляют дифференциальные геометрически нелинейные уравнения движения пространственно криволинейного стержня с соответствующими граничными и начальными условиями. Уравнения в перемещениях получены с учетом деформации осевого растяжения (сжатия), положительные направления перемещений показаны на рисунке I.

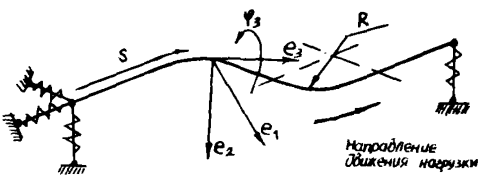


Рис. I

2.2. При расчете использована следующая система гипотез и предпосылок

Материал трубопровода изотропен и однороден.

Напряжения не превосходят предела упругости и связаны с деформациями законом Гука.

Поперечное сечение трубопровода в напряженном состоянии остается плоским и сохраняет свою круговую форму.

Учтены интенсивность усилий, действующая на трубопровод со стороны упругого основания и усилия действующие со стороны упруго-деформируемых опор, причем жесткость основания и опор в направлении различных ортов выбранной системы координат - различна.

Движение массы считается равномерным, а масса - несжимаемой.

2.3. При расчете применена неявная конечно - разностная аппроксимация дифференциальных уравнений движения с неравномерной по длине сеткой. Во внутренних областях сетки использованы центральные разности, а на границах области левые или правые разности, имеющие тот же порядок аппроксимации, что и центральные.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

3.I. Основные уравнения

3.I.I. Движение трубопровода описано системой дифференциальных уравнений с частными производными (в безразмерных параметрах).

Уравнение в проекциях на ось e_i

$$\frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 W_1}{\partial S^4} + a\left\{\frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + b\bar{v}\left(2\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \bar{v}\varkappa_2'\right)\right\} H^M - \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial S} +$$

$$+ b\frac{\partial^2 \Delta \varkappa_2}{\partial S^2} - T_3\varkappa_2' + W_1 \sum_{n=1}^{N} \left(\bar{C}_{1n}^{on} \cdot H_n^{on} + \bar{C}_{1n}^{ocн} \cdot H_n^{ocн}\right) = 0. \qquad (1)$$

Уравнение в проекциях на ось e_2

$$\frac{\partial^2 W_2}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 W_2}{\partial S^4} + a\left\{\frac{\partial^2 W_2}{\partial t^2} - b\bar{v}\left(2\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + \bar{v}\varkappa_1'\right) + \frac{\bar{q}}{a}\right\} H^M + \frac{\partial T_2}{\partial S} + \bar{q}_T -$$

$$- b\frac{\partial^2 \Delta \varkappa_1}{\partial S^2} - T_3\varkappa_1' + W_2 \sum_{n=1}^{N} \left(\bar{C}_{2n}^{on} \cdot H_n^{on} + \bar{C}_{2n}^{ocн} \cdot H_n^{ocн}\right) = 0. \qquad (2)$$

Уравнение в проекциях на ось e_3

$$\frac{\partial W_3}{\partial t^2} - e\frac{\partial^2 W_3}{\partial S^2} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial S} - T_2 \cdot \varkappa_1' + T_1\varkappa_2' +$$

$$+ W_3 \sum_{n=1}^{N} \left(\bar{C}_{3n}^{on} \cdot H_n^{on} \cdot C_{3n}^{ocн} \cdot H_n^{ocн}\right) = 0. \qquad (3)$$

Уравнение моментов относительно продольной оси e_3

$$b\frac{\partial}{\partial S}\left\{\frac{\partial \varphi_3}{\partial S} + \Delta\bar{\varkappa}_3\right\} + T_3 - \frac{b}{2e}\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} = 0. \qquad (4)$$

