ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

534.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ

Канд. техн. наук, доц. Ю.М. СТЕПАНЧУК

При капитальном ремонте газопроводов механизмы специальных механизированных колонн оказывают сильное динамическое воздействие на трубы. Этот фактор заметно влияет на прочность, долговечность труб, чистоту обрабатываемой поверхности. Предлагаемая методика дает возможность определять собственные частоты системы газопровод – ремонтный комплекс и путем изменения режимов работы механизмов уменьшать динамические нагрузки на трубы.

Для обеспечения надежного функционирования Единой газотранспортной системы ОАО «Газпром» реализует комплексную программу капитального ремонта газопроводов. Большие масштабы выполняемых ремонтно-технических работ обусловлены значительной протяженностью магистральных газопроводов (свыше 150 тыс. километров), значительным износом основных фондов (более 50%), выработкой срока амортизации части газопроводов (более 15%). В рамках реализации программы ремонтно-технических работ ведется масштабная переизоляция линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ) с диагностикой состояния труб, сварных соединений и их последующей отбраковкой.

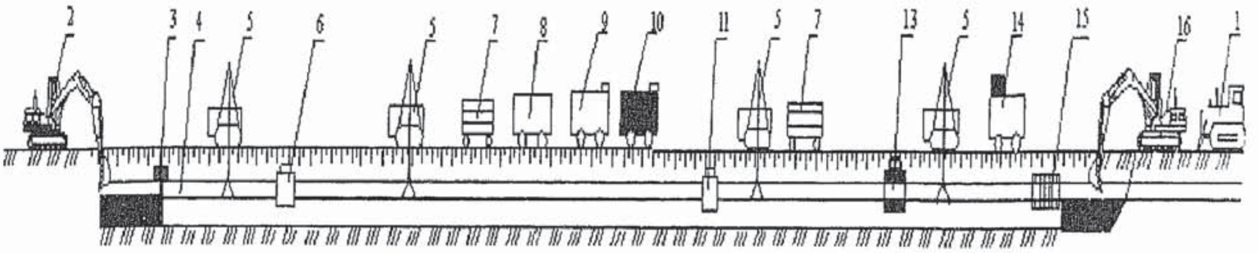

Рис. 1 Принципиальная технологическая схема капитального ремонта газопровода в траншее

1 – бульдозер; 2 – вскрышной экскаватор; 3 – подкапывающая машина; 4 – трубопровод; 5 – трубоукладчик; 6 – машина предварительной очистки; 7 – электростанция; 8 - пост отбраковки труб; 9 – сварочный пост; 10 - лаборатория контроля качества сварных соединений; 11 - машина окончательной очистки; 13 – изоляционная машина; 14 – лаборатория контроля качества изоляционного покрытия; 15 – машина для подсыпки и подбивки грунта под трубопровод; 16 – экскаватор засыпки

Разработанные в ОАО «Газпром» технологии ремонта газопроводов предусматривают применение комплексных механизированных колонн [3] (рис.1), выполняющих подготовительные, вскрышные работы, работы по очистке труб от старой изоляции, диагностику и сварочно-восстановительные работы, нанесение нового изоляционного покрытия, засыпку отремонтированной части газопровода.

Работа очистных и изолировочных машин таких комплексов вызывает колебания ремонтируемого участка газопровода, удерживаемого в заданном пространственном положении упругой троллейной подвеской трубоукладчиков.

Для труб, длительное время находившихся в эксплуатации, чрезвычайно важно минимизировать дополнительные напряжения, возникающие в процессе производства ремонтных работ.

Для расчета частот собственных колебаний ремонтируемого участка газопровода в качестве модели принимается однородный стержень (рис. 2) трубчатого сечения на упругих подвесках с точечными массами, имитирующими навешенные на газопровод машины предварительной и окончательной очистки и изоляционные устройства. Количество и характеристики упругих и массовых элементов модели определяются составом колонны. Здесь для расчета рассматривается колонна, состоящая из 4-х трубоукладчиков, машин предварительной (резцовой) и финишной (щеточной) очистке, а также изолировочной машины.

