
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 629

**НАПРЯЖЕНИЯ В БАЛОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**
© 2023 г. Т. Н. Фесенко^{а,*}, Е. А. Дронова^а^аИнститут машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: ftat50@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В статье приведены основные зависимости, позволяющие определять и оценивать динамические составляющие напряжений и перемещений в магистральных газопроводах под действием движущейся сосредоточенной силы. Решения задачи приводятся для однопролетных, двухпролетных и трехпролетных балочных переходов. Согласно требованиям отраслевых документов принимались решения о дальнейшей эксплуатации переходов или необходимости их реконструкции.

Ключевые слова: трубопровод, деформации, напряжения, провис трубопровода, динамическая нагрузка, предельные состояния, допускаемые напряжения

DOI: 10.31857/S023571192305005X, EDN: WYVVLE

В статье рассматривается напряженное состояние в балочных переходах газопроводов, обусловленное динамическими нагрузками при возможном пропуске по газопроводу диагностических и очистных внутритрубных устройств (ВТУ). Такие напряжения являются дополнительными к напряжениям, возникающим от статической нагрузки. Напряжения в балочных переходах от статических нагрузок (провиса, перепада температур и продольной силы) рассмотрены в работе [1].

В статье приведены основные зависимости, позволяющие определять и оценивать динамические составляющие напряжений и перемещений в балках под действием движущейся сосредоточенной силы, основаны на анализе работ [3–5]. Основопологающей является классическая задача о колебаниях в вертикальной плоскости XU однопролетной балки длиной L с шарнирными опорами по концам при движении вдоль оси X постоянной поперечной силы G с постоянной скоростью v . В нашей методике для траектории груза используется исходная криволинейная ось балочного перехода, кривизна которой значительно (на порядок и более) превосходит кривизну той изогнутой оси балки, которая получается при движении груза по балочному переходу, причем не только при статическом, но и при динамическом расчете. Поэтому в нашем случае вполне подходящим является зависимость для динамического веса груза G_{dyn} в виде [4]

$$G_{\text{dyn}} = G_{\text{sta}} \left(1 + \frac{v^2}{\rho g} \right), \quad (1)$$

где G_{sta} – статический вес груза; m_G – масса груза; v – скорость движения груза ρ – радиус кривизны оси балки; g – ускорение свободного падения.

Выражение в скобках в формуле (1) можно рассматривать в качестве коэффициента динамичности в нашей задаче

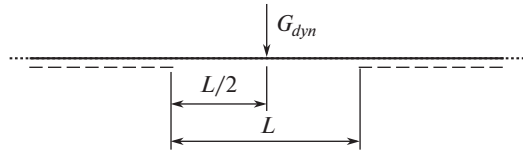


Рис. 1. Действительная схема однопролетного надземного балочного перехода.

$$\mu = 1 + \frac{v^2}{\rho g}$$

В этом случае динамический вес груза G_{dyn} равен

$$G_{dyn} = \mu G_{sta}$$

Входящий в коэффициент динамичности радиус кривизны ρ необходимо определять на основании полученного в работе авторов [1] выражения для уравнения оси профиля перехода. Учитывая связь между радиусом кривизны оси и ее кривизной в одной и той же точке оси

$$\rho(x) = \frac{1}{\kappa(x)}$$

Кривизна перехода газопровода находится по методике, представленной в работе [1].

Масса ВТУ принималась равной 1600 кг для газопроводов Ду 720 мм и 1500 кг – для Ду 530 мм.

Координаты точек приложения динамической силы принимались по следующему правилу: 1) для однопролетных переходов – в середине пролета; 2) для двухпролетных переходов – в середине большего пролета; 3) для трехпролетного перехода – в середине перехода.

Методика определения напряжений в однопролетном балочном переходе, вызванных динамическими нагрузками при пропуске внутритрубных устройств. Действительная схема надземного однопролетного балочного перехода представлена на рис. 1. Переход длиной L , нагруженный в середине пролета сосредоточенной вертикальной силой G_{dyn} , сопряжен с примыкающими подземными участками. Подземные участки рассматриваются как балки, лежащие на упругом основании. На рис. 1 эти участки выделены пунктирными линиями.

Динамическая вертикальная сила G_{dyn} определяется по формуле (1) с учетом массы ВТУ, скорости его прохождения и радиуса кривизны оси перехода в месте нахождения груза.

