

## РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ КОНІЧНО-ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМИХ ТРУБОПРОВОДІВ

<sup>1</sup>Вал.В. Зайцев, <sup>2</sup>Д.В. Зайцев, <sup>1</sup>О.М. Мандрюк

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353, 42183,  
e-mail: zvalv1974@mail.ru, ief@nuing.edu.ua

<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
54003, Україна, м. Миколаїв, вул. Героїв Сталінграду, 9, тел. (0512) 249094,  
e-mail: zdmv11982@gmail.com

Досліджується міцність рухомих трубопроводів, призначених для транспортування стиснутого газу, одним з головних елементів якого є круговий циліндр в поєднанні зі зрізаним конусом. На підставі теорії оболонок отримано залежності, які дозволили отримати аналітичне рішення системи рівнянь з вісьмома невідомими постійними інтегрування. Подальші перетворення дозволили отримати в аналітичному вигляді залежності для всіх силових і міцнісних характеристик конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів. Наведено критерії міцності досліджуваних елементів трубопроводів. Показані графічні залежності напружень в елементі трубопроводу від його геометричних параметрів. Створено алгоритм, який дозволяє виконати всю послідовність описаних розрахунків. Проаналізовано вплив кута нахилу твірної конуса на максимальні напруження, що виникають у конічно-циліндричних елементах рухомих трубопроводів. Подаються рекомендації щодо проектування таких елементів.

Ключові слова: рухомий трубопровід, стиснутий газ, конічно-циліндричні елементи, геометричні параметри, напруження

Исследуется прочность подвижных трубопроводов, предназначенных для транспортировки сжатого газа, одним из главных элементов которого является круговой цилиндр в сочетании с усеченным конусом. На основе теории оболочек получены зависимости, которые позволили получить аналитическое решение системы уравнений с восемью неизвестными постоянными интегрирования. Дальнейшие преобразования позволили получить в аналитическом виде зависимости для всех силовых и прочностных характеристик коническо-цилиндрических элементов подвижных трубопроводов. Приведены критерии прочности исследуемых элементов трубопроводов. Показаны графические зависимости напряжений в элементе трубопровода от его геометрических параметров. Создан алгоритм, который позволяет выполнить всю последовательность описанных расчетов. Проанализировано влияние угла наклона образующей конуса на максимальные напряжения, возникающие в коническо-цилиндрических элементах подвижных трубопроводов. Даются рекомендации по проектированию таких элементов.

Ключевые слова: подвижный трубопровод, сжатый газ, коническо-цилиндрические элементы, геометрические параметры, напряжения.

The strength of the mobile pipeline for transportation of compressed gas, the key element of which is a circular cylinder in combination with a truncated cone, has been investigated. The dependences that allowed to get an analytical solution of the equation system with eight unknown constants of integration have been obtained on the basis of the theory of shells. Further transformations allowed to get dependences for all power and strength characteristics of conical-cylindrical elements of mobile pipelines in the analytical form. Strength criteria of the pipeline elements under study have been introduced. Graphic dependences of stress in the pipeline elements from its geometric parameters have been shown. The algorithm that allows to fulfill the entire sequence of the described calculations has been created. The influence of the cone angle on the maximum stress in the conical-cylindrical elements of mobile pipelines has been analyzed. Recommendations on such element design have been given.

Key words: mobile pipeline, compressed gas, conical-cylindrical elements, geometric parameters, stresses

Морські носії рухомих трубопроводів з циліндровими вантажними елементами найближчими роками можуть стати поширеним типом носіїв. У залежності від орієнтації та компонування рухомого трубопроводу існує велика кількість різних підтипів суден-носіїв таких трубопроводів (судно-контейнеровоз, CNG-газовоз, баржа-пліт, судно на повітряній подушці). Одним з варіантів компонування рухомого трубопроводу [1] може бути модульний просторовий змійовик (рис. 1).

Головним елементом такої конструкції є круговий циліндр в поєднанні з конусом (рис. 2).

Під час транспортування стиснутого газу конструктивні елементи рухомого трубопроводу, опори, а також деталі кріплень піддаються впливу цілого ряду різноманітних навантажень і їх комбінацій. Одним із основних навантажень є розрахунковий внутрішній тиск стиснутого газу (рис. 3).

