УДК 539.3;622.692

І. П. Шацький, А. Б. Струк

Деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи

(Представлено членом-кореспондентом НАН України Г. С. Кітом)

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

Нестандартні умови експлуатації підземних трубопроводів на ділянках аномальної поведінки основи — підтоплені та заболочені території, карстові порожнини або технологічні виробки, просідання та сповзання грунту, зони тектонічних розломів, неотектоніки чи терасоутворення, сейсмо- та селенебезпечні райони — потребують додаткового аналізу з супутніми гідро- та інженерно-геологічним моніторингом та із застосуванням реологічних моделей механіки грунтів. Незважаючи на різноманіття цих моделей [1–4], механічне навантаження на трубопровід на аномальних ділянках важко передбачити. Для підвищення безпеки трубопровідних систем, прокладених у гірських районах, слід розвивати інженерні методи та моделі розрахунку напруженого стану та деформування трубопроводів в зонах локального руйнування скелястої основи.

Постановка задачі. Дослідження проводили в геометрично та фізично лінійній постановці. Підземний трубопровід моделювали нескінченним прямолінійним стержнем з трубчастою поперечиною (рис. 1), який взаємодіє з корінною породою через шар грунтової засипки, що описується лінійно-пружною моделлю Вінклера. При детальнішому розгляді питань міцності трубу вважали безмоментною оболонкою. Локальні порушення цілісності основи моделювали взаємними переміщеннями та поворотами блоків корінної породи і описували розривними або кусково-диференційованими функціями. При цьому нехтували армувальною дією труби на розтріскану основу. Такий підхід дозволяє визначати напруження в трубопроводі не за розподілом навантаження від грунту, яке зазвичай трудно оцінити, а за кінематичними параметрами переміщень корінної породи.

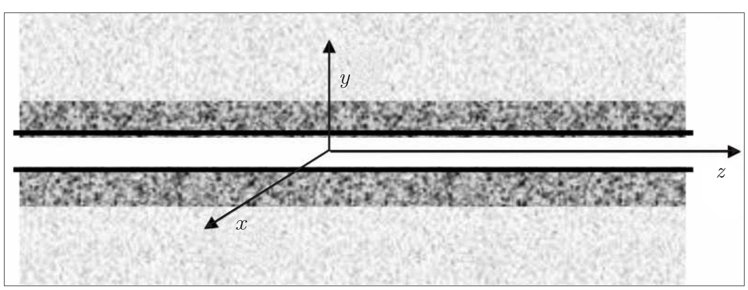

Рис. 1. Схема підземного трубопроводу

Для кількісної реалізації цієї концепції сформульована крайова задача для рівнянь рівноваги трубопроводу у переміщеннях:

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

Тут x, y, z — декартові координати; u_x, u_y, u_z, φ_z — переміщення та кут закручування трубопроводу; EF, GJ_p, EJ_x, EJ_y — жорсткості труби на розтяг, кручення та згин; D — зовнішній діаметр труби; k_τ, k_n — дотичний та нормальний коефіцієнти постелі;

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

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

Δ_{zk}, Δ_{xk}, Δ_{yk} — взаємні переміщення, а Θ_{zk}, Θ_{xk}, Θ_{yk} — взаємні повороти блоків; z_k — координати точок розривної деформації породи.

Аналітичний розв'язок. Аналітичний розв'язок крайової задачі (1) побудували у класі кусково-диференційованих функцій

$$\begin{aligned}
&u_z(z)=\sum_k\frac{\Delta_{zk}}{2}\left(1-\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_z}\right)\right)\operatorname{sgn}(z-z_k),\\
&\varphi_z(z)=\sum_k\frac{\Theta_{zk}}{2}\left(1-\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_\theta}\right)\right)\operatorname{sgn}(z-z_k),\\
&u_x(z)=\sum_k\frac{\Delta_{xk}}{2}\left(1-\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_x}\right)\cos\frac{z-z_k}{\gamma_x}\right)\operatorname{sgn}(z-z_k)+\\
&\qquad+\sum_k\frac{\Theta_{yk}}{2}\left(|z-z_k|+\frac{\gamma_x}{2}\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_x}\right)\left(\cos\frac{z-z_k}{\gamma_x}-\sin\frac{|z-z_k|}{\gamma_x}\right)\right),\\
&u_y(z)=\sum_k\frac{\Delta_{yk}}{2}\left(1-\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_y}\right)\cos\frac{z-z_k}{\gamma_y}\right)\operatorname{sgn}(z-z_k)+\\
&\qquad+\sum_k\frac{\Theta_{xk}}{2}\left(|z-z_k|+\frac{\gamma_y}{2}\exp\left(-\frac{|z-z_k|}{\gamma_y}\right)\left(\cos\frac{z-z_k}{\gamma_y}-\sin\frac{|z-z_k|}{\gamma_y}\right)\right).
\end{aligned}\tag{2}$$

