

УДК 622.691  
3-12

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ ЦИЛИНДРО-КОНИЧЕСКИ-СФЕРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Вал. В. Зайцев, канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>;  
Д. В. Зайцев, канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup>;  
В. В. Зайцев, д-р техн. наук, проф.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск;

<sup>2</sup>Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

**Аннотация.** Исследована прочность элементов новых типов трубопроводов — подвижных, предназначенных для транспортировки сжатого природного газа, одним из элементов которых является цилиндр в сочетании с усеченным конусом и сферическим сегментом. Описан алгоритм расчетов и приведены результаты определения прочности для одного из наборов исходных данных.

**Ключевые слова:** подвижный трубопровод, цилиндро-конический-сферический элемент, прочность, сжатый газ.

**Анотація.** Досліджено міцність елементів нових типів трубопроводів — рухомих, призначених для транспортування стиснутого природного газу, одним з елементів яких є циліндр у поєднанні з усіченим конусом і сферичним сегментом. Описано алгоритм розрахунків та наведено результати визначення міцності для одного з наборів вихідних даних.

**Ключові слова:** рухомий трубопровід, циліндро-конічно-сферичний елемент, міцність, стиснутий газ.

**Abstract.** The component strength of new types of pipelines is investigated which are flexible pipelines designed for transportation of compressed natural gas, one component of which is a cylinder in a combination with a truncated cone and a spherical segment. The algorithm of calculations is described and the results of calculating the strength of one of the input data sets are shown.

**Keywords:** flexible pipeline, cylinder-conic spherical component, strength, compressed gas.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Во многих странах в настоящее время идет активное развитие теоретической и технологической базы для транспортировки сжатого природного газа морем. Разрабатываются различные типы судов, в том числе суда — носители подвижных трубопроводов. Одним из вариантов компоновки подвижного трубопровода [1] может быть модульный пространственный змеевик (рис. 1).

Пространственный змеевик разделен на блоки, каждый из которых заканчивается цилиндро-коническим-сферическим элементом (рис. 2).

Элементы подвижного трубопровода, опоры, а также детали креплений подвержены воздействию целого ряда всевозможных нагрузок и их комбина-

ций, одной из основных нагрузок является расчетное внутреннее давление сжатого газа (рис. 3).

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Общие зависимости для расчетов прочности осесимметричных сосудов, работающих под давлением, опубликованы в [2]. Суда, которые транспортируют газы, их конструкции описаны в [3], но проблемы расчетов прочности и транспортировки сжатого природного газа в этих публикациях не рассмотрены.

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** — расчет прочности цилиндро-коническо-сферического элемента подвижного трубопровода, нагруженного расчетным давлением газа.

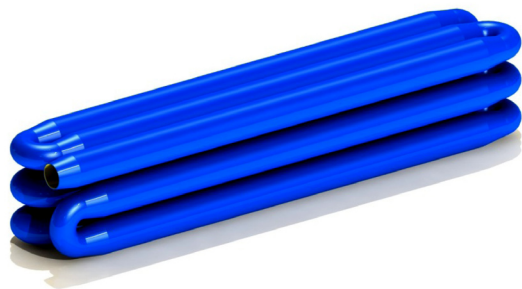


Рис. 1. Модуль пространственного змеевика подвижного трубопровода

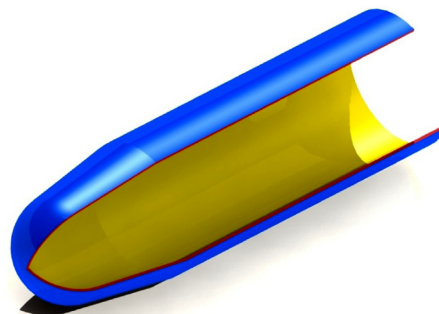


Рис. 2. Цилиндро-коническо-сферический элемент подвижного трубопровода

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

Основой для расчета послужили зависимости, полученные в [2].

Исходные данные:  $\delta_c, \delta_k, \delta_{\Pi}$  — соответственно толщины оболочек сферической, конической и цилиндрической частей подвижного трубопровода, м;  $E$  — модуль упругости материалов оболочек (оболочки изготовлены из одинакового материала), Па;  $\mu$  — коэффициент поперечной деформации материала оболочек трубопровода;  $h_k$  — высота конусной части оболочки, м;  $\theta_k$  — угол наклона образующей конусной части оболочки, град;  $\theta_0$  — конечный угол для сферической части оболочки, град;  $a$  — радиус основания конической части, м;  $p$  — расчетное давление газа, Па;  $R$  — радиус цилиндрической части оболочки, м.