Загальна інформація про розрахунки міцності посудин, що працюють під тиском, опублікована в [2], а про судна, що транспортують газ - в [3], але задачі розрахунків міцності і транспортування стиснутого природного газу у цих публікаціях не розглядалися.

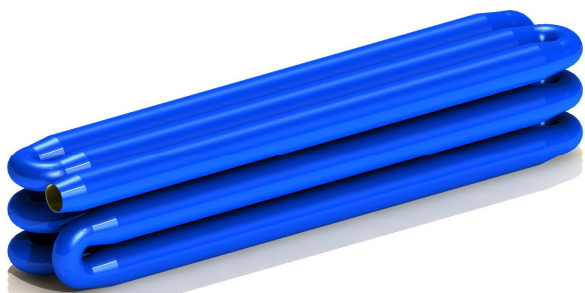


Рисунок 1 – Модульний просторовий змійовик рухомого трубопроводу

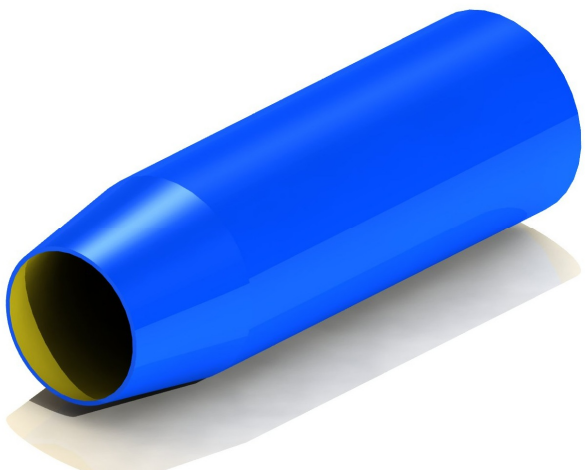


Рисунок 2 – Схема конічно-циліндричного елемента рухомого трубопроводу

Метою дослідження є розрахунок та дослідження міцності конічно-циліндричного елемента рухомого трубопроводу, навантаженого розрахунковим тиском стиснутого газу.

Вихідні дані:  $\delta_{\text{ц}}$ ,  $\delta_{\text{к}}$  – відповідно товщини оболонок циліндричної та конічної частин елемента рухомого трубопроводу, м;  $E$  – модуль пружності матеріалів оболонок елемента (оболонки виготовлені з однакового матеріалу), Па;  $\mu$  – коефіцієнт поперечної деформації матеріалів оболонок елемента;  $R$  – радіус циліндричної частини елемента, м;  $\theta$  – кут нахилу твірної конусної частини елемента, градус;  $p$  – розрахунковий тиск стиснутого газу, Па.

Прийняті позначення:  $R_1$ ,  $R_2$  – головні радіуси кривизни оболонок елемента рухомого трубопроводу ( $R_1$  – радіус кривизни меридіана оболонок елемента,  $R_2$  – величина, що дорівнює відрітку нормалі до поверхні оболонки від осі її обертання), м;  $R$  – головний радіус кривизни для випадків, коли оболонка має один радіус кривизни або  $R_1 = R_2$ , м;  $T_{1,\text{ц}}$ ,  $T_{1,\text{к}}$  – відповідно меридіональні зусилля в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н/м;  $T_{2,\text{ц}}$ ,  $T_{2,\text{к}}$  – відповідно кільцеві зусилля в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н/м;  $M_{1,\text{ц}}$ ,  $M_{1,\text{к}}$  – відповідно мериді-