3.I.2. Физические соотношения

Параметры усилий в трубопроводе, входящие в уравнения движения, связаны с параметрами деформаций следующими соотношениями:

$$T_1 = -\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial^2 W_1}{\partial S^2} + b\Delta\bar{\varkappa}_2\right) + \bar{T}_1 \quad ; \qquad (5)$$

$$T_2 = -\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial S^2} - b\Delta\bar{\varkappa}_1\right) + \bar{T}_2 \quad ; \qquad (6)$$

$$\bar{T}_3 = e\,\frac{\partial w_3}{\partial s} + \bar{T}\ ; \tag{7}$$

$$\bar{T}_1 = M_3\,\bar{\varkappa}_1' - M_2\,\bar{\varkappa}_3'\ ; \tag{8}$$

$$\bar{T}_2 = -M_2\,\bar{\varkappa}_3' + M_3\,\bar{\varkappa}_2'\ ; \tag{9}$$

$$\bar{T}_3 = M_2\,\bar{\varkappa}_1' - M_1\,\bar{\varkappa}_2'\ ; \tag{10}$$

$$\bar{T} = Be\,\bar{\varphi}_3 . \tag{11}$$

Параметры изгибающих (M_1 и M_2) и крутящего (M_3) моментов выражены через параметры кривизны и кручения с помощью соотношений

$$\begin{aligned} M_1 &= -\frac{\partial^2 w_2}{\partial s^2} + B\,\bar{\varkappa}_1\ ; \\ M_2 &= \frac{\partial^2 w_1}{\partial s^2} + B\,\bar{\varkappa}_2\ ; \\ M_3 &= B\left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial s} + \Delta\bar{\varkappa}_3\right)\ : \end{aligned} \tag{12}$$

3.I.3. Кинематические соотношения

Параметры кривизны связаны с деформациями соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta\varkappa_1 &= -\frac{\partial^2 w_2}{B\partial s^2} + \Delta\bar{\varkappa}_1\ ; \\ \Delta\varkappa_2 &= \frac{\partial^2 w_1}{B\,\partial s^2} + \Delta\bar{\varkappa}_2\ ; \\ \Delta\varkappa_3 &= \frac{\partial \varphi_3}{\partial s} + \Delta\bar{\varkappa}_3\ ; \end{aligned} \tag{13}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\bar{\varkappa}_1 &= \frac{\partial \bar{\varphi}_1}{\partial s} + \varkappa_2\varphi_3 - \varkappa_3\varphi_2 - \varkappa_1\varepsilon\ ; \\ \Delta\bar{\varkappa}_2 &= \frac{\partial \bar{\varphi}_2}{\partial s} + \varkappa_3\varphi_1 - \varkappa_1\varphi_3 - \varkappa_2\varepsilon\ ; \\ \Delta\bar{\varkappa}_3 &= \varkappa_1\varphi_2 - \varkappa_2\varphi_1 + \varkappa_3\varepsilon\ ; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \varkappa_1' &= \varkappa_1 + \Delta\bar{\varkappa}_1' ; \\ \varkappa_2' &= \varkappa_2 + \Delta\bar{\varkappa}_2' ; \\ \varkappa_3' &= \varkappa_3 + \Delta\bar{\varkappa}_2' . \end{aligned} \qquad (I5)$$

Углы поворота и относительная деформация растяжения оси трубопровода связаны с деформациями соотношениями:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{\partial w_2}{\beta\partial s} + \bar{\varphi}_1 ; \\ \varphi_2 &= \frac{\partial w_1}{\beta\,\partial s} + \bar{\varphi}_2 ; \\ \varepsilon &= \frac{\partial w_3}{\beta\,\partial s} + \bar{\varphi}_3 , \end{aligned} \qquad (I6)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 &= \left(w_3\varkappa_1 - w_1\varkappa_3\right)\cdot\beta^{-1} , \\ \bar{\varphi}_2 &= \left(w_3\varkappa_2 - w_2\varkappa_3\right)\cdot\beta^{-1} ; \\ \bar{\varphi}_3 &= \left(w_3\varkappa_1 - w_1\varkappa_3\right)\cdot\beta^{-1} . \end{aligned} \qquad (I7)$$