При определении НДС (напряженно-деформированного состояния) перехода, нагруженного динамической силой, приняты следующие допущения: 1) участок надземного перехода газопровода и примыкающие к нему подземные участки условно считаются прямолинейными; 2) участок надземного перехода газопровода вместе с примыкающими подземными участками рассматривается как статически неопределяемая система; 3) примыкающие с двух сторон подземные участки газопровода приняты в виде полубесконечных балок на упругом основании; 4) поскольку расчет ведется на действие только веса ВТУ, то газопровод рассматривается в виде невесомой балки, обладающей изгибной жесткостью. Действие собственного веса газопровода учтено при определении НДС надземных переходов по их фактическому положению [1].

Расчетная схема перехода (рис. 2а) представляет собой однопролетную балку, сопряженную на концах с полубесконечными балками, лежащими на упругом основании. Вся конструкция является прямолинейной и симметричной относительно середины пролета перехода.

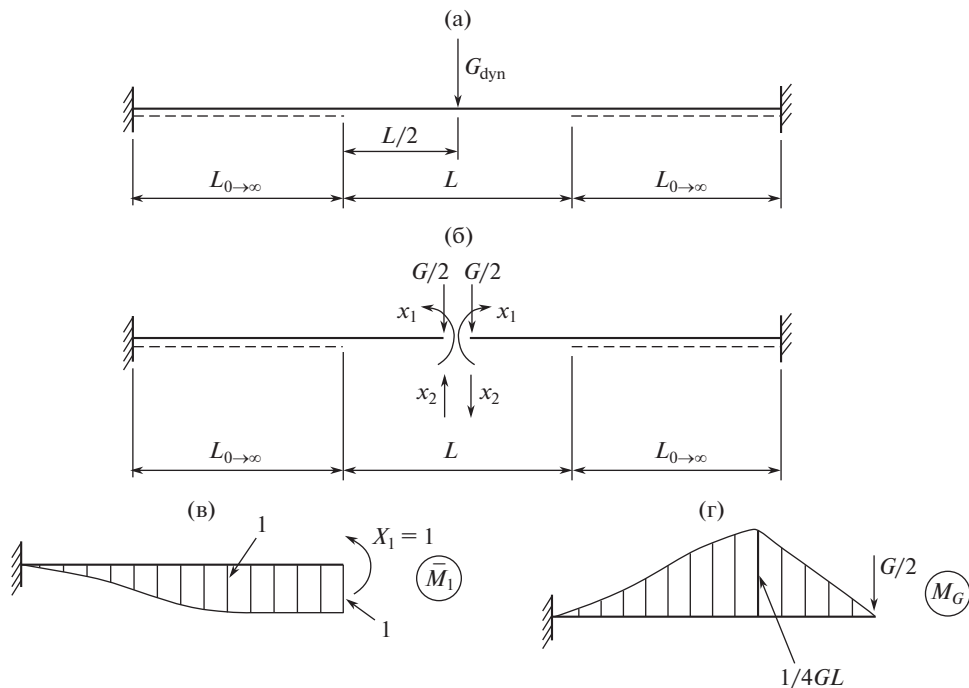


Рис. 2. Расчетная схема однопролетного перехода (а), основная система (б), единичная (в) и грузовая (г) эпюры изгибающих моментов.

Поскольку НДС примыкающих к переходу подземных участков, как балок на упругом основании, будет рассмотрено предварительно, то в общем случае рассматриваемая конструкция является трижды статически неопределимой. Так как продольная сила в балочных задачах принимается равной нулю, система вырождается в дважды статически неопределимую. Основная система рассматриваемой конструкции при решении задачи методом сил (рис. 2а) получена путем разрезания балки по оси симметрии с приложением неизвестных моментов X_1 и поперечных сил X_2 в месте разреза. В связи с геометрической симметрией и симметрией нагрузки кососимметричные неизвестные усилия X_2 равны нулю и система превращается в единожды статически неопределимую с неизвестным изгибающим моментом в середине перехода X_1 , который определяется из решения задачи.

