

Напружений стан трубопроводу в зонах локального руйнування ґрунту

І. П. Шацький^а, А. Б. Струк^б

^а Івано-Франківський сектор Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Івано-Франківськ, Україна

^б ДАТ “Чорноморнафтогаз”, Сімферополь, АР Крим, Україна

Запропоновано модель деформування підземного трубопроводу в складних геотехнічних умовах локального руйнування ґрунту. Досліджено вплив розривів переміщень і поворотів блоків основи на напружений стан та граничну рівновагу труби.

Ключові слова: трубопровід, напруження, руйнування ґрунту.

Вступ. Експлуатація підземних трубопроводів на ділянках аномальної поведінки основи (підтоплені та заболочені території, карстові порожнини чи технологічні виробки, області промерзання–розмерзання, просідання та сповзання ґрунту, зони тектонічних розломів, неотектоніки чи терасоутворення, сейсмо- і селенебезпечні райони) належить до нестандартних умов роботи і потребує додаткового аналізу разом з інженерно-геологічним моніторингом та застосуванням реологічних моделей механіки ґрунтів. Незважаючи на різноманітність цих моделей [1–4], механічне навантаження на трубопровід на аномальних ділянках важко передбачити. Для підвищення безпеки трубопроводних систем, прокладених у гірських районах, необхідно розвивати інженерні методи і моделі розрахунку напруженого стану та деформування трубопроводів у зонах локального руйнування скелястої основи.

Постановка задачі. Дослідження проводили в геометрично та фізично лінійній постановці. Трубопровід моделювали нескінченним прямолінійним стрижнем із трубчастим перерізом (рис. 1), який взаємодіє з корінною породою через шар ґрунтової засипки, що описується лінійно-пружною моделлю Вінклера. При детальнішому розгляді питань міцності трубу приймали безмоментною оболонкою. Взаємні переміщення та повороти блоків корінної породи описували розривними або кусково-диференціальними функціями. Такий підхід дозволяє визначати напруження в трубопроводі не за розподілом навантаження від ґрунту, яке зазвичай важко оцінити, а за кінематичними параметрами переміщень корінної породи.

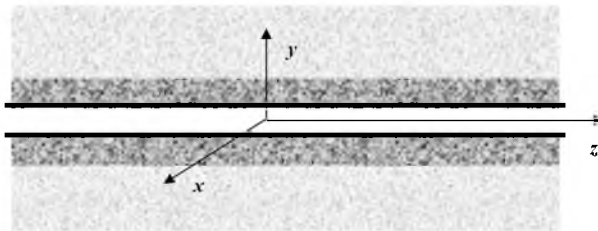


Рис. 1. Схема підземного трубопроводу.

Для кількісної реалізації цієї концепції сформульовано крайову задачу:

$$\left\{ \begin{aligned} EF \frac{d^2 u_z}{dz^2} - \pi D k_\tau (u_z - u_z^0) &= 0; \\ GJ_p \frac{d^2 \varphi_z}{dz^2} - \frac{\pi D^3}{4} k_\tau (\varphi_z - \varphi_z^0) &= 0; \\ EJ_y \frac{d^4 u_x}{dz^4} + Dk_n (u_x - u_x^0) &= 0; \\ EJ_x \frac{d^4 u_y}{dz^4} + Dk_n (u_y - u_y^0) &= 0, \quad z \in (-\infty, \infty); \\ \frac{du_z}{dz}(\pm\infty) = 0; \quad \frac{d\varphi_z}{dz}(\pm\infty) &= 0; \\ \frac{d^2 u_x}{dz^2}(\pm\infty) = 0; \quad \frac{d^3 u_x}{dz^3}(\pm\infty) = 0; \quad \frac{d^2 u_y}{dz^2}(\pm\infty) = 0; \quad \frac{d^3 u_y}{dz^3}(\pm\infty) &= 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де x, y, z – декартові координати; u_x, u_y, u_z, φ_z – відповідно переміщення та кут закручування трубопроводу; EF, GJ_p, EJ_x, EJ_y – жорсткість труби при розтязі, крученні та згині відносно осей x та y відповідно; D – зовнішній діаметр труби; k_τ, k_n – дотичний та нормальний коефіцієнти постелі;