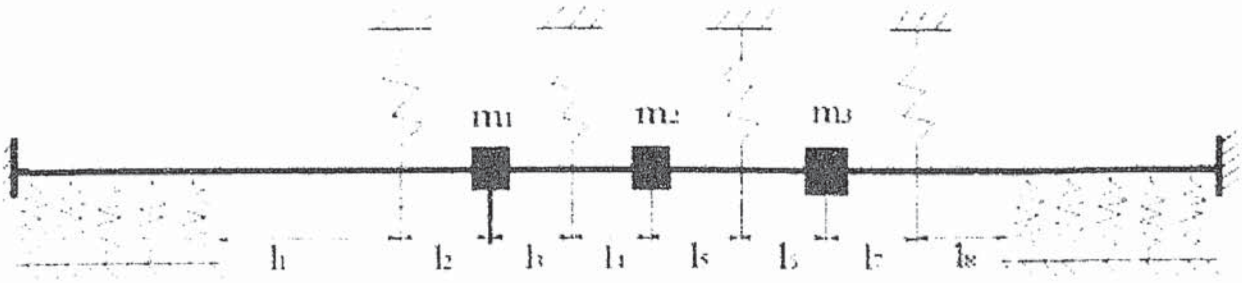

Рис 2. Расчетная схема системы с учетом подземных участков.

Частоты собственных колебаний ремонтируемого участка газопровода будем определять для системы с учетом примыкающих подземных участков. Расчетная модель грунта принимается в виде упругого основания, т. е. полагаем, что сопротивление грунта в вертикальной плоскости пропорционально перемещениям трубы [1]. Такая модель хорошо описывает взаимодействие трубы с грунтом в силу малости изгибных перемещений. Расчетная схема для рассматриваемого случая приведена на рис. 2.

Рассмотрим изгибные колебания стержня в вертикальной плоскости. Стержень разбивается на однородные участки, границами которых являются упругие или массовые элементы.

Принимаем, что при изгибных колебаниях перемещения трубы на подземных участках трубопровода $y_i(x,t)$ малы. Поэтому зависимость между сопротивлением грунта q_y и перемещением трубы $y_i(x_i,t)$ на участке с упругим основанием является линейной функцией и определяется коэффициентом нормального сопротивления грунта c_{y0} [1]:

$$q_y = c_{y0} \cdot D_н \cdot y_i(x_i,t),$$

где D_H - наружный диаметр трубы.

Коэффициент нормального сопротивления грунта в зависимости от свойств грунта и параметров заглубления трубопровода находится следующим образом [1]:

$$c_{y0} = \frac{0.12 E_{гр} \eta_{гр}}{(1-\mu_{гр}^2)\sqrt{l_0 D_н}}(1 - e^{-\frac{2h_0}{D_н}}),$$

где $E_{гр}$ - модуль деформации грунта ненарушенной структуры, МПа; $\eta_{гр}$ - коэффициент снижения модуля деформации грунта засыпки по сравнению с грунтом ненарушенной структуры; $\mu_{гр}$ - коэффициент Пуассона грунта; $l_0 = 1$ м – единичная длина трубопровода; h_0 - расстояние от верха засыпки до оси трубы, м.

Для выполнения расчетов длину примыкающих подземных участков необходимо в общем случае выбирать как из условий нагружения трубопровода, так и в зависимости от физико-механических характеристик грунта.

Изгибные колебания i-го участка стержня на упругом основании, имитирующим сопротивление грунта при колебаниях трубы, описываются дифференциальным уравнением [2]:

$$\frac{\partial^4 y_i(\xi_i,t)}{\partial \xi_i^4} + \frac{\mu_i l_i^4}{EJ_i}\frac{\partial^2 y_i(\xi_i,t)}{\partial t^2} + \frac{k_i l_i^4}{EJ_i} y_i(\xi_i,t) = 0, \tag{1}$$

Здесь $\xi_i = x_i / l_i$, $0 \le \xi_i \le 1$, l_i - длина, μ_i – погонная масса, $y_i(x_i,t)$ – прогиб, EJ_i – изгибная жесткость рассматриваемого участка стержня, k_i - обобщенный коэффициент упругости грунта подземных участков трубопровода,

$$k_i = c_{y0} D_н .$$

Решение (1) представим как

$$y_i(\xi_i,t) = \sum_n Y_{ni}(\xi_i) T_n(t), \tag{2}$$

где $Y_{ni}(\xi_i)$ - форма колебаний i - го участка по n - му тону, $T_n(t)$ - функция времени, n - номер тона.