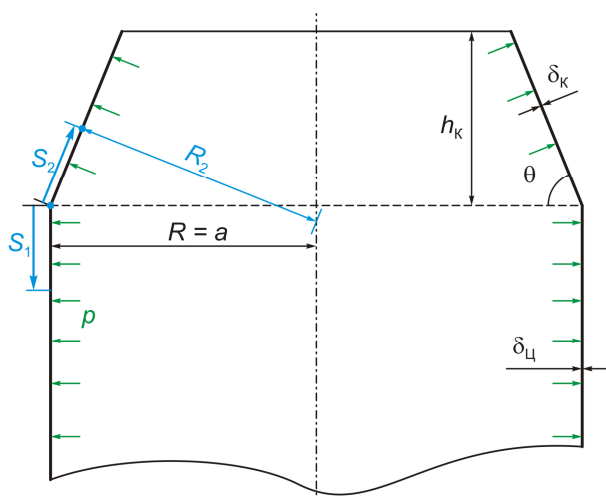


Рисунок 3 – Ескіз конічно-циліндричного елемента рухомого трубопроводу

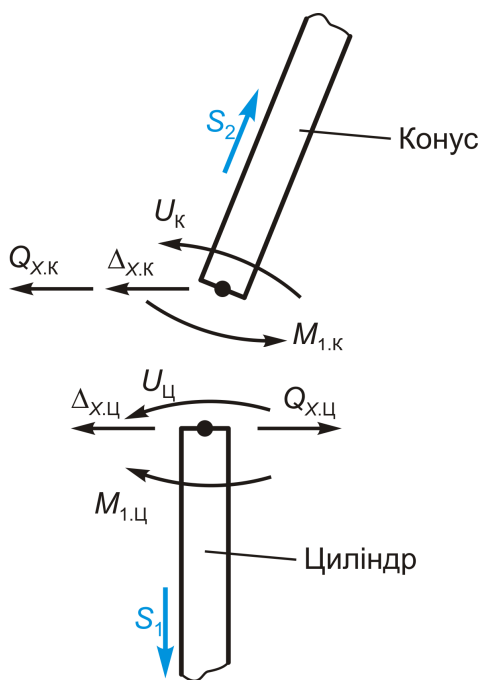


Рисунок 4 – Схема стикування циліндричної і конічної частин елемента рухомого трубопроводу

ональні моменти в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н;  $M_{2,\text{ц}}$ ,  $M_{2,\text{к}}$  – відповідно кільцеві моменти в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н;  $\sigma_{T1,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{T1,\text{к}}$  – відповідно ланцюгові напруження в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Па;  $\sigma_{T2,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{T2,\text{к}}$  – відповідно мембранні напруження в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Па;  $\sigma_{M1,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{M2,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{M1,\text{к}}$ ,  $\sigma_{M2,\text{к}}$  – відповідно згинальні напруження в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Па;  $\sigma_{1p,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{2p,\text{ц}}$ ,  $\sigma_{1p,\text{к}}$ ,  $\sigma_{2p,\text{к}}$  – відповідно головні розтягувальні напруження в циліндричній і конусній частинах

оболонки елемента, Па;  $\sigma_{1ж.ц}$ ,  $\sigma_{2ж.ц}$ ,  $\sigma_{1ж.к}$ ,  $\sigma_{2ж.к}$  – відповідно головні стискаючі напруження в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Па.

На підставі формул з [2] і [3] і розрахункової схеми (рис. 3, 4) отримуємо вихідні залежності для циліндричної частини оболонки елемента рухомого трубопроводу

$$T_{1.ц} = p \frac{R}{2}; \quad (1)$$

$$T_{2.ц} = (C'_1 \cos \beta_{ц} - C''_1 \sin \beta_{ц}) \cdot e^{-\beta_{ц}} + pR; \quad (2)$$

$$M_{1.ц} = -c_{ц} (C''_1 \cos \beta_{ц} + C'_1 \sin \beta_{ц}) \cdot e^{-\beta_{ц}}; \quad (3)$$

$$M_{2.ц} = \mu M_{1.ц}; \quad (4)$$

$$\Delta_{X.ц} = \frac{R}{E\delta_{ц}} (C'_1 \cos \beta_{ц} - C''_1 \sin \beta_{ц}) \cdot e^{-\beta_{ц}} + p \frac{R^2}{2E\delta_{ц}} (2 - \mu); \quad (5)$$

$$Q_{X.ц} = -\sqrt{\frac{c_{ц}}{2R}} \times \quad (6)$$

$$\times ((C'_1 - C''_1) \cos \beta_{ц} - (C'_1 + C''_1) \sin \beta_{ц}) \cdot e^{-\beta_{ц}};$$

$$U_{ц} = \frac{1}{E\delta_{ц}} \sqrt{\frac{R}{2c_{ц}}} \times \quad (7)$$

$$((C'_1 + C''_1) \cos \beta_{ц} + (C'_1 - C''_1) \sin \beta_{ц}) \cdot e^{-\beta_{ц}},$$

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

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

$C'_1; C''_1$  – постійні інтегрування.