$$u_z^0 = \sum_k \frac{\Delta_{zk}}{2} \operatorname{sgn}(z - z_k); \quad \varphi_z^0 = \sum_k \frac{\Theta_{zk}}{2} \operatorname{sgn}(z - z_k);$$

$$u_x^0 = \sum_k \left(\frac{\Delta_{xk}}{2} \operatorname{sgn}(z - z_k) + \frac{\Theta_{yk}}{2} |z - z_k| \right);$$

$$u_y^0 = \sum_k \left(\frac{\Delta_{yk}}{2} \operatorname{sgn}(z - z_k) + \frac{\Theta_{xk}}{2} |z - z_k| \right);$$

$\Delta_{zk}, \Delta_{xk}, \Delta_{yk}$ – взаємні переміщення; $\Theta_{zk}, \Theta_{xk}, \Theta_{yk}$ – взаємні повороти блоків; z_k – координати точок розривної деформації породи.

Аналітичний розв’язок. Аналітичний розв’язок крайової задачі (1) побудували у класі кусково-диференціальних функцій:

$$\left\{ \begin{aligned} u_z(z) &= \sum_k \frac{\Delta_{zk}}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z - z_k|}{\gamma_z}\right) \right) \operatorname{sgn}(z - z_k); \\ \varphi_z(z) &= \sum_k \frac{\Theta_{zk}}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z - z_k|}{\gamma_\theta}\right) \right) \operatorname{sgn}(z - z_k); \end{aligned} \right. \quad (2a)$$

$$\begin{cases} u_x(z) = \sum_k \frac{\Delta_{xk}}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_x}\right) \cos \frac{z-z_k}{\gamma_x} \right) \operatorname{sgn}(z-z_k) + \\ + \sum_k \frac{\Theta_{yk}}{2} \left(|z-z_k| + \frac{\gamma_x}{2} \exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_x}\right) \left(\cos \frac{z-z_k}{\gamma_y} - \sin \frac{|z-z_k|}{\gamma_x} \right) \right); \\ u_y(z) = \sum_k \frac{\Delta_{yk}}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_y}\right) \cos \frac{z-z_k}{\gamma_y} \right) \operatorname{sgn}(z-z_k) + \\ + \sum_k \frac{\Theta_{xk}}{2} \left(|z-z_k| + \frac{\gamma_y}{2} \exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_y}\right) \left(\cos \frac{z-z_k}{\gamma_y} - \sin \frac{|z-z_k|}{\gamma_y} \right) \right), \end{cases} \quad (26)$$

де

$$\begin{aligned} \gamma_z &= \sqrt{\frac{EF}{\pi D k_\tau}} \approx \sqrt{\frac{Et}{k_\tau}}; & \gamma_\theta &= \sqrt{\frac{4GJ_p}{\pi D^3 k_\tau}} \approx \sqrt{\frac{Gt}{k_\tau}}; \\ \gamma_x &= \sqrt[4]{\frac{4EJ_x}{Dk_n}} \approx \sqrt[4]{\frac{\pi ED^2 t}{2k_n}}; & \gamma_y &= \sqrt[4]{\frac{4EJ_y}{Dk_n}} \approx \sqrt[4]{\frac{\pi ED^2 t}{2k_n}}; \end{aligned}$$

t – товщина стінки труби.