Для вычисления частот и форм собственных колебаний рассматриваемой модели используется метод начальных параметров [2], [4]. При изгибных колебаниях стержня состояние сечения характеризуется четырьмя параметрами – прогибом $y_i(x_i,t)$, углом поворота $\partial y_i(x_i,t) / \partial x_i$, изгибающим моментом $M_i(x_i,t) = EJ_i \, \partial^2 y_i(x_i,t) / \partial x_i^2$ и поперечной силой $Q_i(x_i,t) = EJ_i \, \partial^3 y_i(x_i,t) / \partial x_i^3$. Поэтому формы колебаний этих параметров с учетом формулы (2) составляют четырехмерный вектор

$$\bar{X}_i(\xi_i) = \left(Y_i(\xi_i) \quad Y_i'(\xi_i) \quad M_i(\xi_i) \quad Q_i(\xi_i)\right)^T, \tag{3}$$

где $(\ )' = {}^{\mathrm{d}(\ )}\!/\!{}_{\mathrm{d}\xi_i}$, $M_i(\xi_i) = EJ_i Y_i''(\xi_i)$ - амплитуда изгибающего момента, $Q_i(\xi_i) = EJ_i Y_i'''(\xi_i)$ - амплитуда перерезывающей силы при колебаниях системы по n-му тону.

Переход от вектора состояния $\vec{X}_i(0)$ в начале участка к вектору $\vec{X}_i(1)$ в конце участка определяется следующим образом

$$\vec{X}_i(1) = A_i \cdot \vec{X}_i(0). \tag{4}$$

Здесь A_i - матрица перехода участка,

$$A_i = \begin{pmatrix} S(r_i) & \dfrac{T(r_i)}{r_i} & \dfrac{U(r_i)}{EJ_i r_i^2} & \dfrac{V(r_i)}{EJ_i r_i^3} \\ r_i V(r_i) & S(r_i) & \dfrac{T(r_i)}{EJ_i r_i} & \dfrac{U(r_i)}{EJ_i r_i^2} \\ EJ_i r_i^2 U(r_i) & EJ_i r_i V(r_i) & S(r_i) & \dfrac{T(r_i)}{r_i} \\ EJ_i r_i^3 T(r_i) & EJ_i r_i^2 U(r_i) & r_i V(r_i) & S(r_i) \end{pmatrix},$$

где

$$r_i^4 = z_i^4 - \beta_i^4 \geq 0, \tag{5}$$

z_i - собственное число участка, $z_i^4 = {}^{\mu_i \omega_n^2 l_i^4}\!/\!{}_{EJ_i}$; ω_n - частота собственных колебаний стержня по n - му тону, $\beta_i^4 = {}^{k_i l_i^4}\!/\!{}_{EJ_i}$; $S(r_i), T(r_i), U(r_i)\, u\, V(r_i)$ - функции Крылова.

Для участков, не взаимодействующих с грунтом, полагаем $k_i = 0$ и тогда из формулы (5) получим $r_i = z_i$.

В случае $r_i^4 = z_i^4 - \beta_i^4 \leq 0$ матрица перехода участка имеет следующий вид

$$A_i = \begin{pmatrix} K_{1i}(z_{1i}) & \dfrac{K_{2i}(z_{1i})}{z_{1i}} & \dfrac{K_{3i}(z_{1i})}{EJ_i z_{1i}^2} & \dfrac{K_{4i}(z_{1i})}{EJ_i z_{1i}^3} \\ -z_{1i} K_{4i}(z_{1i}) & K_{1i}(z_{1i}) & \dfrac{K_{2i}(z_{1i})}{EJ_i z_{1i}} & \dfrac{K_{3i}(z_{1i})}{EJ_i z_{1i}^2} \\ -EJ_i z_{1i}^2 K_{3i}(z_{1i}) & -EJ_i z_{1i} K_{4i}(z_{1i}) & K_{1i}(z_{1i}) & \dfrac{K_{2i}(z_{1i})}{z_{1i}} \\ -EJ_i z_{1i}^3 K_{2i}(z_{1i}) & -EJ_i z_{1i}^2 K_{3i}(z_{1i}) & -z_{1i} K_{4i}(z_{1i}) & K_{1i}(z_{1i}) \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Здесь $z_{1i}^4 = \beta_i^4 - z_i^4$; $K_{1i}(z_{1i}\xi_i), K_{2i}(z_{1i}\xi_i), K_{3i}(z_{1i}\xi_i)$ и $K_{4i}(z_{1i}\xi_i)$ - функции, определяемые следующим образом:

$$K_{1i}(z_{1i}\xi_i) = ch(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})\cos(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}}),$$

$$K_{2i}(z_{1i}\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2}}(ch(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})\sin(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}}) + sh(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})\cos(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})),$$

$$K_{3i}(z_{1i}\xi_i) = sh(\frac{z_{1i}\xi_{1i}}{\sqrt{2}})\sin(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}}),$$

$$K_{4i}(z_{1i}\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2}}(ch(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})\sin(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}}) - sh(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})\cos(\frac{z_{1i}\xi_i}{\sqrt{2}})).$$

При $\xi_i = 0$ $K_{1i}(0) = 1$, $K_{2i}(0) = 0, K_{3i}(0) = 0, K_{4i}(0) = 0.$

В матрице (6) используются значения функций при $\xi_i = 1$.

В рассматриваемой системе два типа стыков участков (рис. 2):
- с пружиной, имитирующей подвеску трубоукладчиков;
- с сосредоточенной массой, имитирующей навешиваемые на трубу очистные и изолировочные машины.

Условия перехода от вектора состояния сечения в конце i - го участка $\vec{X}_i(1)$ к вектору состояния в начале $i+1$ - го участка $\vec{X}_{i+1}(0)$ запишем в виде:

$$\vec{X}_{i+1}(0) = B_i\vec{X}_i(1), \tag{7}$$

где B_i - матрица перехода стыка. Для стыка с пружиной

$$B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_i^2 & 0 \\ -\alpha_i EJ_{i+1} & 0 & 0 & \gamma_i^3 \end{pmatrix}, \tag{8а}$$

для стыка с сосредоточенной массой

$$B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_i^2 & 0 \\ \chi_i\gamma_i^3 z_i^4 & 0 & 0 & \gamma_i^3 \end{pmatrix}. \tag{8б}$$

Здесь

$$\alpha_i = \frac{c_i l_i^3}{EJ_{i+1}}, \ \gamma_i = \frac{l_{i+1}}{l_i}, \ \chi_i = \frac{m_i}{\mu_i l_i}.$$

Для стыков без упругих элементов или сосредоточенных масс матрица перехода определяется из (8а), где полагается $\alpha_i = 0$.

В случае, когда полагаем, что на концах рассматриваемой системы – заделки, вектор состояния сечения в начале первого участка задаем в виде линейной комбинации двух векторов

$$\vec{X}_1(0) = C_1\vec{X}_{11} + C_2\vec{X}_{12} \ , \tag{9}$$

где $\vec{X}_{11}$ и $\vec{X}_{12}$- произвольные векторы, удовлетворяющие граничным условиям $\vec{X}_{11} = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T$, $\vec{X}_{12} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T$, а C_1 и C_2 - подлежащие определению константы, $C_1 = M_1(0)$, $C_2 = Q_1(0)$.

После этого выполняются два расчета, в которых векторы $\vec{X}_{11}$ и $\vec{X}_{12}$ по отдельности умножаются на все матрицы переходов участков и стыков:

$$\vec{X}_{N1}(1) = A_N B_{N-1} A_{N-1} ....A_1 \vec{X}_{11},$$
$$\vec{X}_{N2}(1) = A_N B_{N-1} A_{N-1} ....A_1 \vec{X}_{12}.$$