Рассмотрим предварительно НДС примыкающих подземных участков надземного перехода под действием на них силовых факторов со стороны надземного перехода. На торец подземного участка – полубесконечной балки на упругом основании – со стороны перехода действует изгибающий момент и поперечная сила. Для определения НДС подземного участка газопровода рассмотрим полубесконечную балку на упругом основании, нагруженную в начальном сечении ($z = 0$) поочередно изгибающим моментом M и поперечной силой Q (рис. 3а, б).

При действии на конец подземного участка газопровода изгибающего момента M (рис. 3а) уравнение упругой линии (прогибы) подземного участка представим в системе координат $y-z$ в зависимости от так называемых затухающих функций

$$y = C_1 T(\beta z) + C_2 V(\beta z); \quad (2)$$

$$T(\beta z) = e^{-\beta z} \cos \beta z;$$

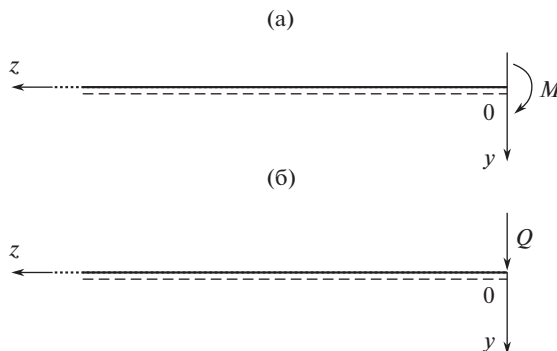


Рис. 3. Расчетные схемы примыкающих подземных участков для определения НДС.

$$V(\beta z) = e^{-\beta z} \sin \beta z,$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные, которые должны определяться из граничных условий задачи.

В формулах для затухающих функций используется параметр β (1/м), зависящий как от изгибной жесткости трубопровода, так и от деформационных свойств грунта

$$\begin{aligned} \beta &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}; \\ k &= c_{y0}D; \\ c_{y0} &= \frac{0.12E_{гр}}{(1 - \mu_{гр}^2)\sqrt{l_0D}}, \end{aligned} \tag{3}$$

где EI – изгибная жесткость трубопровода, МПа м²; $E_{гр}$ – модуль деформации грунта ненарушенной структуры, МПа; $\mu_{гр}$ – коэффициент Пуассона грунта; l_0 – единичная длина трубопровода ($l_0 = 1$ м); D – диаметр трубопровода наружный, м; c_{y0} – обобщенный коэффициент нормального сопротивления грунта при вертикальных перемещениях трубопровода вниз, МПа/м.

Выражение (3) основано на исследованиях, приведенных в работах [6, 7].

Граничные условия при действии изгибающего момента состоят в том, что в начальном сечении балки изгибающий момент равен M , а поперечная сила равна нулю (рис. 3а). При $z = 0$:

$$M(z = 0) = M; \tag{4}$$

$$Q(z = 0) = 0. \tag{5}$$

Используя общие выражения для изгибающего момента и поперечной силы

$$M(z) = \frac{d^2y}{dz^2} EI;$$

$$Q(z) = \frac{d^3y}{dz^3} EI,$$

подставляя в них выражение для упругой линии балки на упругом основании (2) и выполняя процедуры дифференцирования, получим зависимости для рассматриваемых силовых факторов в виде

$$\frac{1}{EI} M(z) = 2\beta^2 V(\beta z) C_1 - 2\beta^2 T(\beta z) C_2; \tag{6}$$

$$\frac{1}{EI} Q(z) = 2\beta^3 [T(\beta z) - V(\beta z)] C_1 + 2\beta^3 [T(\beta z) + V(\beta z)] C_2. \quad (7)$$

После подстановки выражений (6) и (7) в граничные условия (4), (5) получим систему из двух линейных уравнений относительно неизвестных C_i ($i = \overline{1, 2}$)

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\beta^2 V(0) C_1 - 2\beta^2 T(0) C_2 = 1; \\ 2\beta^3 [T(0) - V(0)] C_1 + 2\beta^3 [T(0) + V(0)] C_2 = 0. \end{array} \right\} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$T(0) = 1; \quad V(0) = 0.$$