Для конічної частини оболонки елемента рухомого трубопроводу розрахункові залежності мають вигляд

$$T_{1.к} = -\sqrt{\frac{c_{к}}{2R_2}} \text{ctg}(\theta) ((C''_2 - C'_2) \cos \beta_{к} - (C'_2 + C''_2) \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}} + p \frac{R_2}{2}; \quad (8)$$

$$T_{2.к} = (C'_2 \cos \beta_{к} + C''_2 \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}} + pR_2; \quad (9)$$

$$M_{1.к} = -c_{к} (C''_2 \cos \beta_{к} - C'_2 \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}}; \quad (10)$$

$$M_{2.к} = \mu M_{1.к}; \quad (11)$$

$$\Delta_{X.к} = \frac{R_2 \sin \theta}{E\delta_{к}} (C'_2 \cos \beta_{к} + C''_2 \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}} + p \frac{R_2^2 \sin \theta}{2E\delta_{к}} (2 - \mu); \quad (12)$$

$$Q_{X.к} = -\sqrt{\frac{c_{к}}{2R_2}} \frac{1}{\sin \theta} ((C''_2 - C'_2) \cos \beta_{к} - (C'_2 + C''_2) \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}} + p \frac{R_2}{2} \cos \theta; \quad (13)$$

$$U_{к} = \frac{-1}{E\delta_{к}} \sqrt{\frac{R_2}{2c_{к}}} \times \quad (14)$$

$$\times ((C'_2 + C''_2) \cos \beta_{к} + (C''_2 - C'_2) \sin \beta_{к}) \cdot e^{\beta_{к}}$$

де  $\theta = \text{const};$

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

$$R_2 = \frac{a}{\sin \theta} - S_2 \text{ctg} \theta;$$

$$a = R;$$

$$\beta_{к} = \frac{2\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{\delta_{к} \cdot \text{ctg} \theta}} \left( \sqrt{\frac{a}{\sin \theta} - S_2 \text{ctg} \theta} - \sqrt{\frac{a}{\sin \theta}} \right);$$

$C'_2; C''_2$  – постійні інтегрування.

Граничними умовами для конічної-циліндричного елемента рухомого трубопроводу будуть відповідні рівності кутів повороту  $U$ , моментів  $M_1$ , радіальних зусиль  $Q_X$  і радіальних переміщень  $\Delta_X$ .

$$\Delta_{X.к} = \Delta_{X.ц}, U_{к} = U_{ц},$$

$$Q_{X.к} = Q_{X.ц}, M_{1.к} = M_{1.ц}, \quad (15)$$

де  $\Delta_{X.к}; \Delta_{X.ц}$  – відповідно радіальні переміщення циліндричної і конусної частин оболонки елемента, м;

$U_{к}; U_{ц}$  – відповідно кути повороту циліндричної і конусної частин оболонки елемента, рад;

$Q_{X.к}; Q_{X.ц}$  – відповідно радіальні зусилля в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н/м;

$M_{1.к}; M_{1.ц}$  – відповідно меридіональні моменти в циліндричній і конусній частинах оболонки елемента, Н.

Визначимо значення деформаційних і силових компонентів на кромці циліндричної частини оболонки елемента ( $S_1 = 0, \beta_{ц} = 0$ ):

$$\Delta_{X.ц} = \frac{R}{E\delta_{ц}} C'_1 + p \frac{R^2}{2E\delta_{ц}} (2 - \mu), \quad (16)$$

$$U_{ц} = \frac{1}{E\delta_{ц}} \sqrt{\frac{R}{2c_{ц}}} (C'_1 + C''_1);$$

$$Q_{X.ц} = -\sqrt{\frac{c_{ц}}{2R}} (C'_1 - C''_1), M_{1.ц} = -c_{ц} C''_1, \quad (17)$$

де  $c_{ц} = \frac{\delta_{ц}}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}.$

Деформаційні і силові компоненти на кроці конічної частини оболонки елемента ( $S_2 = 0$ ;  $\beta_K = 0$ ):

$$\Delta_{X,K} = \frac{R_2 \sin \theta}{E\delta_K} C'_{2+p} + p \frac{R_2^2 \sin \theta}{2E\delta_K} (2 - \mu) = \quad (18)$$

$$= \frac{R}{E\delta_K} C'_{2+p} + p \frac{R^2}{2E\delta_K \sin \theta} (2 - \mu);$$

$$U_K = \frac{-1}{E\delta_K} \sqrt{\frac{R_2}{2c_K}} (C''_2 + C''_1); \quad (19)$$