Принятые обозначения:  $R_c$  — радиус сферической части оболочки, м;  $R_2$  — главный радиус кривизны для конусной части оболочки подвижного трубопровода (величина, равная отрезку нормали к поверхности от оси вращения конусной части оболочки), м;  $b$  — радиус вершины конической части оболочки, м;  $S_0$  — длина образующей конической части оболочки, м;  $T_{1,c}, T_{1,k}, T_{1,\Pi}$  — меридиональные усилия соответственно в сферической, конической и цилиндрической частях оболочки, Н/м;  $T_{2,c}, T_{2,k}, T_{2,\Pi}$  — кольцевые усилия соответственно в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Н/м;  $M_{1,c}, M_{1,k}, M_{1,\Pi}$  — меридиональные моменты соответственно в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Н;  $M_{2,c}, M_{2,k}, M_{2,\Pi}$  — кольцевые моменты в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Н;  $\sigma_{T1,c}, \sigma_{T1,k}, \sigma_{T1,\Pi}$  — цепные напряжения в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па;  $\sigma_{T2,c}, \sigma_{T2,k}, \sigma_{T2,\Pi}$  — мембранные напряжения в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па;  $\sigma_{M1,c}, \sigma_{M2,c}, \sigma_{M1,k}, \sigma_{M2,k}, \sigma_{M1,\Pi}, \sigma_{M2,\Pi}$  — изгибные напряжения в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па;  $\sigma_{1P,c}, \sigma_{2P,c}, \sigma_{1P,k}, \sigma_{2P,k}, \sigma_{1P,\Pi}, \sigma_{2P,\Pi}$  — главные растягивающие напряжения в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па;  $\sigma_{1Ж,c}, \sigma_{2Ж,c}, \sigma_{1Ж,k}, \sigma_{2Ж,k}, \sigma_{1Ж,\Pi}, \sigma_{2Ж,\Pi}$  — главные сжимающие напряжения в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па;  $\sigma_{IV,P,c}, \sigma_{IV,Ж,c}, \sigma_{IV,P,k}, \sigma_{IV,Ж,k}, \sigma_{IV,P,\Pi}, \sigma_{IV,Ж,\Pi}$  — растягивающие и сжимающие напряжения по четвертой теории прочности в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек трубопровода, Па.

На основании формул из [2, 3] получим исходные зависимости для цилиндрической части оболочки подвижного трубопровода:

$$T_{1,\Pi} = p \frac{R}{2};$$

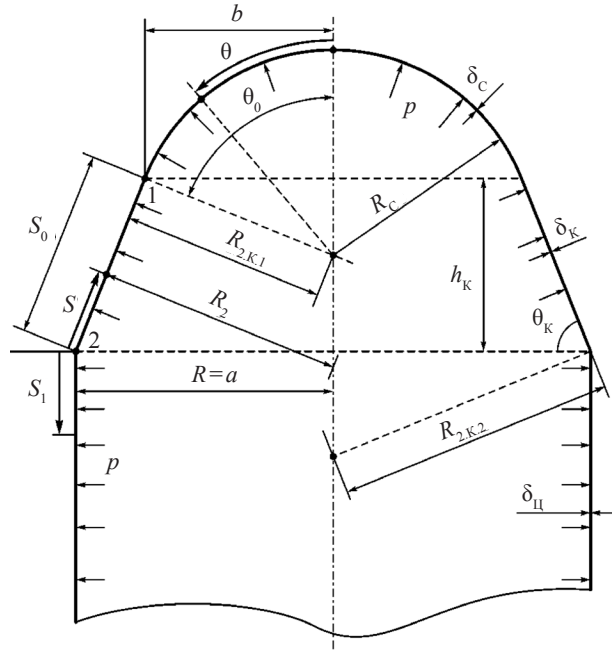


Рис. 3. Схема цилиндро-коническо-сферического элемента оболочек подвижного трубопровода

$$T_{2,\Pi} = (C'_{1,\Pi} \cos \beta_{\Pi} - C''_{1,\Pi} \sin \beta_{\Pi}) \cdot e^{-\beta_{\Pi}} + pR;$$

$$M_{1,\Pi} = -c_{\Pi} \cdot (C''_{1,\Pi} \cos \beta_{\Pi} + C'_{1,\Pi} \sin \beta_{\Pi}) \cdot e^{-\beta_{\Pi}};$$

$$M_{2,\Pi} = \mu M_{1,\Pi};$$

$$Q_{X,\Pi} = -\sqrt{\frac{c_{\Pi}}{2R}} [(C'_{1,\Pi} - C''_{1,\Pi}) \cos \beta_{\Pi} - (C'_{1,\Pi} + C''_{1,\Pi}) \sin \beta_{\Pi}] \cdot e^{-\beta_{\Pi}};$$

$$Q_{Z,\Pi} = T_{1,\Pi} = p \frac{R}{2};$$

$$\Delta_{X,\Pi} = \frac{R}{E\delta_{\Pi}} (C'_{1,\Pi} \cos \beta_{\Pi} - C''_{1,\Pi} \sin \beta_{\Pi}) \cdot e^{-\beta_{\Pi}} + p \frac{R^2}{E\delta_{\Pi}} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right);$$

$$U_{\Pi} = \frac{1}{E\delta_{\Pi}} \sqrt{\frac{R}{2c_{\Pi}}} [(C'_{1,\Pi} + C''_{1,\Pi}) \cos \beta_{\Pi} + (C'_{1,\Pi} - C''_{1,\Pi}) \sin \beta_{\Pi}] \cdot e^{-\beta_{\Pi}},$$

где

$$\theta_{\Pi} = \frac{\pi}{2} = \text{const}; \quad R_{1,\Pi} = \infty; \quad R_{2,\Pi} = R = a = \text{const};$$

$$\beta_{\Pi} = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \int_0^{S_1} \frac{dS_1}{\sqrt{R\delta_{\Pi}}} = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \frac{S_1}{\sqrt{R\delta_{\Pi}}};$$

$$c_{\Pi} = \frac{\delta_{\Pi}}{\sqrt{12(1-\mu^2)}};$$

$C'_{1,\Pi}, C''_{1,\Pi}$  — постоянные интегрирования.