В концевом сечении системы вектору $\vec{X}_1(0)$ соответствует вектор

$$\vec{X}_N(1) = C_1\vec{X}_{N1}(1) + C_2\vec{X}_{N2}(1). \tag{10}$$

Этот вектор должен удовлетворять граничным условиям на правом конце системы. Для заделки граничные условия в этом случае определяются как $Y_N(1) = 0$, $Y_N'(1) = 0$, что приводит к двум алгебраическим уравнениям:

$$C_1 Y_{N1}(1) + C_2 Y_{N2}(1) = 0$$
$$C_1 Y_{N1}'(1) + C_2 Y_{N2}'(1) = 0$$

Отсюда из условия $C_1 \neq 0,\ C_2 \neq 0$ получим частотное уравнение в виде:

$$\Delta(\omega_n^2) = Y_{N1}(1)Y'_{N2}(1) - Y_{N2}(1)Y'_{N1}(1) = 0.$$

После нахождения частот собственных колебаний системы ω_n (n=1,2,3… - номер тона), создается вектор $\bar{X}_1(0) = (0\ \ 0\ \ C_1\ \ C_2)^T$, где полагаем $C_1 = 1,\ C_2 = -Y_{N1}(1)/Y_{N2}(1)$. После этого выполняется расчет, в котором проходят последовательно через участки и стыки, тем самым определяются амплитудные значения прогибов и углов поворота сечений стержня, а также изгибающего момента и перерезывающей силы.

В расчетах полагаем:

$m_1 = 2500$ *кг*, $m_2 = 2500$ *кг*, $m_3 = 2900$ *кг*; $l_1 = 30$ *м*, $l_i = 10$ *м* $(i = 2...7)$,
$l_8 = 20$ *м*; $EJ_i = 2.4 \cdot 10^9\ H \cdot м^2,\ \mu_i = 300\ кг/м\ (i = 1...8)$;
$c_i = 2 \cdot 10^6\ H/м\ (i = 1,3,5,7)$.

Значения частот собственных колебаний системы с подземными участками в зависимости от изменения обобщенного коэффициента упругости грунта $k_1 = k_{10}$ и длины $l_{подз}$ подземных участков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний системы с учетом подземных участков.

$k_1 = k_{10}$, Н/м²	$l_{подз}$, *м*	ω_1, рад/с	ω_2, рад/с	ω_3, рад/с	ω_4, рад/с
$3.5 \cdot 10^2$	30	11.569	14.263	16.252	21.178
	50	7.456	9.235	15.465	17.226
	80	4.387	5.165	11.365	13.122
$3.5 \cdot 10^3$	30	11.675	14.343	16.284	21.233
	50	7.852	9.625	15.478	17.3
	80	5.289	6.022	11.617	13.351
$3.5 \cdot 10^4$	30	12.6	14.935	16.69	21.803
	50	10.712	12.661	15.637	18.14
	80	10.189	11.314	14.01	19.837
$3.5 \cdot 10^5$	30	15.264	16.339	20.347	27.097
	50	15.254	16.322	20.324	26.909
	80	15.252	16.317	20.313	26.896
$3.5 \cdot 10^6$	30	15.591	17.957	24.473	34.941
	50	15.591	17.956	24.471	34.936
	80	15.591	17.956	24.471	34.936

Как видно из таблицы, в случае, когда обобщенный коэффициент упругости грунта подземных участков $k_1 = k_{10} = 3.5 \cdot 10^2\ Н/м^2$, $k_1 = k_{10} = 3.5 \cdot 10^3\ Н/м^2$ и $k_1 = k_{10} = 3.5 \cdot 10^4\ Н/м^2$, частоты уменьшаются при увеличении длины подземного участка.

В случае же $k_1 = k_{10} = 3.5 \cdot 10^5\ Н/м^2$ $k_1 = k_{10} = 3.5 \cdot 10^6\ Н/м^2$, частоты всех тонов остаются практически неизменными.

Таким образом, для «мягких» грунтов к массе трубопровода при увеличении длины подземных участков добавляется «присоединенная» масса грунта подземных участков, что приводит к снижению величины частот собственных колебаний. Для систем с подземными участками, имеющими большие значения коэффициента обобщенной упругости грунта, частоты собственных колебаний системы остаются постоянными.