$$Q_{X,K} = -\sqrt{\frac{c_K}{2R_2}} \frac{1}{\sin \theta} (C''_2 - C''_1) + p \frac{R_2}{2} \cos \theta; \quad (20)$$

$$M_{1,K} = -c_K C''_2, \quad (21)$$

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

$$R_2 = \frac{R}{\sin \theta}.$$

Підстановка співвідношень (16) – (21) в граничні умови (15) дає систему чотирьох рівнянь, необхідних для відшукування чотирьох невідомих інтегрування  $C'_1$ ,  $C''_1$ ,  $C'_2$ ,  $C''_2$

$$\frac{1}{\delta_K} C'_{2+p} + p \frac{R}{2\delta_K \sin \theta} (2 - \mu) =$$

$$= \frac{1}{\delta_{II}} C'_1 + p \frac{R}{2\delta_{II}} (2 - \mu);$$

$$\frac{-1}{\delta_K} \sqrt{\frac{1}{2c_K \sin \theta}} (C''_2 + C''_1) =$$

$$= \frac{1}{\delta_{II}} \sqrt{\frac{1}{2c_{II}}} (C''_1 + C''_1); \quad (22)$$

$$-\sqrt{\frac{c_K}{2 \sin \theta}} (C''_2 - C''_1) + p \frac{R\sqrt{R}}{2} \cot \theta =$$

$$= -\sqrt{\frac{c_{II}}{2}} (C''_1 - C''_1);$$

$$c_K C''_2 = c_{II} C''_1.$$

Рішення системи рівнянь (22) дає залежності для визначення постійних інтегрування:

$$C''_2 = \frac{-(\psi_3 \psi_2 \psi_5 + \psi_4 \psi_1 + \psi_2 \psi_1 - \psi_3)}{(\psi_4 - \psi_2)(\psi_5^2 + 1) + 2\psi_5(1 - \psi_4 \psi_2)}; \quad (23)$$

$$C''_1 = \psi_5 C''_2; \quad (24)$$

$$C'_1 = \frac{C''_1 + \psi_2 \psi_1 - \psi_2 C''_2}{\psi_2 \psi_5 - 1}; \quad (25)$$

$$C'_2 = \psi_5 C'_1 - \psi_1, \quad (26)$$

де  $\psi_1 = p \frac{R}{2} (2 - \mu) \left( \frac{1}{\sin \theta} - \frac{\delta_K}{\delta_{II}} \right);$

$$\psi_2 = \frac{-\delta_{II}}{\delta_K} \sqrt{\frac{\delta_{II}}{\delta_K \sin \theta}};$$

$$\psi_3 = p \frac{R\sqrt{R}}{\sqrt{2c_{II}}} \cot \theta;$$

$$\psi_4 = \sqrt{\frac{\delta_K}{\delta_{II} \sin \theta}}; \quad \psi_5 = \frac{\delta_K}{\delta_{II}}.$$

Для визначення силових характеристик в будь-якій точці, що лежить на осі  $S_1$  або на осі  $S_2$ , значення постійних інтегрування підставляються в (1) – (7) – для циліндричної частини оболонки елемента і в (8) – (14) – для конічної частини оболонки елемента.

Головні напруження і їх складові можна виразити таким чином:

– для циліндричної частини оболонки елемента рухомого трубопроводу

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

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

де  $\sigma_{T1,II} = \frac{T_{1,II}}{\delta_{II}};$

$$\sigma_{M1,II} = \frac{6M_{1,II}}{\delta_{II}^2},$$

$$\sigma_{T2,II} = \frac{T_{2,II}}{\delta_{II}};$$

$$\sigma_{M2,II} = \frac{6M_{2,II}}{\delta_{II}^2};$$

– для конічної частини оболонки елемента рухомого трубопроводу

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

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

де  $\sigma_{T1,K} = \frac{T_{1,K}}{\delta_K};$

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

$$\sigma_{T2,K} = \frac{T_{2,K}}{\delta_K};$$

$$\sigma_{M2,K} = \frac{6M_{2,K}}{\delta_K^2}.$$

За критерії розглянутої задачі приймаються головні напруження, що виникають в оболонці. Ці напруження повинні бути меншими за межу плинності матеріалу оболонки елемента рухомого трубопроводу  $\sigma_T$ .

$$\sigma_{1n} \leq \sigma_T; \quad \sigma_{2n} \leq \sigma_T.$$

де  $n$  – коефіцієнт запасу міцності матеріалу оболонок елемента рухомого трубопроводу.