Тут

$$\gamma_z=\sqrt{\frac{EF}{\pi Dk_\tau}}\approx\sqrt{\frac{Et}{k_\tau}},\qquad \gamma_\theta=\sqrt{\frac{4GJ_p}{\pi D^3k_\tau}}\approx\sqrt{\frac{Gt}{k_\tau}},$$

$$\gamma_x = \sqrt[4]{\frac{4EJ_x}{Dk_n}} \approx \sqrt[4]{\frac{\pi ED^2t}{2k_n}}, \qquad \gamma_y = \sqrt[4]{\frac{4EJ_y}{Dk_n}} \approx \sqrt[4]{\frac{\pi ED^2t}{2k_n}};$$

t — товщина стінки труби.

Інтегральні характеристики напруженого стану — осьове зусилля, крутний та згинальні моменти — через кінематичні характеристики обчислюються за формулами:

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

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

$$\sigma_z = \frac{N_z}{F} + \frac{M_x y}{J_x} + \frac{M_y x}{J_y} + \nu\sigma_\theta - E\alpha\Delta T, \qquad \sigma_\theta = p\frac{D}{2t}, \qquad \tau_{z\theta} = \frac{M_z D}{2J_p}$$

або

$$\sigma_z = E\left(\frac{du_z}{dz} + y\frac{d^2u_x}{dz^2} + x\frac{d^2u_y}{dz^2}\right) + \nu\sigma_\theta - E\alpha\Delta T, \qquad \sigma_\theta = p\frac{D}{2t}, \qquad \tau_{z\theta} = \frac{GD}{2}\frac{d\varphi_z}{dz}. \quad (3)$$

Тут p — внутрішній тиск у трубопроводі; α — коефіцієнт лінійного температурного розширення, а ν — коефіцієнт Пуассона матеріалу труби; ΔT — температурний перепад (додатний при нагріванні).

Для аналізу граничного стану труби використовують енергетичну концепцію міцності

$$\sigma_{eq} \equiv \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{z\theta}^2} \leqslant [\sigma], \quad (4)$$

де $[\sigma]$ — допустиме напруження для матеріалу труби.

Підстановкою результату (2) у співвідношення (3), (4) можна оцінити вплив позаштатних кінематичних чинників на напружений та граничний стан трубопроводу, навантаженого внутрішнім тиском.

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

1. Розрив переміщень основи вздовж осі труби. Нехай блоки основи у початку координат розступилися вздовж осі трубопроводу на величину Δ_1:

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

Вважаємо, що задано тиск p в трубопроводі, а температурні та монтажні напруження відсутні. Тоді, за результатами (2), (3),

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

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

2. Поперечний розрив переміщень. Нехай блоки основи у початку координат здійснили взаємне зміщення Δ_2 поперек осі трубопроводу, наприклад, у напрямку y. Тоді

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

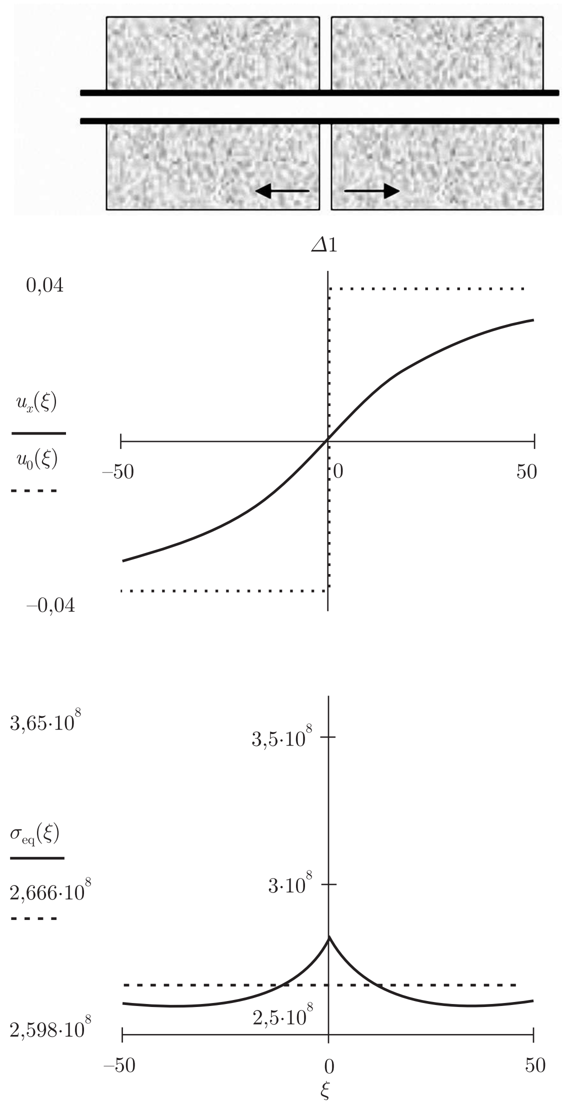

Рис. 2. Розподіл осьових переміщень (м) та еквівалентних напружень (Па) уздовж осі труби в зоні нормального розриву основи: $\xi = z/D$ — безрозмірна координата