3.I.4. Граничные условия

На защемленном конце

$$w_1 = 0 ; \quad w_2 = 0 ; \quad w_3 = 0 , \qquad (I8)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial s} - w_3\varkappa_1 + w_1\varkappa_3 = 0 ;$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial s} - w_2\varkappa_3 + w_3\varkappa_2 = 0 ; \qquad (I9)$$

$$\varphi_3 = 0 .$$

Для трубопровода с круговой осью $\varkappa_1 = \varkappa_2 = 0$ и условия (I8)-(I9) имеют вид

$$\frac{\partial w_2}{\partial s} = 0 ; \quad \frac{\partial w_1}{\partial s} = w_3\varkappa_2 = 0 ; \quad \varphi_3 = 0 . \qquad (20)$$

Для прямолинейного участка трубы $\varkappa_2 = 0$. Тогда

$$\frac{\partial w_2}{\partial s} = 0 ; \quad \frac{\partial w_1}{\partial s} = 0 ; \quad \varphi_3 = 0 . \qquad (2I)$$

В случае шарнирно закрепленного конца к условиям (I8)-(I9) добавляются условия

$$\Delta\varkappa_1 = 0\,;\ \Delta\varkappa_2 = 0\,;\ \Delta\varkappa_3 = 0. \tag{22}$$

Для трубы с постоянным радиусом кривизны

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial s} + \varkappa_2\varphi_2 = 0;\quad \frac{\partial\varphi_2}{\partial s} = 0;\quad \frac{\partial\varphi_3}{\partial s} - \varkappa_2\varphi_1 = 0. \tag{23}$$

В случае, если $\varkappa_2 = 0$, что соответствует прямолинейному трубопроводу

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial s} = 0;\quad \frac{\partial\varphi_2}{\partial s} = 0;\quad \frac{\partial\varphi_3}{\partial s} = 0. \tag{24}$$

3.I.5. Начальные условия

Начальное напряженно-деформированное состояние трубопровода не учитывают, т.е. предполагают, что до момента нагружения трубопровода деформации и напряжения в любой его точке равны нулю.

4. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

4.I. Дифференциальные уравнения движения трубопровода, описывающие исходную задачу, при помощи неявной схемы метода конечных разностей аппроксимируют конечной системой алгебраических соотношений, а исследуемую конструкцию заменяют некоторой дискретной моделью, состоящей из отдельных элементов.

Длину каждого характерного участка трубопровода (участок, геометрия или конструкция которого отлична от соседних) разбивают на N_n равных интервалов (n - номер характерного участка).

В связи с тем, что на криволинейных участках пространственного трубопровода изменение функции усилия и перемещений происходит быстрее, чем на прямолинейных, длина интервалов на криволинейных участках должна быть меньшей, чем на прямолинейных.

Граничные условия в начале и на конце всей рассчитываемой конструкции трубопровода принимают в одном из двух вариантов: в виде шарнирной неподвижной или защемленной опоры.

Уравнения движения вместе с граничными условиями по концам рассматриваемой конструкции трубопровода, представленные в разностном виде, образуют систему алгебраических уравнений ленточной структуры для каждого момента времени.

Последовательное решение этих систем уравнений на каждом шаге по времени позволяет определить перемещения во всех узлах по длине трубопровода.

При реализации численного решения на ЭВМ порядок системы, зависящий от общего числа интервалов, ограничен объемом запоминающего устройства машины и ее быстродействием.

Окончание расчета соответствует моменту времени, когда нагрузка полностью сошла с рассматриваемой трубопроводной системы.

4.2. Исходные данные и результаты вычислений

В качестве исходной информации задают данные о структуре трубопроводной системы (число участков, на которые разбивается трубопровод, размеры участков, жесткостные характеристики основания и опор, физические и геометрические характеристики трубы), о граничных условиях на концах системы, о характеристиках разностной схемы (число точек в характерном участке при аппроксимации методом конечных разностей, шаг по времени).

После ввода исходных данных перед началом вычислений по программе производится их обработка: поиск формальных ошибок, распечатка исходной информации в удобном для пользования виде.