Інтегральні характеристики напруженого стану (осьове зусилля, крутильний і згинальні моменти) через кінематичні характеристики обчислюються за формулами:

$$N_z = EF \frac{du_z}{dz}; \quad M_z = GJ_p \frac{d\varphi_z}{dz}; \quad M_x = -EJ_x \frac{d^2 u_y}{dz^2}; \quad M_y = -EJ_y \frac{d^2 u_x}{dz^2}.$$

Нехтуючи у тонкостінному стрижні впливом перерізувальних сил, для компонент тензора напружень у стінці труби маємо

$$\sigma_z = \frac{N_z}{F} + \frac{M_{xy}}{J_x} + \frac{M_{yx}}{J_y} + \nu(\sigma_\theta - \sigma_\theta^M) - E\alpha\Delta T + \sigma_z^M;$$

$$\sigma_\theta = p \frac{D}{2t} + \sigma_\theta^M; \quad \tau_{z\theta} = \frac{M_z D}{2J_p} + \tau_{z\theta}^M$$

або

$$\sigma_z = E \left(\frac{du_z}{dz} - y \frac{d^2 u_x}{dz^2} - x \frac{d^2 u_y}{dz^2} \right) + \nu(\sigma_\theta - \sigma_\theta^M) - E\alpha\Delta T + \sigma_z^M; \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = p \frac{D}{2t} + \sigma_\theta^M; \quad \tau_{z\theta} = \frac{GD}{2} \frac{d\varphi_z}{dz} + \tau_{z\theta}^M,$$

де p – внутрішній тиск у трубопроводі; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення; ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби; ΔT – температурний перепад (додатній при нагріванні); $\sigma_z^M, \sigma_\theta^M, \tau_{z\theta}^M$ – початкові напруження в трубі, спричинені, наприклад, її примусовою деформацією під час монтажу.

Для аналізу граничного стану труби доцільно використовувати енергетичну концепцію міцності:

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma], \quad (4)$$

де $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_z^2 + 3\tau_{z\theta}^2}$ – еквівалентне напруження Мізеса; $[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу труби.

Підставивши результат (2) у співвідношення (3), (4), можна оцінити вплив позаштатних чинників (взаємних переміщень та поворотів блоків основи) на напружений та граничний стан трубопроводу, навантаженого внутрішнім тиском, з урахуванням температурних і монтажних напружень.

Приклади. Наведемо приклад розрахунку для декількох типів розривної деформації основи.

1. *Розрив переміщень основи вздовж осі труби.* Нехай блоки основи в точці початку координат розійшлися вздовж осі трубопроводу на величину Δ_1 :

$$z_1 = 0, \quad \Delta_{z1} = \Delta_1, \quad u_z^0(z) = \frac{\Delta_1}{2} \operatorname{sgn} z.$$

Тут і далі приймемо, що тиск p у трубопроводі задано, а температурні і монтажні напруження відсутні. Тоді за результатами (2), (3) маємо

$$u_z(z) = \frac{\Delta_1}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_z}\right) \right) \operatorname{sgn} z;$$

$$\sigma_z(z) = E \frac{\Delta_1}{2\gamma_z} \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_z}\right) + \nu \sigma_\theta(z); \quad \sigma_\theta(z) = p \frac{D}{2t}; \quad \tau_{z\theta}(z) = 0.$$

2. *Розворот блоків довкола осі труби.* Нехай блоки основи в точці початку координат здійснили розворот довкола осі труби на кут Θ_1 . Тоді запишемо

$$z_1 = 0; \quad \Theta_{z1} = \Theta_1; \quad \varphi_z^0(z) = \frac{\Theta_1}{2} \operatorname{sgn} z,$$

і за результатами (2), (3) отримаємо

$$\varphi_z(z) = \frac{\Theta_1}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_\theta}\right) \right) \operatorname{sgn} z;$$

$$\sigma_z(z) = \nu \sigma_\theta(z); \quad \sigma_\theta = p \frac{D}{2t}; \quad \tau_{z\theta}(z) = \frac{GD}{2} \frac{\Theta_1}{2\gamma_\theta} \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_\theta}\right).$$

3. *Поперечний розрив переміщень.* Нехай блоки основи в точці початку координат здійснили взаємне переміщення Δ_2 поперек осі трубопроводу, наприклад, у напрямку y . Тоді маємо

$$z_1 = 0; \quad \Delta_{y1} = \Delta_2; \quad u_y^0(z) = \frac{\Delta_2}{2} \operatorname{sgn} z.$$