Для сравнения определялись частоты собственных колебаний систем с различными вариантами опор на концах стержня (без учета подземных участков):

- стержень с заделками на концах;
- стержень с шарнирными опорами;
- стержень с упругими опорами.

Расчет частот и форм собственных колебаний систем с различными вариантами концевых опор выполнялся в соответствии с алгоритмом вышеописанного метода. Результаты расчета частот собственных колебаний для систем с заделками на концах и шарнирными опорами (без подземных участков) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Частоты собственных колебаний систем с заделками на концах и шарнирными опорами

$l_8, м$	$l_1, м$	$\omega_1, 1/сек$		$\omega_2, 1/сек$	
		заделки	шарниры	заделки	шарниры
20	30	15,847	15,324	19,705	17,114
	50	14,337	10,737	16,308	15,576
	80	7,411	5,164	15,603	14,754
40	30	15,438	13,771	17,495	15,55
	50	14,334	10,737	15,576	13,781
	80	7,411	5,164	15,353	13,764

Из таблицы 2 следует, что на частоту собственных колебаний системы по 1-му тону практически не оказывает влияния изменение длины последнего участка l_8. Оно проявляется, начиная с частоты 2-го тона. В то же время увеличение длины 1-го участка приводит к уменьшению значений собственных частот.

Из сравнения данных таблиц 1 и 2 следует, что при расчете частот собственных колебаний системы необходимо учитывать подземные участки, поскольку полученные значения собственных частот для системы с подземными участками не коррелируются с собственными частотами упрощенных моделей.

Жесткость пружин для модели в виде стержня с упругими опорами на концах (рис. 3) будем определять следующим образом:

$$c_{1i} = k_i D_н$$

где k_i - обобщенный коэффициент упругости подземного участка, $D_н$ - наружный диаметр трубы.

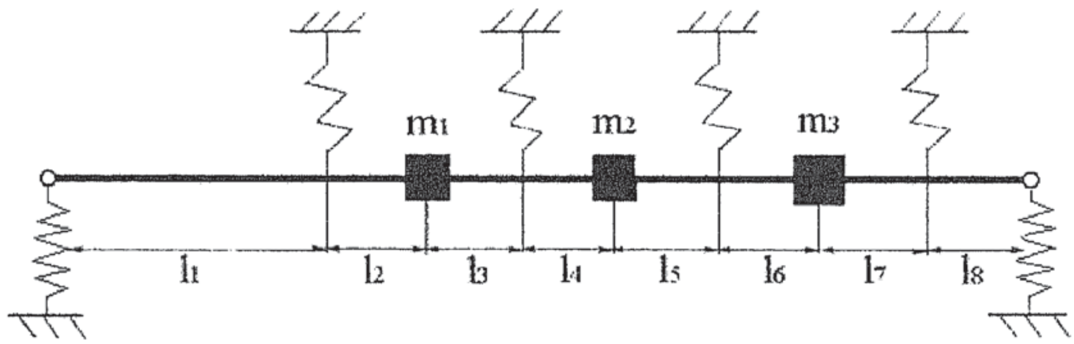

Рис.3. Расчетная схема системы с упругими опорами.

Тогда векторы состояния концевых сечений стержня в соответствии с (3) представим как:

$$\vec{X}_1(0) = \left(Y_1(0) \quad Y_1'(0) \quad 0 \quad \alpha_{11}Y_1(0)\right)^T, \qquad \vec{X}_N(1) = \left(Y_N(1) \quad Y_N'(1) \quad 0 \quad \alpha_{1N}Y_N(1)\right)^T.$$

Здесь $\alpha_{11} = {c_{11}l_1^3}/{EJ_1}$, $\alpha_{1N} = {c_{1N}l_N^3}/{EJ_N}$.

С тем чтобы исключить из расчетов неизвестные величины $Y_1(0)$ и $Y_1'(0)$ представим вектор $\vec{X}_1(0)$ в виде (9), где $\vec{X}_{11}(0)$ и $\vec{X}_{12}(0)$ - векторы, которые в рассматриваемом случае имеют следующий вид:

$$\vec{X}_{11}(0) = (1 \quad 0 \quad 0 \quad \alpha_{11})^T, \qquad \vec{X}_{12}(0) = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T.$$

После этого выполняется расчет, в которых векторы $\vec{X}_{11}$ и $\vec{X}_{12}$ по отдельности умножаются на все матрицы переходов и определяется вектор состояния сечения стержня на его конце в форме (10).