Результаты вычислений - перемещения, напряжения - выдаются на печать и снабжаются привычной для механики индексацией. Для перемещений и напряжений указывается сечение и направление.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

I. Методические рекомендации разработаны в соответствии с программой стандартизации по надежности, прочности и износостойкости на 1981-1985 г.г. и на период до 1990 г. (П.I.09.05.75) Техническое задание утверждено во ВНИИСТе II.04.83 и согласовано с ВНИИНМАШем I8.05.83.

2. При разработке методических рекомендаций использованы результаты научно-исследовательской работы, проведенной во ВНИИСТе [4].

3. В основу методических рекомендаций положена неявная аппроксимация уравнений движения трубопроводов методом конечных разностей. Четыре уравнения движения в частных производных приводятся к четырем системам линейных уравнений, причем две являются пятидиагональными, остальные - трехдиагональными.

4. Программа, составленная на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЕС ЭВМ, реализует традиционный алгоритм неявной конечно-разностной схемы с применением метода последовательных прогонок:

- разбиение трубопроводной системы на участки;
- вычисление коэффициентов линейных уравнений точек временного слоя для одного из перемещений (поперечные - горизонтальное, вертикальное, продольное, крутильное);
- вычисление столбцов свободных членов линейных уравнений;
- составление системы уравнений для временного слоя;
- решение системы уравнений и вычисление перемещений в узлах системы;
- вычисление напряжений в узлах системы;
- переход к следующему виду перемещений;
- переход к следующему временному слою.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Тестовые примеры МКР для простейших моделей и их сравнение с результатами аналитических решений.

I. Дифференциальные уравнения движения приведенные при помощи МКР к системам линейных алгебраических уравнений отражают лишь приближенную математическую модель явления. Для выявления адекватности физической и математической модели необходимо их сравнение и проверка численного решения аналитическим или полуаналитическим методом.

2. Тестовый пример для изгибных колебаний с применением неявной схемы МКР и по методу Бубнова-Галеркина.

Сопоставление решения полученного МКР производилось с решением полученным в [5] при помощи другого метода - метода разложения функции прогиба в ряд с последующим применением метода Бубнова-Галеркина и алгоритма Рунге-Кутта.

Вычислительный эксперимент проведен для простейшего случая - шарнирно опертой балки, по которой с постоянной скоростью движется кусочно-распределенная нагрузка.

Были получены изменения прогибов в середине пролета (рис.2) в зависимости от безразмерной координаты переднего края нагрузки для одного из вариантов ($\alpha = 0{,}5$; $\bar{l}_1^M = 0{,}5$; $\bar{V} = 0{,}5$). Здесь пунктирная кривая - прогибы, вычисленные в работе [5] с учетом одного члена ряда, сплошная - методом конечных разностей. Разница между результатами составила примерно 5%. Следует учесть, что эта разница могла бы быть меньшей при использовании большего числа членов ряда в [5].

3. Тестовый пример для продольного колебания с применением МКР и метода характеристик.

Сопоставление проводилось для частного случая - неподвижно закрепленного одним концом стержня, к свободному концу ко-

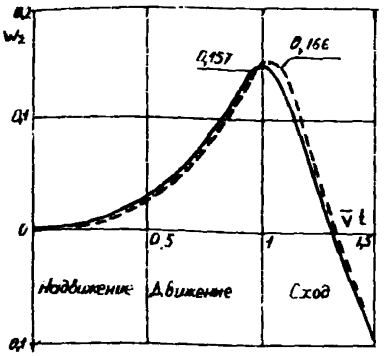


Рис. 2.

торого в момент времени $t = 0$ прикладывается усилие T_3, в дальнейшем не изменяющее своей величины [6]. Безразмерное усилие $T_3 = 3{,}67$, что соответствует относительной продольной деформации $\varepsilon = -0{,}01$.

На рис. 3 приведены графики изменения продольных усилий и скоростей в сечениях стержня, соответствующих $S = 0$, $S = 0{,}5$, $S = 1$ во времени для $e = 3600$. Здесь пунктирная кривая – продольные усилия и скорости вычисленные в работе [6], сплошная – методом конечных разностей.