Из решения системы уравнений (8) получим выражения для произвольных постоянных для случая нагружения (рис. 3а)

$$C_1 = \frac{M}{2\beta^2 EI}, \quad C_2 = -\frac{M}{2\beta^2 EI}.$$

Теперь с учетом выражений (2) и (6) уравнение упругой линии подземного участка (прогибы) $y_M(z)$ и изгибающие моменты $M_M(z)$ по всей длине балки ($0 \leq z < \infty$), вызванные действием изгибающего момента M в начальном сечении балки получим в виде

$$y_M(z) = \frac{M}{2\beta^2 EI} [T(\beta z) - V(\beta z)];$$

$$M_M(z) = M [T(\beta z) + V(\beta z)]. \quad (9)$$

Определяем НДС при действии поперечной силы в начальном сечении подземного участка. Граничные условия задачи состоят в том, что в начальном сечении подземного участка поперечная сила равна Q , а изгибающий момент равен нулю (рис. 3б). Таким образом, при $z = 0$

$$Q(z = 0) = Q;$$

$$M(z = 0) = 0.$$

Раскрывая данные граничные условия по методике, аналогичной представленной выше для случая нагружения изгибающим моментом, получим уравнение упругой линии подземного участка $y_Q(z)$ и изгибающие моменты $M_Q(z)$ по всей длине балки ($0 \leq z < \infty$), вызванные действием поперечной силы Q в начальном сечении балки

$$y_Q(z) = \frac{Q}{2\beta^3 EI} T(\beta z);$$

$$M_Q(z) = \frac{Q}{\beta} V(\beta z). \quad (10)$$

Теперь в соответствии с зависимостями (20) и (24) формулы для изгибающих моментов в подземных участках перехода при построении единичной (рис. 3в) и грузовой (рис. 3г) эпюры метода сил получим в виде

$$M_{X_1} = -1 \cdot [T(\beta z) + V(\beta z)];$$

$$M_G = \frac{1}{4} GL \left[T(\beta z) + \left(1 + \frac{2}{\beta L} \right) V(\beta z) \right].$$

Условие неразрывности деформаций метода сил для рассматриваемой статически неопределимой системы (рис. 2б) заключается в отсутствии взаимных угловых пере-

мещений плоскостей разреза левой и правой частей балки. Это условие записывается в виде

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1G} = 0, \quad (11)$$

где δ_{11} – единичный коэффициент метода сил – перемещение в основной системе в направлении действия момента X_1 при нагружении единичным моментом $X_1 = 1$; Δ_{1G} – грузовой коэффициент метода сил – перемещение в основной системе в направлении действия момента X_1 при действии динамической нагрузки G_{dyn} .

Из условия (11) получим выражение для неизвестного метода сил – изгибающего момента X_1

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1G}}{\delta_{11}}. \quad (12)$$

При определении единичного и грузового коэффициентов для частей эпюр, имеющих линейный закон изменения, используем обычное правило перемножения соответствующих эпюр изгибающих моментов (правило Верещагина). Для перемножения нелинейных эпюр применяется способ интегрирования. Ввиду симметрии системы перемножение эпюр проводится только для половины длины балки. В результате получены следующие выражения для единичного и грузового членов уравнения (11):

$$EI\delta_{11} = \frac{L}{2} \cdot 1 \cdot 1 + \int_0^{\infty} [T(\beta z) + V(\beta z)]^2 dz = \frac{L}{2} \left[1 + \frac{3}{2}(\beta L)^{-1} \right]; \quad (13)$$

$$EI\Delta_{1G} = -\frac{1}{2} \frac{L}{2} \frac{G_{\text{dyn}}L}{4} \cdot 1 - \int_0^{\infty} \left\{ \frac{1}{4} G_{\text{dyn}}L \left[T(\beta z) + \left(1 + \frac{2}{\beta L} \right) V(\beta z) \right] \right\} \times \\ \times [T(\beta z) + V(\beta z)] dz = -\frac{1}{16} G_{\text{dyn}}L^2 \left[1 + 3(\beta L)^{-1} + 2(\beta L)^{-2} \right]. \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (12), находим неизвестное метода сил X_1 .

Действительные изгибающие моменты по длине перехода теперь определяются по формуле

$$M = \bar{M}_1 X_1 + M_G,$$

т.е., сложением единичной эпюры \bar{M}_1 , увеличенной в X_1 раз, с грузовой эпюрой M_G . Максимальное значение изгибающего момента имеет место в середине пролета

$$M(L/2) = X_1.$$

Наибольшие изгибные напряжения (МПа) от действия динамической нагрузки при пропуске ВТУ определяются по формуле

$$\sigma_{\text{dyn}} = \pm \frac{M(L/2)}{W},$$

где W – момент сопротивления сечения газопровода, м³.