Расчетные зависимости для конической части оболочки подвижного трубопровода:

$$T_{1,K} = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2,K}}} \operatorname{ctg} \theta_K \left\{ [(C'_{1,K} - C''_{1,K}) \cos \beta_K - (C'_{1,K} + C''_{1,K}) \sin \beta_K] \cdot e^{-\beta_K} + \right. \\ \left. - (C'_{2,K} + C''_{2,K}) \sin \beta_K \right\} \cdot e^{\beta_K} + p \frac{R_{2,K}}{2};$$

$$T_{2,K} = (C'_{1,K} \cos \beta_K - C''_{1,K} \sin \beta_K) \cdot e^{-\beta_K} + (C'_{2,K} \cos \beta_K + C''_{2,K} \sin \beta_K) \cdot e^{\beta_K} + pR_{2,K};$$

$$M_{1,K} = -c_K [(C'_{1,K} \cos \beta_K + C'_{1,K} \sin \beta_K) \cdot e^{-\beta_K} + (C''_{2,K} \cos \beta_K - C'_{2,K} \sin \beta_K) \cdot e^{\beta_K}];$$

$$M_{2,K} = \mu M_{1,K};$$

$$Q_{X,K} = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2,K}}} \frac{1}{\sin \theta_K} \left\{ [(C'_{1,K} - C''_{1,K}) \cos \beta_K - (C'_{1,K} + C''_{1,K}) \sin \beta_K] \cdot e^{-\beta_K} + \right. \\ \left. - (C'_{2,K} + C''_{2,K}) \sin \beta_K \right\} \cdot e^{\beta_K} + p \frac{R_{2,K}}{2} \cos \theta_K;$$

$$Q_{Z,K} = p \frac{R_{2,K}}{2} \sin \theta_K;$$

$$\Delta_{X,K} = \frac{R_{2,K} \sin \theta_K}{E\delta_K} \left[ (C'_{1,K} \cos \beta_K - C''_{1,K} \sin \beta_K) \cdot e^{-\beta_K} + (C'_{2,K} \cos \beta_K + C''_{2,K} \sin \beta_K) \cdot e^{\beta_K} \right] + p \frac{R_{2,K}^2 \sin \theta_K}{2E\delta_K} (2 - \mu);$$

$$U_K = \frac{1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_{2,K}}{2c_K}} \left\{ [(C'_{1,K} + C''_{1,K}) \cos \beta_K + (C'_{2,K} + C''_{2,K}) \cos \beta_K + (C'_{1,K} - C''_{1,K}) \sin \beta_K] \cdot e^{-\beta_K} - \right. \\ \left. + (C'_{2,K} - C''_{2,K}) \sin \beta_K \right\} \cdot e^{\beta_K};$$

где

$$\theta_K = \operatorname{const}; \quad R_{1,K} = \infty; \quad R_{2,K} = \frac{a}{\sin \theta_K} - S \cdot \operatorname{ctg} \theta_K;$$

$$\beta_K = \frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{\delta_K} \operatorname{ctg} \theta_K} \left( \sqrt{\frac{a}{\sin \theta_K}} - S \cdot \operatorname{ctg} \theta_K - \sqrt{\frac{a}{\sin \theta_K}} \right);$$

$$c_K = \frac{\delta_K}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}; \quad a = R;$$

$C'_{1,K}, C''_{1,K}, C'_{2,K}, C''_{2,K}$  — постоянные интегрирования  
Расчетные зависимости для сферической части оболочки подвижного трубопровода:

$$T_{1,C} = -\sqrt{\frac{c_C}{2R_C}} \operatorname{ctg} \theta [(C''_{2,C} - C'_{2,C}) \cos \beta_C - (C'_{2,C} + C''_{2,C}) \sin \beta_C] \cdot e^{\beta_C} + p \frac{R_C}{2};$$

$$T_{2,C} = (C'_{2,C} \cos \beta_C + C''_{2,C} \sin \beta_C) \cdot e^{\beta_C} + p \frac{R_C}{2};$$

$$M_{1,C} = -c_C [(C''_{2,C} \cos \beta_C - C'_{2,C} \sin \beta_C) \cdot e^{\beta_C}];$$

$$M_{2,C} = \mu M_{1,C};$$

$$Q_{X,C} = -\sqrt{\frac{c_C}{2R_C}} \frac{1}{\sin \theta} [(C''_{2,C} - C'_{2,C}) \cos \beta_C - (C'_{2,C} + C''_{2,C}) \sin \beta_C] \cdot e^{\beta_C} + p \frac{R_C}{2} \cos \theta;$$

$$Q_{Z,C} = p \frac{R_C}{2} \sin \theta;$$

$$\Delta_{X,C} = \frac{R_C \sin \theta}{E\delta_C} [(C'_{2,C} \cos \beta_C + C''_{2,C} \sin \beta_C) \cdot e^{\beta_C}] + p \frac{R_C^2 \sin \theta}{2E\delta_C} (1 - \mu),$$

$$U_C = \frac{-1}{E\delta_C} \sqrt{\frac{R_C}{2c_C}} [(C''_{2,C} + C'_{2,C}) \cos \beta_C + (C''_{2,C} - C'_{2,C}) \sin \beta_C] \cdot e^{\beta_C},$$

где

$$R_{1,C} = R_{2,C} = R_C = \operatorname{const};$$

$$\beta_C = -\sqrt{3(1-\mu^2)} \sqrt{\frac{R_C}{\delta_C}} (\theta_0 - \theta); \quad c_C = \frac{\delta_C}{\sqrt{12(1-\mu^2)}};$$

$C'_{2,C}, C''_{2,C}$  — постоянные интегрирования.

На основании расчетной схемы (рис. 4) запишем граничные условия для узлов стыковки цилиндрической, конической и сферической оболочек подвижного трубопровода.