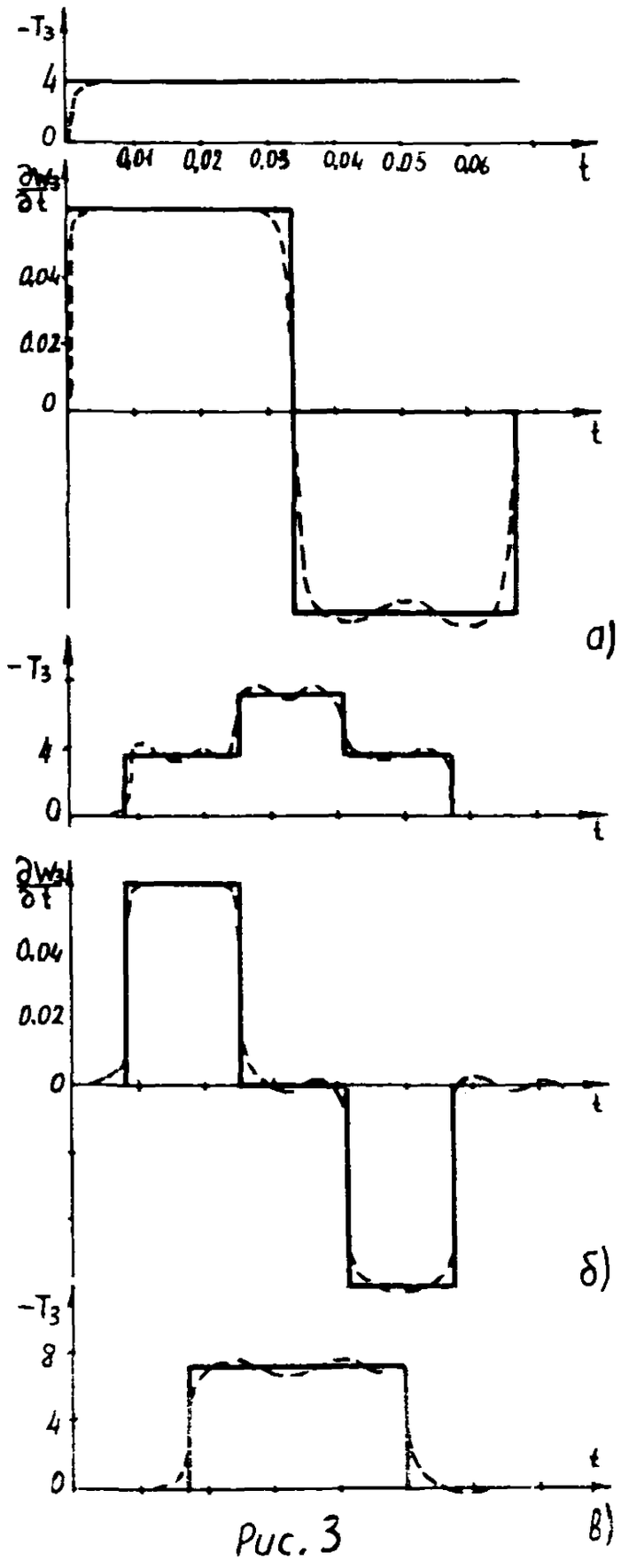

-T3
4
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
t
∂W3/∂t
0,04
0,02
0
t
а)
-T3
4
0
t
∂W3/∂t
0,04
0,02
0
t
б)
-T3
8
4
0
t
в)