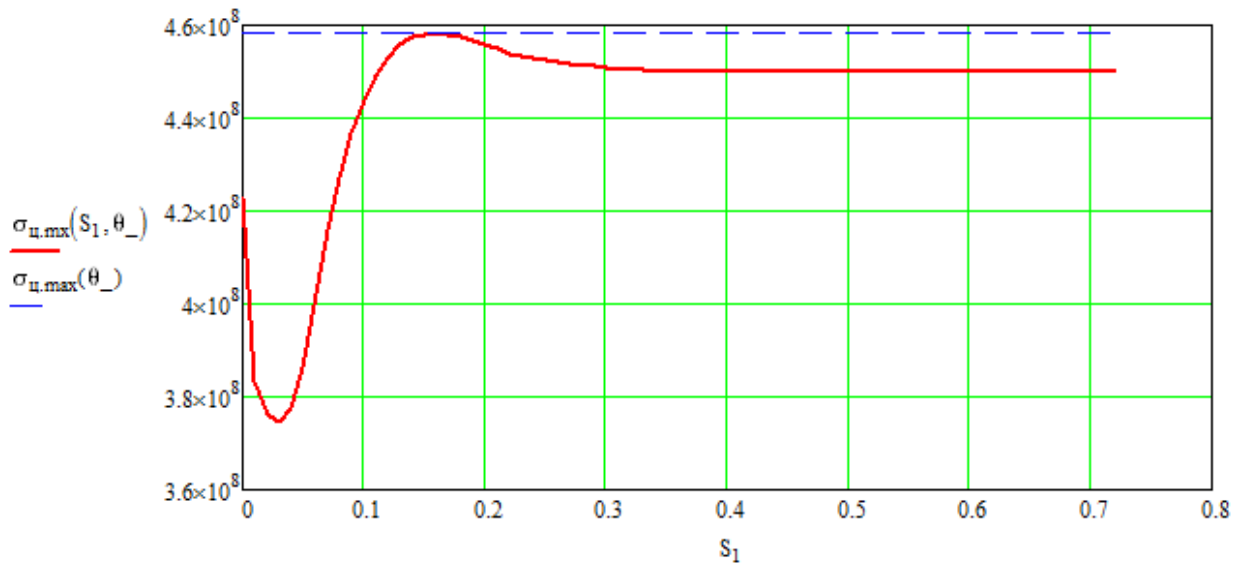


Рисунок 5 – Максимальні напруження в циліндричній частині елемента рухомого трубопроводу

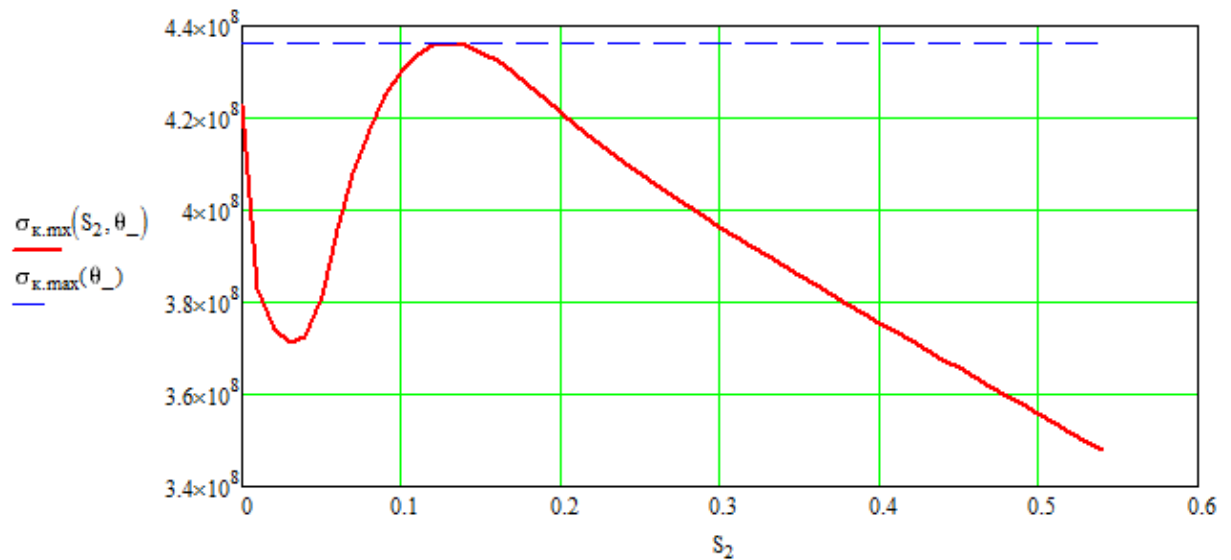


Рисунок 6 – Максимальні напруження в конічній частині елемента рухомого трубопроводу