Методика определения НДС двухпролетного балочного перехода от динамических нагрузок. Определение НДС двухпролетного надземного перехода от действия динамических нагрузок при пропуске ВТУ выполняется для схемы нагружения, при которой динамическая нагрузка G_{dyn} находится в середине большого пролета перехода. Расчетная схема двухпролетного перехода с одной промежуточной скользящей опорой показана на рис. 4а. Общая длина надземного перехода равна L , длина отдельных пролетов составляет a и b , причем соблюдается условие, что $a \geq b$.

Расчетная схема двухпролетного перехода с одной промежуточной скользящей опорой (рис. 4) при условии, что закономерность изменения изгибающих моментов на

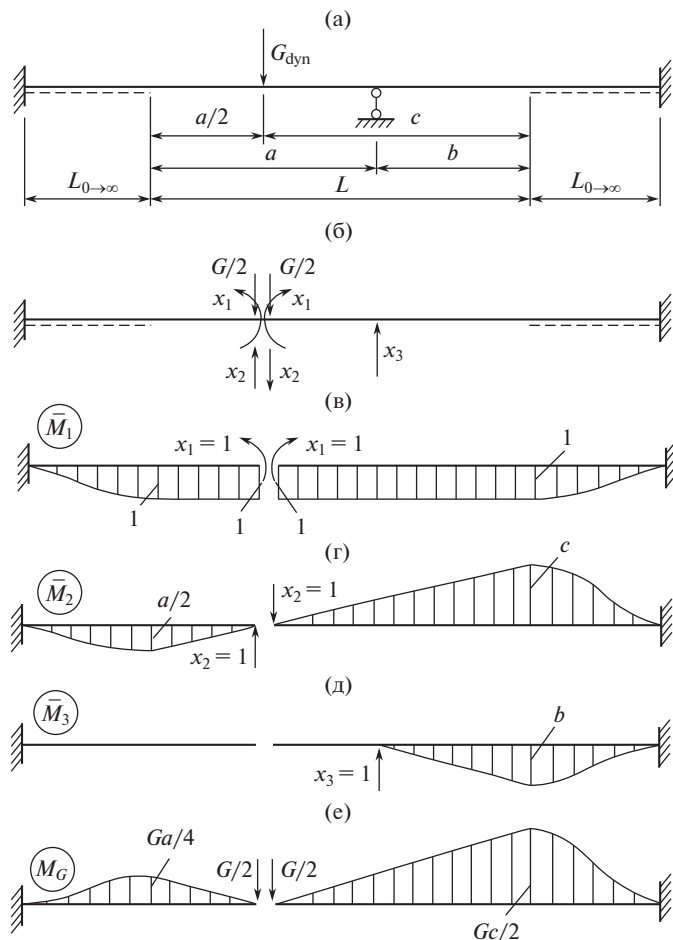


Рис. 4. Расчетная схема двухпролетного перехода (а), основная система (б), единичные (в)–(д) и грузовая (е) эпюры изгибающих моментов.

примыкающих подземных участках представляет собой трижды статически неопределимую балку. Основная статически определимая система метода сил (рис. 4б) получена путем разрезания конструкции в месте приложения силы G_{dyn} на две части с приложением в месте разреза неизвестных – моментов X_1 и поперечных сил X_2 , а также отбрасывания промежуточной опоры и приложения взамен ее неизвестной вертикальной реакции X_3 .

Для определения неизвестных моментов и усилий составляется система канонических уравнений метода сил

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \Delta_{1G} &= 0, \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \Delta_{2G} &= 0, \\ X_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3G} &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где δ_{ik} ($i = \overline{1,3}, k = \overline{1,3}$) – единичные коэффициенты метода сил; Δ_{iG} ($i = \overline{1,3}$) – грузовые коэффициенты метода сил – перемещения в основной системе в направлении i при действии динамической нагрузки G_{dyn} .

Первое уравнение выражает собой условие отсутствия взаимного угла поворота образовавшихся поперечных сечений в месте разреза балки, второе условие – отсутствие взаимного смещения этих сечений, а третье – отсутствие вертикального перемещения оси балки в сечении над промежуточной опорой.