Рис. 3

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

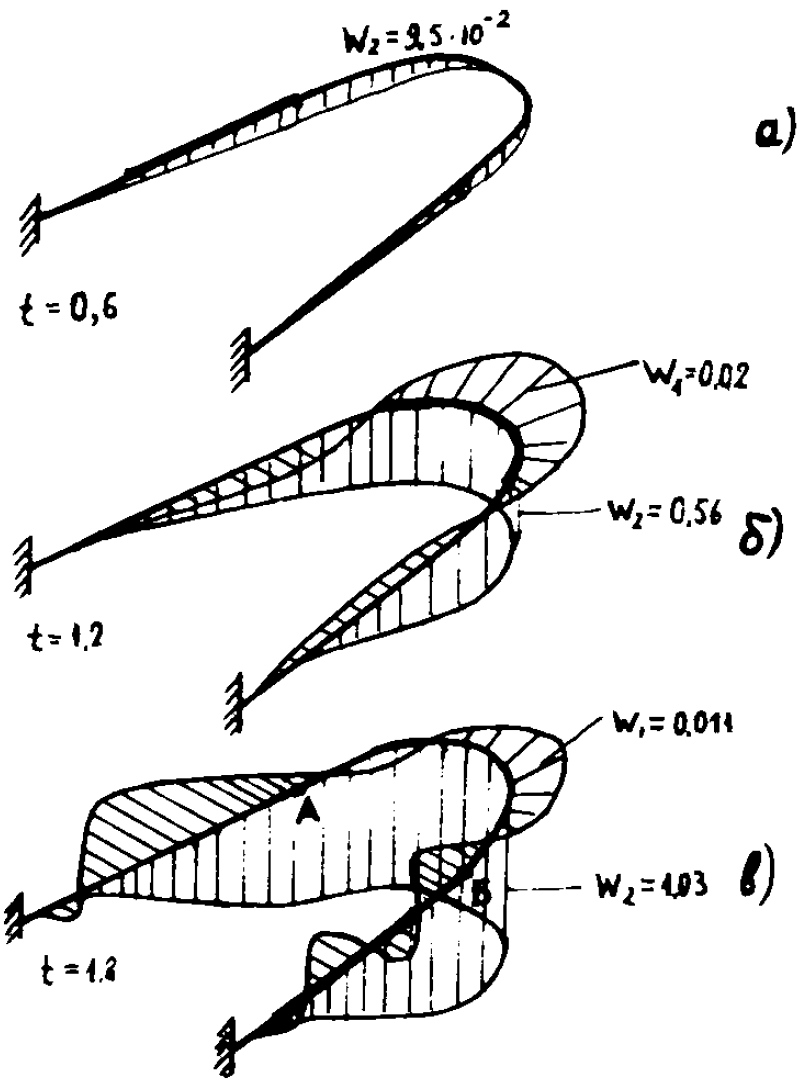
Динамические эффекты, возникающие при действии подвижной нагрузки на трубопровод с криволинейными участками.

Результаты вычислений относятся к задаче о действии движущейся с постоянной скоростью нагрузки ($\bar{V} = 0,5$) на трубопровод с защемленными концами, имеющего два прямолинейных участка и участок постоянной кривизны.

Безразмерные параметры трубопровода $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_3 = 0$; $\mathcal{R}_2 = I$; $\bar{L}_1 = \bar{L}_2 = \bar{L}_3 = I$; $\alpha = 0,5$; $\delta = I20$; $\varepsilon = I440$; $\bar{q} = I9,8$.

Графики рис. 4а,б,в представляют собой эпюры перемещений в различные моменты времени $t = 0,6$; $t = I,2$; $t = I,8$. Положение движущейся нагрузки показано утолщенной линией.

Графики рис. 5а,б представляют собой кривые перемещения сечений А и Б (см. рис. 4в) во времени.


$W_2 = 2.5 \cdot 10^{-2}$
a)
t = 0,6
$W_1 = 0.02$
$W_2 = 0.56$
δ)
t = 1,2
$W_1 = 0.011$
A
B
$W_2 = 1.03$
в)
t = 1,8