Граничными условиями будут соответствующие равенства углов поворота  $U$ , моментов  $M_1$ , радиальных усилий  $Q_X$  и радиальных перемещений  $\Delta_X$ :

$$\Delta_{X,C1} = \Delta_{X,K1}; \quad U_{C1} = U_{K1}; \quad Q_{X,C1} = Q_{X,K1}; \quad M_{1,C1} = M_{1,K1};$$

$$\Delta_{X,K2} = \Delta_{X,\Pi2}; \quad U_{K2} = U_{\Pi2}; \quad Q_{X,K2} = Q_{X,\Pi2}; \quad M_{1,K2} = M_{1,\Pi2};$$

где  $\Delta_{X,C1}, \Delta_{X,K1}, \Delta_{X,K2}, \Delta_{X,\Pi2}$  — радиальные перемещения сферической, конической и цилиндрической частей оболочек подвижного трубопровода, м;  $U_{C1}, U_{K1}, U_{K2}, U_{\Pi2}$  — углы поворота сферической, конической и цилиндрической частей оболочек подвижного трубопровода, рад;  $Q_{X,C1}, Q_{X,K1}, Q_{X,K2}, Q_{X,\Pi2}$  — радиальные усилия в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек подвижного трубопровода, Н/м;  $M_{1,C1}, M_{1,K1}, M_{1,K2}, M_{1,\Pi2}$  — меридиональные моменты в сферической, конической и цилиндрической частях оболочек подвижного трубопровода, Н.

Определим значения деформационных и силовых компонентов на верхней кромке цилиндрической части оболочки подвижного трубопровода (точка 2 — см. рис. 4):

$$S_1 = 0; \quad \theta_{\Pi} = \pi/2 = \operatorname{const};$$

$$R_{1,\Pi} = \infty; \quad R_{2,\Pi} = R = a = \operatorname{const}; \quad \beta_{\Pi} = 0;$$

$$\Delta_{X,\Pi2} = \frac{R}{E\delta_{\Pi}} C'_{1,\Pi} + p \frac{R^2}{E\delta_{\Pi}} \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right);$$

$$U_{\Pi2} = \frac{1}{E\delta_{\Pi}} \sqrt{\frac{R}{2c_{\Pi}}} (C'_{1,\Pi} + C''_{1,\Pi});$$

$$Q_{X.Ц.2} = -\sqrt{\frac{c_{Ц}}{2R}} (C'_{1.Ц} - C''_{1.Ц});$$

$$M_{1.Ц.2} = -c_{Ц} C''_{1.Ц}.$$

Деформационные и силовые компоненты на верхней кромке конической части оболочки подвижного трубопровода (точка 1 на рис. 4):

$$S = S_0; \theta_K = \text{const}; R_{1.K.1} = \infty;$$

$$\Delta_{X.K.1} = \frac{R_{2.K.1} \sin \theta_K}{E\delta_K} \left[ (C'_{1.K} \cos \beta_{K.1} - C''_{1.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{-\beta_{K.1}} + (C'_{2.K} \cos \beta_{K.1} + C''_{2.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{\beta_{K.1}} \right] + p \frac{R_{2.K.1}^2 \sin \theta_K}{2E\delta_K} (2 - \mu);$$

$$U_{K.1} = \frac{1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_{2.K.1}}{2c_K}} \left\{ [(C'_{1.K} + C''_{1.K}) \cos \beta_{K.1} + (C'_{1.K} - C''_{1.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{-\beta_{K.1}} - [(C'_{2.K} + C''_{2.K}) \cos \beta_{K.1} + (C'_{2.K} - C''_{2.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{\beta_{K.1}} \right\};$$

$$Q_{X.K.1} = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2.K.1} \sin \theta_K}} \left\{ [(C'_{1.K} - C''_{1.K}) \cos \beta_{K.1} - (C'_{1.K} + C''_{1.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{-\beta_{K.1}} + [(C'_{2.K} - C''_{2.K}) \cos \beta_{K.1} - (C'_{2.K} + C''_{2.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{\beta_{K.1}} \right\} + p \frac{R_{2.K.1}}{2} \cos \theta_K;$$

$$M_{1.K.1} = -c_K \left[ (C''_{1.K} \cos \beta_{K.1} + C'_{1.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{-\beta_{K.1}} + (C''_{2.K} \cos \beta_{K.1} - C'_{2.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{\beta_{K.1}} \right],$$

где

$$R_{2.K.1} = \frac{a}{\sin \theta_K} - S_0 \text{ctg} \theta_K;$$

$$\beta_{K.1} = \frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{\delta_K} \text{ctg} \theta_K} \left( \sqrt{\frac{a}{\sin \theta_K} - S_0 \cdot \text{ctg} \theta_K} - \sqrt{\frac{a}{\sin \theta_K}} \right).$$

Деформационные и силовые компоненты на нижней кромке конической части подвижного трубопровода (точка 2):

$$S = 0; \theta_K = \text{const}; R_{1.K.2} = \infty; \beta_{K.2} = 0;$$

$$\Delta_{X.K.2} = \frac{R_{2.K.2} \sin \theta_K}{E\delta_K} [C'_{1.K} + C'_{2.K}] + p \frac{R_{2.K.2}^2 \sin \theta_K}{2E\delta_K} (2 - \mu);$$

$$U_{K.2} = \frac{1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_{2.K.2}}{2c_K}} [(C'_{1.K} + C''_{1.K}) - (C'_{2.K} + C''_{2.K})];$$

$$Q_{X.K.2} = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2.K.2} \sin \theta_K}} (C'_{1.K} - C''_{1.K} + C'_{2.K} - C''_{2.K}) + p \frac{R_{2.K.2}}{2} \cos \theta_K;$$