Определение коэффициентов δ_{ik} и свободных членов Δ_{iG} системы уравнений (34) выполняется путем перемножения соответствующих единичных эпюр (рис. 4в, г, д) и грузовой (рис. 4е), построенных в основной системе метода сил. При выводе формул для коэффициентов и свободных членов системы уравнений используем способы перемножения эпюр (для надземных участков перехода) и интегрирования (для примыкающих подземных участков).

В результате получены следующие выражения для вычисления коэффициентов и свободных членов системы уравнений (15):

$$\begin{aligned}
 EI\delta_{11} &= L \left[1 + \frac{3}{2}(\beta L)^{-1} \right], \\
 EI\delta_{12} = EI\delta_{21} &= \frac{a^2}{8} - \frac{c^2}{2} + \frac{3a}{8\beta} \left[1 + \frac{1}{3}(\beta a)^{-1} \right] - \frac{3c}{4\beta} \left[1 + \frac{1}{3}(\beta c)^{-1} \right], \\
 EI\delta_{13} = EI\delta_{31} &= \frac{1}{2}b^2 \left\{ \frac{1}{\beta b} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\beta b} \right) \right] \right\}, \\
 EI\Delta_{1G} &= -\frac{1}{4}G \left(\frac{a^2}{4} + c \right) - \frac{G}{2\beta} \left(\frac{3}{8}a + \frac{3}{4}c + \frac{1}{2}\beta^{-1} \right), \\
 EI\delta_{22} &= \frac{a^3}{24} + \frac{c^3}{3} + \frac{5}{32} \frac{a^2}{\beta} \left[1 + \frac{4}{5}(\beta a)^{-1} + \frac{1}{5} \left(1 + \frac{2}{\beta a} \right)^2 \right] + \\
 &\quad + \frac{5}{8} \frac{c^2}{\beta} \left[1 + \frac{2}{5}(\beta c)^{-1} + \frac{1}{5} \left(1 + \frac{1}{\beta c} \right)^2 \right], \tag{16} \\
 EI\delta_{23} = EI\delta_{32} &= \frac{1}{3}b^3 \left(1 + \frac{3a}{4b} \right) - \frac{5bc}{8\beta} \left[1 + \frac{1}{5} \left(\frac{1}{\beta b} + \frac{1}{\beta c} \right) + \frac{1}{5} \left(1 + \frac{1}{\beta b} \right) \left(1 + \frac{1}{\beta c} \right) \right], \\
 EI\Delta_{2G} &= G \left\{ -\frac{1}{48}a^3 + \frac{1}{6}c^3 - \frac{1}{64} \frac{a^2}{\beta} \left[5 + 4(\beta a)^{-1} + \left(1 + \frac{1}{\beta a} \right)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{16} \frac{c^2}{\beta} \left[5 + 2(\beta a)^{-1} + \left(1 + \frac{1}{\beta a} \right)^2 \right] \right\}, \\
 EI\delta_{33} &= \frac{1}{3}b^3 + \frac{5b^2}{8\beta} \left[1 + \frac{2}{5}(\beta b)^{-1} + \frac{1}{5} \left(1 + \frac{1}{\beta b} \right)^2 \right], \\
 EI\Delta_{3G} &= -\frac{1}{6}Gb \left\{ b^2 \left(1 + \frac{3a}{4b} \right) + \frac{3c}{8\beta} \left[6 + 2(\beta b)^{-1} + 2(\beta c)^{-1} + (\beta b\beta c)^{-1} \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Вычисляя значения коэффициентов и свободных членов (16) и подставляя далее их в систему канонических уравнений (15) и решая ее, получим значения неизвестных усилий и моментов X_i ($i = \overline{1,3}$).

Действительные изгибающие моменты по длине перехода теперь определяются по формуле

$$M = \bar{M}_1 X_1 + \bar{M}_2 X_2 + \bar{M}_3 X_3 + M_G,$$

т.е., сложением единичных эпюр \bar{M}_i , увеличенных в X_i раз, с грузовой эпюрой M_G .