Этот вектор должен удовлетворять граничным условиям на правом конце стержня. В рассматриваемом случае это

$$M_N(1)=0, \quad Q_N(1)=\alpha_{1N}Y_N(1).$$

что приводит к алгебраическим уравнениям

$$C_1 M_{N1}(1)(1+\alpha_{11})+C_2 M_{N2}(1)=0$$
$$C_1(1+\alpha_{11})(Q_{N1}(1)-\alpha_{1N}Y_{N1}(1))+C_2(Q_{N2}(1)-\alpha_{1N}Y_{N2}(1))=0$$

Отсюда из условия $C_1 \neq 0$, $C_2 \neq 0$ получим частотное уравнение

$$\Delta(\omega_n^2)=M_{N1}(1)(Q_{N2}(1)-\alpha_{1N}Y_{N2}(1))-M_{N2}(1)(Q_{N1}(1)-\alpha_{1N}Y_{1N}(1))=0.$$

Результаты расчетов частот собственных колебаний модели с упругими опорами в зависимости от жесткости опорных пружин $c_{11}=c_{1N}$ приведены в таблице 3.

Таблица 3

Частоты собственных колебаний системы на упругих опорах.

$k_1=k_{10}$, Н/м^2	$D_н$, м	ω_1, рад/с	ω_2, рад/с	ω_3, рад/с	ω_4, рад/с
$3.5\cdot10^2$	1.02	5.751	9.695	15.45	18.876
	1.22	5.749	9.697	15.45	18.876
	1.42	5.747	9.698	15.45	18.876
$3.5\cdot10^3$	1.02	5.663	9.758	15.45	18.875
	1.22	5.644	9.771	15.45	18.875
	1.42	5.624	9.785	15.45	18.875
$3.5\cdot10^4$	1.02	4.68	10.353	15.448	18.87
	1.22	4.433	10.476	15.448	18.869
	1.42	4.17	10.598	15.447	18.868
$3.5\cdot10^5$	1.02	14.441	15.475	19.059	29.057
	1.22	14.953	15.538	19.18	29.069
	1.42	15.235	15.735	19.339	29.093
$3.5\cdot10^6$	1.02	15.347	17.262	24	34.367
	1.22	15.344	17.247	24.054	34.96
	1.42	15.342	17.235	24.073	35.339

Для определения амплитудных значений прогибов, углов поворота сечений стержня, а также изгибающего момента и перерезывающей силы, формируется вектор $\bar{X}_1(0) = (C_1 \quad C_2 \quad 0 \quad \alpha_{11})^T$, где полагается $C_1 = 1$, $C_2 = -M_{N1}(1)(1+\alpha_{11})/M_{N2}(1)$. Затем выполняется расчет, в котором последовательно проходят через все участки и стыки.

Приведенные в таблице 3 данные показывают, что диаметр трубы, определяющий величину жесткости опорных пружин системы с упругими опорами, практически не влияет на значения частот собственных колебаний для одного и того же значения коэффициента обобщенной упругости грунта. Существенное влияние на собственные частоты оказывает величина приведенного коэффициента обобщенной упругости грунта k_1. Сравнение данных таблиц 1 и 3 дает возможность проводить своего рода разделение грунтов подземных участков на так называемые «мягкие», с небольшим значением коэффициента k_1. и «жесткие», с большим значением коэффициента приведенной жесткости грунта.