$$M_{1.K.2} = -c_K [C''_{1.K} + C''_{2.K}];$$

где

$$R_{2.K.2} = \frac{a}{\sin \theta_K}.$$

Деформационные и силовые компоненты на кромке сферической части подвижного трубопровода (точка 1):

$$\theta = \theta_0; \beta_{C.1} = 0;$$

$$\Delta_{X.C.1} = \frac{R_C \sin \theta_0}{E\delta_C} C'_{2.C} + p \frac{R_C^2 \sin \theta_0}{2E\delta_C} (1 - \mu);$$

$$U_{C.1} = \frac{-1}{E\delta_C} \sqrt{\frac{R_C}{2c_C}} (C'_{2.C} + C''_{2.C});$$

$$Q_{X.C.1} = -\sqrt{\frac{c_C}{2R_C \sin \theta_0}} \frac{1}{\sin \theta_0} (C''_{2.C} - C'_{2.C}) + p \frac{R_C}{2} \cos \theta_0;$$

$$M_{1.C.1} = -c_C C''_{2.C}.$$

Подстановка деформационных и силовых компонентов в граничные условия дает систему восьми

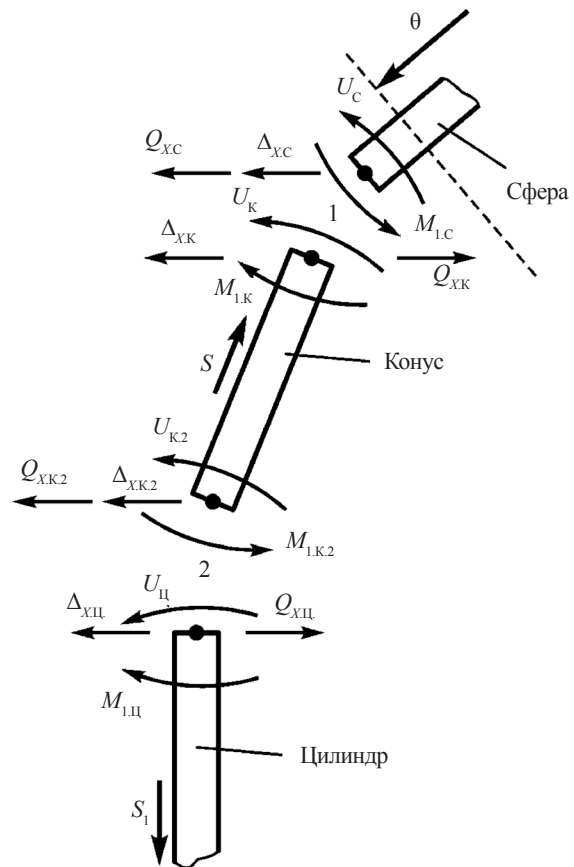


Рис. 4. Схема стыковки цилиндрической, конической и сферической частей оболочек элемента подвижного трубопровода

уравнений, необходимых для отыскания восьми неизвестных интегрирования  $C'_{2.C}$ ,  $C''_{2.C}$ ,  $C'_{1.K}$ ,  $C''_{1.K}$ ,  $C'_{2.K}$ ,  $C''_{2.K}$ ,  $C'_{1.Ц}$ ,  $C''_{1.Ц}$  :

$$\begin{aligned} & \frac{R_C \sin \theta_0}{E\delta_C} C'_{2.C} + p \frac{R_C^2 \sin \theta_0}{2E\delta_C} (1 - \mu) = \\ & = \frac{R_{2.K.1} \sin \theta_K}{E\delta_K} \left[ (C'_{1.K} \cos \beta_{K.1} - C''_{1.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{-\beta_{K.1}} + \right. \\ & \quad \left. + (C'_{2.K} \cos \beta_{K.1} + C''_{2.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{\beta_{K.1}} \right] + \\ & \quad + p \frac{R_{2.K.1}^2 \sin \theta_K}{2E\delta_K} (2 - \mu); \\ & \frac{-1}{E\delta_C} \sqrt{\frac{R_C}{2c_C}} (C'_{2.C} + C''_{2.C}) = \\ & = \frac{1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_{2.K.1}}{2c_K}} \left\{ [(C'_{1.K} + C''_{1.K}) \cos \beta_{K.1} + \right. \\ & \quad \left. + (C'_{2.K} + C''_{2.K}) \cos \beta_{K.1} + \right. \\ & \quad \left. + (C'_{1.K} - C''_{1.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{-\beta_{K.1}} - \right. \\ & \quad \left. + (C'_{2.K} - C''_{2.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{\beta_{K.1}} \right\}; \\ & -\sqrt{\frac{c_C}{2R_C}} \frac{1}{\sin \theta_0} (C''_{2.C} - C'_{2.C}) + p \frac{R_C}{2} \cos \theta_0 = \\ & = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2.K.1}}} \frac{1}{\sin \theta_K} \left\{ [(C'_{1.K} - C''_{1.K}) \cos \beta_{K.1} - \right. \\ & \quad \left. + (C'_{2.K} - C''_{2.K}) \cos \beta_{K.1} - \right. \\ & \quad \left. - (C'_{1.K} + C''_{1.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{-\beta_{K.1}} + \right. \\ & \quad \left. - (C'_{2.K} + C''_{2.K}) \sin \beta_{K.1}] \cdot e^{\beta_{K.1}} \right\} + p \frac{R_{2.K.1}}{2} \cos \theta_K; \\ & -c_C C''_{2.C} = -c_K \left[ (C''_{1.K} \cos \beta_{K.1} + C'_{1.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{-\beta_{K.1}} + \right. \\ & \quad \left. + (C''_{2.K} \cos \beta_{K.1} - C'_{2.K} \sin \beta_{K.1}) \cdot e^{\beta_{K.1}} \right]; \\ & \frac{R_{2.K.2} \sin \theta_K}{E\delta_K} [C'_{1.K} + C'_{2.K}] + p \frac{R_{2.K.2}^2 \sin \theta_K}{2E\delta_K} (2 - \mu) = \\ & = \frac{R}{E\delta_{II}} C'_{1.Ц} + p \frac{R^2}{E\delta_{II}} \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right); \\ & \frac{1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_{2.K.2}}{2c_K}} [(C'_{1.K} + C''_{1.K}) - (C''_{2.K} + C'_{2.K})] = \\ & = \frac{1}{E\delta_{II}} \sqrt{\frac{R}{2c_{II}}} (C'_{1.Ц} + C''_{1.Ц}); \\ & -\sqrt{\frac{c_K}{2R_{2.K.2}}} \frac{1}{\sin \theta_K} (C'_{1.K} - C''_{1.K} + C''_{2.K} - C'_{2.K}) + \\ & + p \frac{R_{2.K.2}}{2} \cos \theta_K = -\sqrt{\frac{c_{II}}{2R}} (C'_{1.Ц} - C''_{1.Ц}); \\ & -c_K [C''_{1.K} + C''_{2.K}] = -c_{II} C''_{1.Ц}. \end{aligned}$$