Анализ показал, что максимальные значения изгибающего момента могут быть в одном из 4-х сечений перехода с продольной координатой x , отсчитываемой от левого крайнего сечения надземного перехода, и определяемые следующими выражениями:

$$M(0) = X_1 + \frac{a}{2} X_2 - \frac{a}{4} G \quad \text{при} \quad x = 0; \quad (17)$$

$$M(a/2) = X_1 \quad \text{при} \quad x = \frac{a}{2}; \quad (18)$$

$$M(a) = X_1 - \frac{a}{2} X_2 - \frac{a}{4} G \quad \text{при} \quad x = a; \quad (19)$$

$$M(L) = X_1 - c X_2 - \frac{c}{2} G \quad \text{при} \quad x = L. \quad (20)$$

Расчетным изгибающим моментом будет большее по абсолютной величине значение из найденных по выражениям (17)–(20).

Методика определения НДС трехпролетного балочного перехода от динамических нагрузок. Расчетная схема трехпролетного перехода с двумя промежуточными скользящими опорами с учетом принятого допущения о равенстве пролетов показана на рис. 5а.

При условии, что закономерность изменения изгибающих моментов на примыкающих подземных участках является известной, представляет собой в общем случае 5 раз статически неопределимую неразрезную балку. Однако пренебрежение продольной силой, а также симметрия геометрии системы и приложенных к ней нагрузок приводят систему к дважды статически неопределимой. Основная статически определимая система метода сил (рис. 5б) получена путем разрезания конструкции в точке симметрии системы (месте приложения силы $G_{\text{дин}}$) на две части и отбрасывания промежуточных опор. В месте разреза прикладываются неизвестные моменты X_1 , а в месте опор – неизвестные вертикальные реакции X_2 . Формально на рис. 5б также показаны в месте разреза.

Для определения неизвестных моментов и усилий составляется система канонических уравнений метода сил

$$\begin{aligned} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \Delta_{1G} &= 0; \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \Delta_{2G} &= 0, \end{aligned} \quad (21)$$

где δ_{ik} ($i = \overline{1, 2}$, $k = \overline{1, 2}$) – единичные коэффициенты метода сил; Δ_{iG} ($i = \overline{1, 2}$) – грузовые коэффициенты метода сил – перемещения в основной системе в направлении i при действии динамической нагрузки $G_{\text{дин}}$.

Определение коэффициентов δ_{ik} и свободных членов Δ_{iG} системы уравнений (21) выполняется путем перемножения соответствующих единичных эпюр (рис. 5в, г) и грузовой (рис. 5д), построенных в основной системе метода сил.

Таким образом, получим следующие выражения для коэффициентов и свободных членов системы уравнений (21):

$$\begin{aligned} EI\delta_{11} &= \frac{1}{2} L \left[1 + \frac{3}{2} (\beta L)^{-1} \right], \\ EI\delta_{12} &= EI\delta_{21} = \frac{1}{18} L^2 \left\{ 1 + \frac{9}{2} (\beta L)^{-1} \left[1 + (\beta L)^{-1} \right] \right\}, \\ EI\Delta_{1G} &= -\frac{1}{16} GL^2 \left\{ 1 + 2(\beta L)^{-1} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\beta L} \right) \right] \right\}, \\ EI\delta_{22} &= \frac{1}{81} L^3 \left\{ 1 + \frac{27}{8} (\beta L)^{-1} \left[1 + \frac{2}{3} (1 + 3(\beta L)^{-1}) + \frac{1}{3} (1 + 3 * (\beta L)^{-2})^2 \right] \right\}, \end{aligned}$$