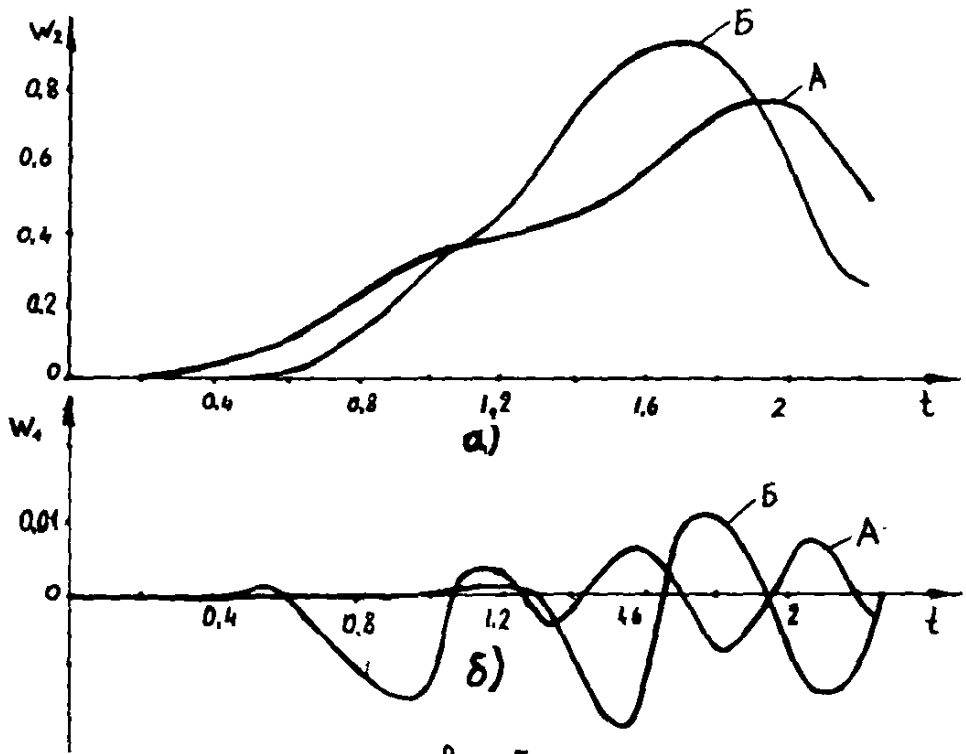


Рис. 5

Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Герштейн М.С., Климовский Е.М., Коган В.Д. Исследование динамики надземных балочных трубопроводов при пропуске очистных устройств. - Строительство трубопроводов, № 3, 1975.
2. Фомичев В.Д., Климовский Е.М. Исследование динамической прочности надземных балочных систем трубопроводов при пропуске очистных устройств. - Труды ВНИИСТ, вып. 32, ч. I, 1976.
3. Фомичев В.Д. Влияние граничных условий на динамику однопролетных балочных переходов трубопроводов под действием подвижной нагрузки.-Труды ВНИИСТа, вып. 34, 1976.
4. Руководство по расчету динамической прочности балочных, криволинейных, компенсационных и конечных участков газопроводов при пропуске очистных устройств. М., Изд. ВНИИСТ, 1978
5. Моргаевский А.Б. Об устойчивости и колебаниях сооружений в поле сил инерции движущейся равномерно распределенной нагрузки. - Научные труды Днепропетровского металлургического ин-та, вып. 42, 1962.
6. Расчеты на прочность в машиностроении. Т.3. С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев, В.М. Макушин, Н.Н. Малинин, В.И. Феодосьев, М., Машгиз, 1959.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

I. Принятые обозначения и сокращения 3

2. Постановка задачи 6

3. Метод расчета 7

4. Алгоритм решения II

ПРИЛОЖЕНИЯ:

Приложение I. Пояснительная записка I4

Приложение 2. Тестовые примеры МКР для простейших моделей и их сравнение с результатами решений I5

Приложение 3. Динамические эффекты, возникающие при действии подвижной нагрузки на трубопровод с криволинейными участками I8

Литература 2I

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Расчеты и испытания на прочность.
Методы и программа расчета на ЭВМ
пространственного криволинейного
трубопровода на подвижную нагрузку.

Издание ВНИИСТа.

Л-76285 Подписано в печать 5/У 1984 г. Формат 60х84/16
Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,0 Бум.л. 0,75
Тираж 80 экз. Цена 10 к. Заказ 48

Ротопринт ВНИИСТа.

gost.e-ecolog.ru