Решение системы уравнений дает зависимости для определения постоянных интегрирования:

$$\begin{pmatrix} C'_{1.K} \\ C''_{1.K} \\ C'_{2.K} \\ C''_{2.K} \end{pmatrix} = A^{-1} \cdot Y = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix};$$

$$C'_{2.C} = \Psi_4 (\Phi_{10} C'_{1.K} - \Phi_{20} C''_{1.K} + \Phi_{11} C'_{2.K} + \Phi_{21} C''_{2.K}) + \Psi_3;$$

$$C''_{2.C} = \frac{\delta_K}{\delta_C} (\Phi_{10} C''_{1.K} + \Phi_{20} C'_{1.K} + \Phi_{11} C''_{2.K} - \Phi_{21} C'_{2.K});$$

$$C'_{1.Ц} = \Psi_2 (C'_{1.K} + C''_{1.K}) + \Psi_1; \quad C''_{1.Ц} = \frac{\delta_K}{\delta_C} (C''_{1.K} + C''_{2.K}),$$

где

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Psi_3 \\ \Psi_3 - \Psi_7 \\ \Psi_1 \Psi_6 \\ \Psi_9 + \Psi_1 \Psi_{10} \end{pmatrix};$$

$$A_{11} = \Psi_4 \Phi_{10} - \Psi_5 (\Phi_{10} + \Phi_{20}) + \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{20};$$

$$A_{12} = \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{10} - \Psi_4 \Phi_{20} - \Psi_5 (\Phi_{10} - \Phi_{20});$$

$$A_{13} = \Psi_5 (\Phi_{11} - \Phi_{21}) + \Psi_4 \Phi_{11} - \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{21};$$

$$A_{14} = \Psi_5 (\Phi_{11} + \Phi_{21}) + \Psi_4 \Phi_{21} + \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{11};$$

$$A_{21} = \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{20} - \Psi_4 \Phi_{10} - \Psi_8 (\Phi_{10} - \Phi_{20});$$

$$A_{22} = \Psi_8 (\Phi_{10} + \Phi_{20}) + \Psi_4 \Phi_{20} + \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{10};$$

$$A_{23} = \Psi_8 (\Phi_{11} + \Phi_{21}) - \Psi_4 \Phi_{11} - \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{21};$$

$$A_{24} = \frac{\delta_K}{\delta_C} \Phi_{11} - \Psi_4 \Phi_{21} - \Psi_8 (\Phi_{11} - \Phi_{21});$$

$$A_{31} = 1 - \Psi_2 \Psi_6; \quad A_{32} = 1 - \Psi_6 \left( \Psi_2 + \frac{\delta_K}{\delta_C} \right);$$

$$A_{33} = -1; \quad A_{34} = -\Psi_6 \frac{\delta_K}{\delta_C} - 1;$$

$$A_{41} = 1 - \Psi_2 \Psi_{10}; \quad A_{42} = -\Psi_{10} \left( \Psi_2 - \frac{\delta_K}{\delta_C} \right) - 1;$$

$$A_{43} = -1; \quad A_{44} = \psi_{10} \frac{\delta_K}{\delta_C} + 1;$$

$$\psi_1 = pR \left( \frac{\mu}{2} - 1 \right) - \frac{\delta_{II}}{\delta_K} \frac{pR_{2,K,2}^2 (\mu - 2) \sin \theta_K}{2R};$$

$$\psi_2 = \frac{\delta_{II}}{\delta_K} \frac{R_{2,K,2} \sin \theta_K}{R};$$

$$\psi_3 = \frac{pR_C (\mu - 1)}{2} - \frac{\delta_C}{\delta_K} \frac{pR_{2,K,1}^2 (\mu - 2) \sin \theta_K}{2R_C \sin \theta_0};$$

$$\psi_4 = \frac{\delta_C}{\delta_K} \frac{pR_{2,K,1} \sin \theta_K}{R_C \sin \theta_0};$$

$$\psi_5 = - \left( \frac{\delta_C}{\delta_K} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{R_{2,K,1}}{R_C}}; \quad \psi_6 = \left( \frac{\delta_K}{\delta_{II}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{R}{R_{2,K,2}}};$$

$$\psi_7 = \frac{p}{2} (R_{2,K,1} \cos \theta_K - R_C \sin \theta_0) \sqrt{\frac{2R_C}{c_C}};$$