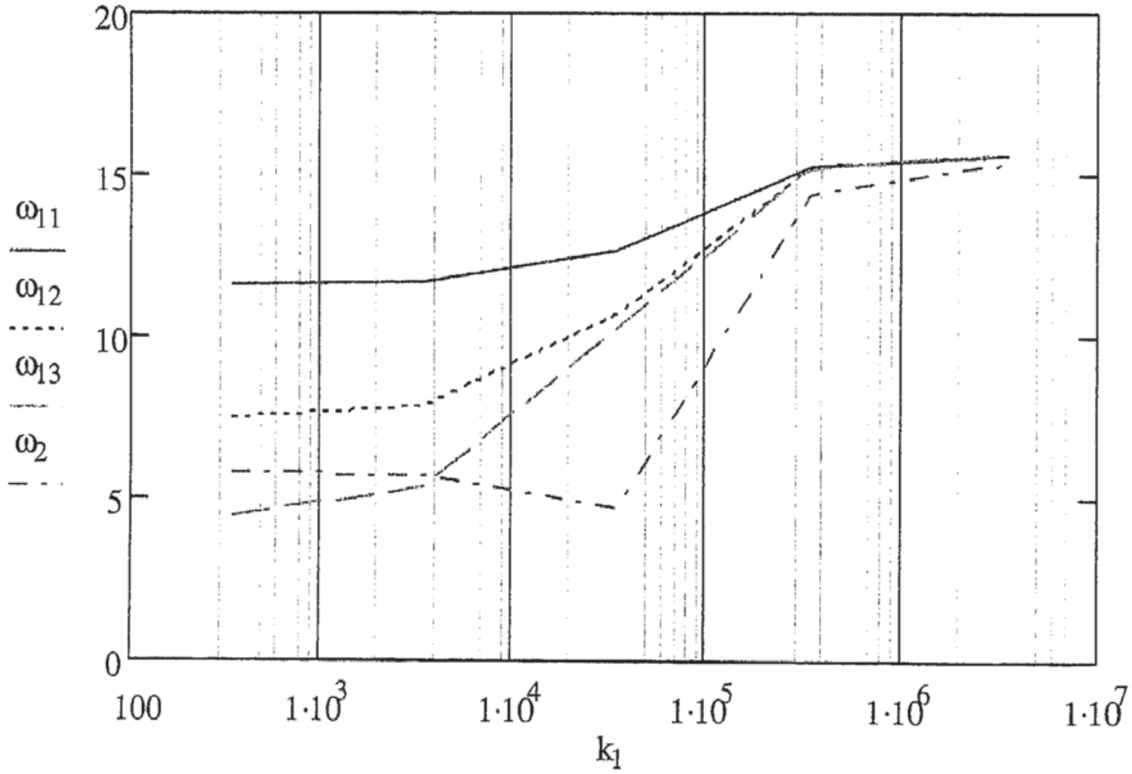

Рис. 4. Зависимости частот собственных колебаний системы от коэффициента жесткости «постели» подземных участков.

На рис. 4 схематично представлено сравнение частот собственных колебаний системы $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$ с подземными участками длиной $l_{подз} = 30м,\ 50м,\ 80м$ соответственно с частотой собственных колебаний с упругими опорами на концах ω_2. Из схемы видно, что упрощенная модель в виде системы с упругими опорами (рис. 3) дает хорошее совпадение собственных частот с частотами систем с подземными участками для грунтов с большим значением коэффициента приведенной жесткости k_1.

ВЫВОДЫ

Для определения динамических напряжений, возникающих в трубах в процессе ремонта газопроводов, необходима модель для расчета собственных частот такой системы. В работе показано, что в качестве модели можно использовать стержень на упругих подвесках с точечными массами при учете примыкающих подземных участков в виде упругого основания. В качестве упрощенной модели можно использовать системы с сосредоточенными упругими элементами на концах. Предлагаемый метод определения собственных частот дает возможность уходить от резонансных режимов изменением скорости рабочих органов механизмов. При этом уменьшаются динамические воздействия на трубы, что повышает надежность дальнейшей эксплуатации газопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость.// Издательство «Недра», Москва, 1982г., 341 с. с илл.

2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний//Издательство «Высшая школа», Москва, 1972г., 416 с. с илл.

3. Будзуляк Б.В., Халлыев Н.Х. и др. Комплексная механизация ремонта линейной части магистральных трубопроводов. М.: Недра, 2004 г.

4. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний // Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2003, 272 с. с илл.

5. Халлыев Н.Х., Кошелев Р.В. Математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния линейной части магистрального газопровода прикапитальном ремонте. – «Эксплуатация и ремонт (теория и практика)», 2007 г., №1, с. 070-081.