Розв'язок задачі набуває вигляду

$$u_y(z) = \frac{\Delta_2}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_y}\right) \cos \frac{z}{\gamma_y} \right) \operatorname{sgn} z;$$

$$\sigma_z(z, y) = -E \frac{\Delta_2 y}{\gamma_y^2} \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_y}\right) \sin \frac{z}{\gamma_y} + \nu \sigma_\theta(z);$$

$$\sigma_\theta(z) = p \frac{D}{2t}; \quad \tau_{z\theta}(z) = 0.$$

4. *Розворот блоків у площині розташування труби.* Нехай блоки основи здійснили взаємний розворот на кут Θ_2 в точці початку координат довкола, наприклад, осі x . Тоді запишемо

$$z_1 = 0; \quad \Theta_{x1} = \Theta_2; \quad u_y^0(z) = \frac{\Theta_2}{2} |z|,$$

а розв'язок задачі є такий:

$$u_y^0(z) = \frac{\Theta_2}{2} \left(|z| + \frac{\gamma_y}{2} \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_y}\right) \left(\cos \frac{z}{\gamma_y} - \sin \frac{|z|}{\gamma_y} \right) \right);$$

$$\sigma_z(z, y) = -E \frac{\Theta_2 y}{\gamma_y} \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_y}\right) \left(\cos \frac{z}{\gamma_y} + \sin \frac{|z|}{\gamma_y} \right) + \nu \sigma_\theta(z);$$

$$\sigma_\theta(z) = p \frac{D}{2t}; \quad \tau_{z\theta}(z) = 0.$$

Конкретні числові розрахунки проводили для підземного магістрального трубопроводу. При цьому для труби приймали: $D = 1420$ мм, $t = 18$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$; для ґрунту – $k_\tau = 2$ МПа/м, $k_n = 5$ МПа/м. Взаємні переміщення блоків $\Delta_1 = \Delta_2 = D/20 = 71$ мм, взаємні повороти $\Theta_1 = 0,1$ рад, $\Theta_2 = 0,01$ рад. Внутрішній тиск приймали таким, що створює у трубі тангенціальне напруження $\sigma_\theta = 300$ МПа. Результати дослідження наведено на рис. 2, 3.

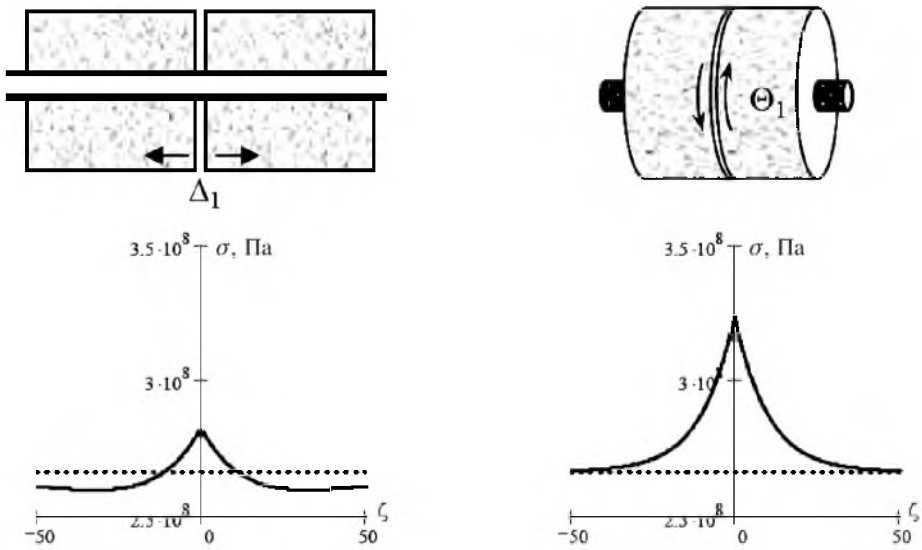


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень σ_{eq} уздовж осі труби в зоні нормального розриву основи та розвороту блоків довкола осі труби. (Тут і на рис. 3: суцільні лінії – $\sigma_{eq}(\zeta)$, пунктирні – $\sigma = 2,67 \cdot 10^8$ Па; $\zeta = z/D$ – безрозмірна координата.)