$$\psi_8 = \sqrt{\frac{\delta_K}{\delta_C} \frac{R_C}{R_{2,K,1}} \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_K}};$$

$$\psi_9 = p \sqrt{\frac{R_{2,K,2}^3}{2c_K} \cos \theta_K \cdot \sin \theta_K};$$

$$\psi_{10} = \sqrt{\frac{\delta_{II}}{\delta_K} \frac{R_{2,K,2}}{R} \sin \theta_K};$$

$$\varphi_{10} = e^{-\beta_{K,1}} \cos \beta_{K,1}; \quad \varphi_{20} = e^{-\beta_{K,1}} \sin \beta_{K,1};$$

$$\varphi_{11} = e^{\beta_{K,1}} \cos \beta_{K,1}; \quad \varphi_{21} = e^{\beta_{K,1}} \sin \beta_{K,1}.$$

Общие зависимости для оценки прочности элемента подвижного трубопровода:

$$\sigma_{T1} = T_1/\delta \text{ — цепные напряжения, Па;}$$

$$\sigma_{T2} = T_2/\delta \text{ — мембранные напряжения, Па;}$$

$\sigma_{M1} = 6M_1/\delta^2$ ,  $\sigma_{M2} = 6M_2/\delta^2$  — изгибные напряжения, Па;

$\sigma_{1,P} = \sigma_{T1} + \sigma_{M1}$ ,  $\sigma_{2,P} = \sigma_{T2} + \sigma_{M2}$  — растягивающие напряжения, Па;

$\sigma_{1,Ж} = \sigma_{T1} - \sigma_{M1}$ ,  $\sigma_{2,Ж} = \sigma_{T2} - \sigma_{M2}$  — сжимающие напряжения, Па;

$$\sigma_{IV,P} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,P} - \sigma_{2,P})^2 + (\sigma_{2,P})^2 + (-\sigma_{1,P})^2 \right)}$$
 —

растягивающие напряжения по четвертой теории прочности, Па;

$$\sigma_{IV,Ж} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,Ж} - \sigma_{2,Ж})^2 + (\sigma_{2,Ж})^2 + (-\sigma_{1,Ж})^2 \right)}$$
 — сжи-

мающие напряжения по четвертой теории прочности, Па;

$n$  — коэффициент запаса прочности элемента подвижного трубопровода;

$\sigma_T$  — предел текучести материала оболочки элемента подвижного трубопровода, Па;

$[\sigma] = n\sigma_T$  — допускаемые напряжения элемента подвижного трубопровода, Па.

Зависимости для оценки прочности цилиндрической части оболочки элемента подвижного трубопровода:

$$\sigma_{T1,II} = T_{1,II}/\delta_{II}; \quad \sigma_{T2,II} = T_{2,II}/\delta_{II};$$

$$\sigma_{M1,II} = 6M_{1,II}/\delta_{II}^2; \quad \sigma_{M2,II} = 6M_{2,II}/\delta_{II}^2;$$

$$\sigma_{1,P,II} = \sigma_{T1,II} + \sigma_{M1,II}; \quad \sigma_{2,P,II} = \sigma_{T2,II} + \sigma_{M2,II};$$

$$\sigma_{1,Ж,II} = \sigma_{T1,II} - \sigma_{M1,II}; \quad \sigma_{2,Ж,II} = \sigma_{T2,II} - \sigma_{M2,II};$$

$$\sigma_{IV,P,II} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,P,II} - \sigma_{2,P,II})^2 + (\sigma_{2,P,II})^2 + (-\sigma_{1,P,II})^2 \right)};$$

$$\sigma_{IV,Ж,II} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,Ж,II} - \sigma_{2,Ж,II})^2 + (\sigma_{2,Ж,II})^2 + (-\sigma_{1,Ж,II})^2 \right)}.$$

Зависимости для оценки прочности конической части оболочки элемента подвижного трубопровода:

$$\sigma_{T1,K} = T_{1,K}/\delta_K; \quad \sigma_{T2,K} = T_{2,K}/\delta_K;$$

$$\sigma_{M1,K} = 6M_{1,K}/\delta_K^2; \quad \sigma_{M2,K} = 6M_{2,K}/\delta_K^2;$$

$$\sigma_{1,P,K} = \sigma_{T1,K} + \sigma_{M1,K}; \quad \sigma_{2,P,K} = \sigma_{T2,K} + \sigma_{M2,K};$$

$$\sigma_{1,Ж,K} = \sigma_{T1,K} - \sigma_{M1,K}; \quad \sigma_{2,Ж,K} = \sigma_{T2,K} - \sigma_{M2,K};$$

$$\sigma_{IV,P,K} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,P,K} - \sigma_{2,P,K})^2 + (\sigma_{2,P,K})^2 + (-\sigma_{1,P,K})^2 \right)};$$

$$\sigma_{IV,Ж,K} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,Ж,K} - \sigma_{2,Ж,K})^2 + (\sigma_{2,Ж,K})^2 + (-\sigma_{1,Ж,K})^2 \right)}.$$