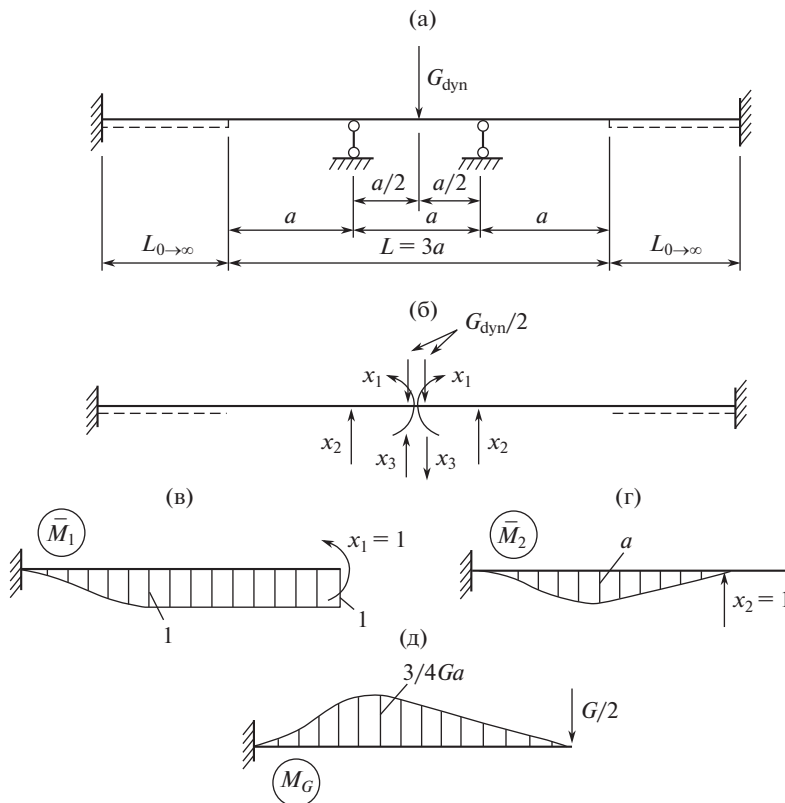


Рис. 5. Расчетная схема трехпролетного перехода (а), основная система (б), единичные (в)–(г) и грузовая (д) эпюры изгибающих моментов.

$$EI\Delta_{2G} = -\frac{7}{648}GL^3 \left\{ 1 + \frac{405}{84}(\beta L)^{-1} \left[1 + (\beta L)^{-1} + \frac{1}{5} \left(1 + \frac{3}{\beta L} \right) \left(1 + \frac{2}{\beta L} \right) \right] \right\}.$$

Оценка напряженного состояния балочного перехода. Вывод об уровне напряжений и степени опасности состояния участка балочного перехода можно сделать путем сравнения полученных продольных и эквивалентных напряжений с допускаемыми по нормам проектирования трубопроводов [2].

Должны выполняться следующие условия для продольных фибровых напряжений [1]:

$$\text{при растягивающих напряжениях } \sigma^+ \leq [\sigma]; \tag{22}$$

$$\text{при сжимающих напряжениях } \sigma_{\text{equ}} \leq [\sigma]. \tag{23}$$

Эквивалентное напряжение определяется в соответствии с выражением

$$\sigma_{\text{equ}} = \sqrt{\sigma_{\text{кц}}^2 - \sigma_{\text{кц}}\sigma^- + (\sigma^-)^2}.$$

Допускаемое напряжение в правых частях формул (22) и (23) соответствует нормам [2] и определяется по формуле

$$[\sigma] = \frac{m}{0.9k_H} R_2^H,$$

где R_2^H – нормативный предел текучести материала труб; m – коэффициент условий работы участка газопровода; k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода.

Максимальные (по модулю) результирующие продольные фибровые напряжения находим как алгебраическую сумму максимальных статических напряжений σ^+ и σ^- [1] и динамических напряжений σ_{dyn} . При этом следует учитывать знаки кривизны от действия статического и динамического нагружений. Поскольку конфигурация всех рассматриваемых балочных переходов является единообразной в том смысле, что изогнутая ось каждого из них направлена выпуклостью вниз, то результирующие напряжения определяются следующим образом

$$\sigma_{\Sigma}^+ = \sigma^+ + \sigma_{dyn};$$

$$\sigma_{\Sigma}^- = \sigma^- - \sigma_{dyn}.$$

Сравнением полученных напряжений с допускаемыми по нормам проектирования [2] делается вывод об уровне напряжений и степени опасности состояния участка балочного перехода газопровода и на основании этого делается вывод о дальнейшей работе участка или его ремонте.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фесенко Т.Н., Дронова Е.А.* Методика определения и оценки напряженного состояния балочных переходов магистральных газопроводов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 2. С. 59.
2. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. М.: ИРЦ ОАО “Газпром”, 2002.
3. *Тимошенко С.П.* Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. 704 с.
4. *Пановко Я.Г., Губанова И.И.* Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1979. 384 с.
5. *Филиппов А.П.* Колебания деформируемых систем. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1970. 736 с.
6. *Айнбиндер А.Б.* Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.
7. *Mahmoodian M.* Reliability and Maintainability of in-Service Pipelines. Gulf Professional Publishing, 2018. 186 p.