Розв'язок задачі має вигляд

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

$$\sigma_z(z,y) = E\frac{\Delta_2 y}{\gamma_y^2}\exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_y}\right)\sin\frac{z}{\gamma_y} + \nu\sigma_\theta(z), \qquad \sigma_\theta(z) = p\frac{D}{2t}, \qquad \tau_{z\theta}(z) = 0.$$

Конкретні числові розрахунки проводили для підземного магістрального трубопроводу, прийнявши для труби $D = 1420$ мм, $t = 18$ мм, $E = 2{,}1\cdot 10^{11}$ Па, для грунту $k_\tau = 2$ МПа/м, $k_n = 5$ МПа/м. Взаємні переміщення блоків $\Delta_1 = \Delta_2 = D/20 = 71$ мм. Внутрішній тиск приймали таким, що створює у трубі тангенціальне напруження $\sigma_\theta = 300$ МПа. Результати дослідження подані на рис. 2, 3.

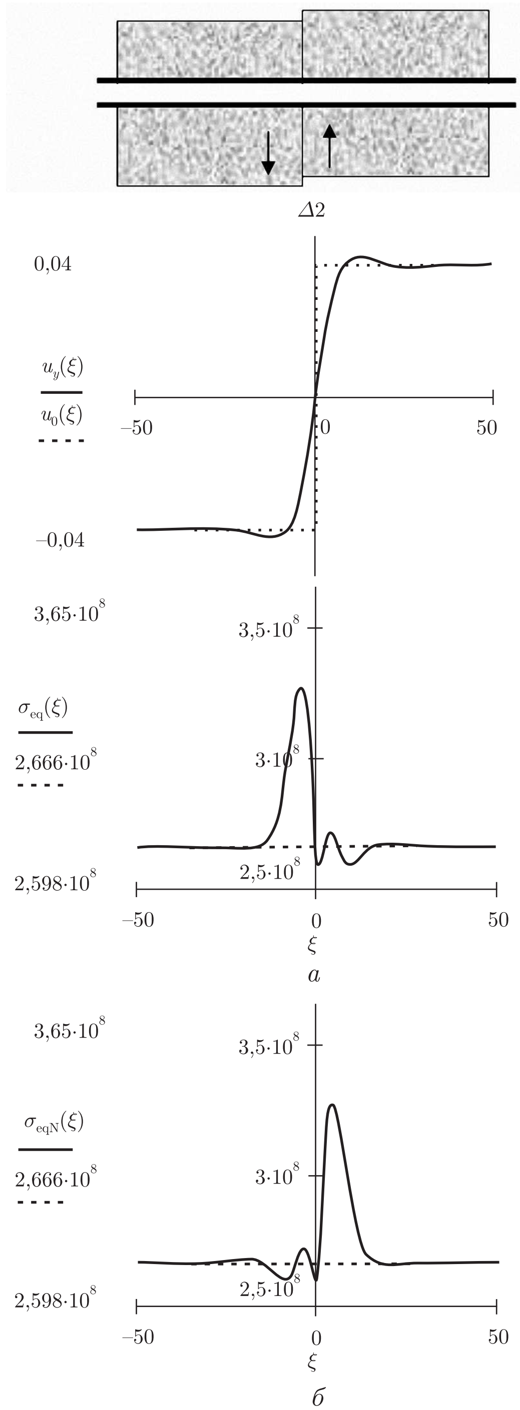

Рис. 3. Розподіл поперечних переміщень (м) та еквівалентних напружень (Па) уздовж осі труби в зоні поперечного розриву основи: *а* — верхні; *б* — нижні волокна; $\xi = z/D$ — безрозмірна координата

Аналогічно досліджуються і впливи взаємних поворотів блоків основи на переміщення та напруження в трубопроводі, а також деформування труби при множинному розтріскуванні грунту вздовж траси.

Таким чином, розроблена модель деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи дозволяє оцінити напружений та граничний стан труби за кінематичними параметрами розтріскування грунту.

Поперечний зсув блоків основи є небезпечнішим проти тріщини нормального відриву, а напружений стан труби локалізується в місці перерізування сильніше, аніж у місці розривання.

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

Івано-Франківський сектор Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Управління магістральних газопроводів “Прикарпаттрансгаз”, Івано-Франківськ

Надійшло до редакції 06.04.2009

I. P. Shatsky, A. B. Struk

Underground pipeline strain in areas of local fracture of the body

A model of underground pipeline strain under specific geotechnical conditions of the ground local fracture is proposed. The influence of jumps of displacements of the body blocks on the stressed state and the limit equilibrium of the pipe is investigated.