Зависимости для оценки прочности сферической части оболочки элемента подвижного трубопровода:

$$\sigma_{T1,C} = T_{1,C}/\delta_C; \quad \sigma_{T2,C} = T_{2,C}/\delta_C;$$

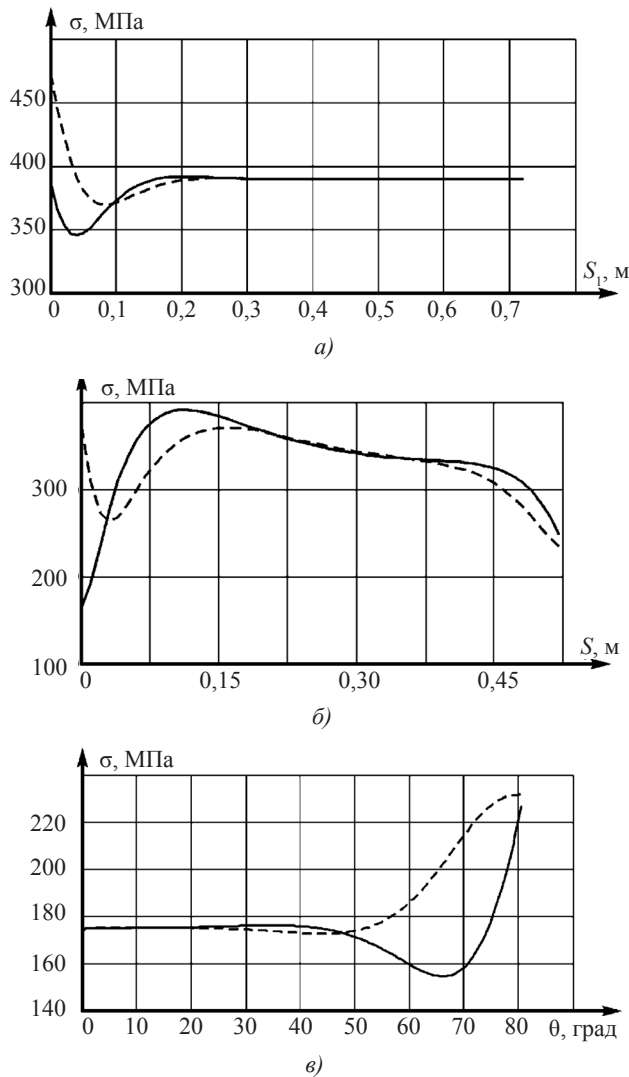
$$\sigma_{M1,C} = 6M_{1,C}/\delta_C^2; \quad \sigma_{M2,C} = 6M_{2,C}/\delta_C^2; \quad ;$$

$$\sigma_{1,P,C} = \sigma_{T1,C} + \sigma_{M1,C}; \quad \sigma_{2,P,C} = \sigma_{T2,C} + \sigma_{M2,C};$$

$$\sigma_{1,Ж,C} = \sigma_{T1,C} - \sigma_{M1,C}; \quad \sigma_{2,Ж,C} = \sigma_{T2,C} - \sigma_{M2,C};$$

$$\sigma_{IV,P,C} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,P,C} - \sigma_{2,P,C})^2 + (\sigma_{2,P,C})^2 + (-\sigma_{1,P,C})^2 \right)};$$

$$\sigma_{IV,Ж,C} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_{1,Ж,C} - \sigma_{2,Ж,C})^2 + (\sigma_{2,Ж,C})^2 + (-\sigma_{1,Ж,C})^2 \right)}.$$



**Рис. 5.** Растягивающие и сжимающие напряжения по Мизесу: *a* — для цилиндрической части элемента подвижного трубопровода, —  $\sigma_{IV,PC}$ , ---  $\sigma_{IV,ЖС}$ ; *b* — для конической части, —  $\sigma_{IV,PC}$ , ---  $\sigma_{IV,ЖС}$ ; *v* — сферической части, —  $\sigma_{IV,PC}$ , ---  $\sigma_{IV,ЖС}$

Решение задачи производится в следующей последовательности:

- 1) при известных исходных данных определяют промежуточные величины;
- 2) находят постоянные интегрирования;
- 3) определяют силовые характеристики цилиндрической части оболочки элемента подвижного трубопровода;
- 4) определяют силовые характеристики конической части оболочки элемента подвижного трубопровода;
- 5) определяют силовые характеристики сферической части оболочки элемента подвижного трубопровода;
- 6) максимальные значения напряжений по четвертой теории прочности сравнивают с допускаемыми напряжениями и, если они превышают допускаемые, проводят корректировку исходных данных и расчет выполняют снова.

Результаты решения задачи представлены на рис. 5 при следующих исходных данных:  $\delta_C = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_K = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_{Ц} = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па;  $\mu = 0,28$ ;  $p = 200 \cdot 10^5$  Па;  $h_K = 0,52$  м;  $\theta_K = \theta_0 = 80,91^\circ$ ;  $R = a = 0,36$  м

Полученные графики показывают, что в местах стыковки элементов подвижного трубопровода возникают всплески напряжений, которые гаснут по мере удаления от этих стыков.

### ВЫВОДЫ

1. Полученные аналитические зависимости позволяют выполнить оценку прочности цилиндрически-конически-сферического элемента подвижного трубопровода.
2. С использованием разработанного на основе этих зависимостей алгоритма получены численные результаты и проведен их анализ.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Декларацийний патент на корисну модель №67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Текст] / Б. Є. Патон, Є. І. Крижанівський, М. М. Савицький, Е. А. Щвидкий, В. В. Зайцев, О. М. Мандрик ; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — № u201114580 ; заявл. 08. 12. 11 ; опубл. 27. 02. 12 // Промислова власність. — 2012. — Бюл. № 4.
- [2] Григорьев, Л. Я. Судовые сосуды, работающие под давлением (определение напряжений и деформаций) [Текст] / Л. Я. Григорьев. — Л. : Судостроение. 1965. — 196 с.
- [3] Зайцев, В. В. Суда-газовозы [Текст] / В. В. Зайцев, Ю. Н. Коробанов. — Л. : Судостроение, 1990. — 304 с.

© Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев

Надійшла до редколегії 00.00.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2012