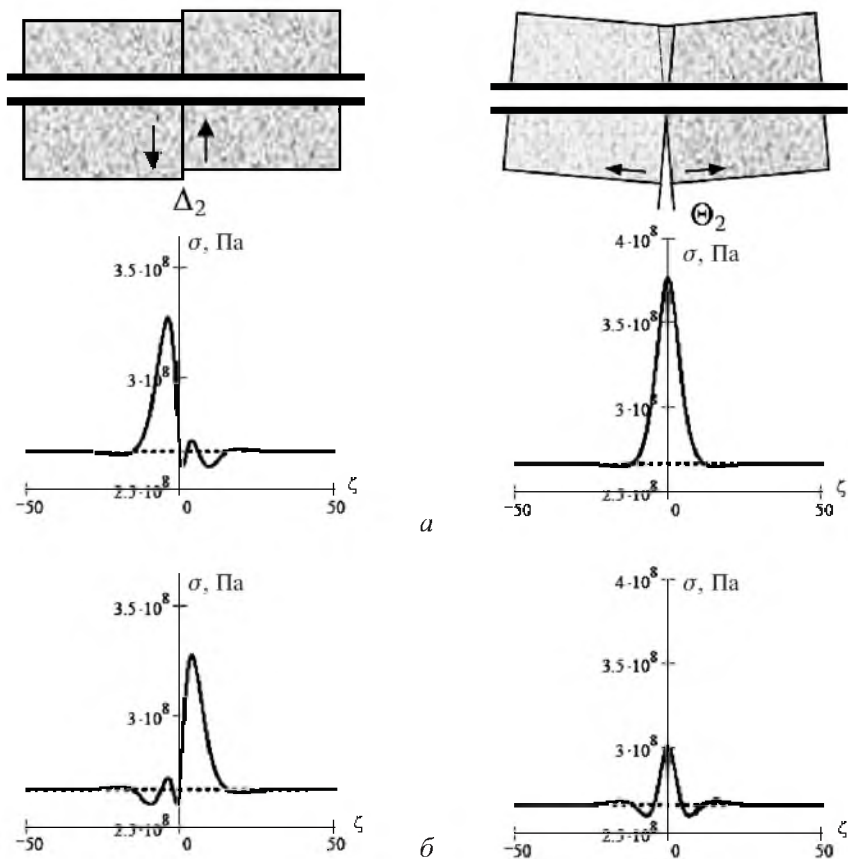


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень σ_{eq} уздовж осі труби в зоні поперечного зсуву та розвороту блоків основи: а, б – відповідно верхні і нижні волокна труби.

Висновки

1. Розроблена модель деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи дозволяє оцінити напружений та граничний стан труби за кінематичними параметрами розтріскування ґрунту.

2. Установлено, що поперечний зсув блоків основи є небезпечнішим порівняно з тріщинами нормального відриву. Збурення напруженого стану оболонки від взаємного розвороту блоків основи в площині розташування трубопроводу на порядок вище, ніж від впливу розвороту блоків довкола осі труби.

Резюме

Предложена модель деформирования подземного трубопровода в сложных геотехнических условиях локального разрушения грунта. Исследовано влияние разрывов перемещений и поворотов блоков основы на напряженное состояние и граничное равновесие трубы.

1. *Айнбиндер А. Б.* Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. – М.: Недра, 1992. – 287 с.
2. *Бородавкин П. П.* Подземные магистральные трубопроводы. Проектирование и строительство. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
3. *Мазур И. И., Иванцов О. М.* Безопасность трубопроводных систем. – М.: ИЦ “ЕЛИМА”, 2004. – 1104 с.
4. *Харионовский В. В.* Надежность и ресурс конструкций газопроводов. – М.: Недра, 2000. – 467 с.

Поступила 05. 01. 2009