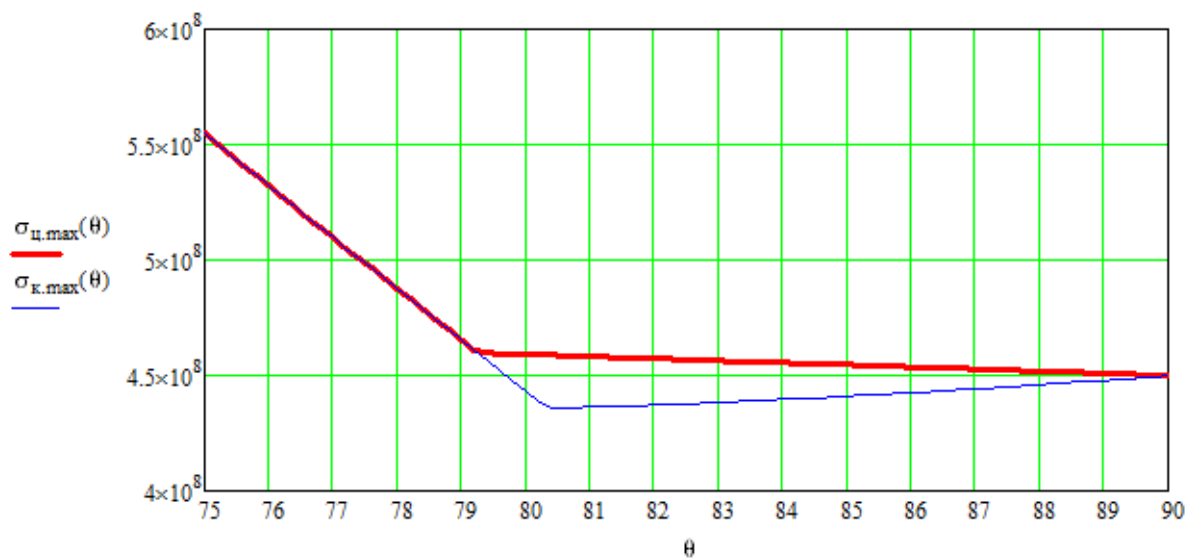


Рисунок 7 - Сумісний графік максимальних напружень в елементі рухомого трубопроводу

На підставі отриманих залежностей розроблено алгоритм розрахунку, який дозволяє отримати числові результати розрахунку, виконати їх аналіз і сформулювати рекомендації до проектування.

Результати розрахунку отримано при наступних вихідних даних:  $d_{\text{ц}} = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $d_{\text{к}} = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па;  $m = 0,28$ ;  $p = 200 \cdot 10^5$  Па;  $R = 0,36$  м;  $\alpha = 80,91^\circ$  (рис. 5, 6).

Отримані аналітичні залежності дали змогу проаналізувати вплив кута нахилу твірної конуса,  $\theta$ , на максимальні напруження, що виникають у конічно-циліндричних елементах рухомих трубопроводів (рис. 7).

З графіків рис. 7 видно, що при  $\alpha < 79 \dots 80^\circ$  в місці стику циліндричної і конусної частин оболонки елемента рухомого трубопроводу виникають сплески напружень, і чим менше  $\alpha$ , тим сплески напружень більші.

Аналіз розрахунків дозволяє сформулювати рекомендацію щодо проектування конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів: кут нахилу твірної його конусної частини  $\alpha$  повинен бути більшим  $80^\circ$ .

**Література:**

1 Деклараційний патент на корисну модель № 521/3У/12 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомих трубопроводом [Текст] / Патон Б.Є., Крижанівський Є.І., Савицький М.М., Щвидкий Е.А., Зайцев В.В., Мандрик О.М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201114580; заявл. 08.12.11; опубл. 11.01.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4 – 4 с.

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.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.06.12  
Рекомендована до друку професором  
Крижанівським Є.І.*