

Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 539.3; 622.692

DOI: 10.31471/1993-9868-2019-2(32)-53-60

НАПРУЖЕННЯ У ПІДЗЕМНОМУ ТРУБОПРОВОДІ ВІД ПОШКОДЖЕННЯ ОСНОВИ ПОБЛИЗУ АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ

А. Б. Струк

НВЦ технічної діагностики "Техдіагаз", 76011, м. Івано-Франківськ, вул. Січинського, 3В,
тел. (097) 9313537, e-mail: andrij_struk@ukr.net

Розглядаються питання міцності підземних трубопроводів, які експлуатуються за умов ускладнень геологічного чи техногенного характеру (рухи корінного ґрунту в зоні тектонічного розлому, взаємні переміщення та повороти скельних блоків тощо). Метою роботи є вивчення впливу обмеження рухомості трубопроводу, накладеного анкерним кріпленням, на напружений стан у стінці труби обабіч місця локального пошкодження основи. Дослідження статички трубопроводу проводили в геометрично лінійній постановці, моделюючи його стержнем з трубчастим поперечним перерізом, а при розгляді питань міцності – безмоментною циліндричною оболонкою. Взаємодію труби з щільною основою через ґрунтову засипку описували за гіпотезою пружного прошарку Вінклера. Вивчали деформацію закріпленої анкером труби, спричинену локальними порушеннями суцільності основи, які моделювали заданими розривами поздовжнього переміщення та кута повороту блоків. Такий підхід дає можливість оцінювати міцність протяжних підземних комунікацій не за зовнішнім навантаженням від ґрунту, яке зазвичай є невідомим, а за спостережуваними параметрами рухів берегів розлому. Граничний стан трубопроводу під внутрішнім тиском транспортного продукту та під додатковим навантаженням від кінематичного збурення досліджували за енергетичною теорією міцності. Сформулювали крайові задачі для диференціальних рівнянь розтягу-стиску та скруту прямолінійного стержня з розривними правими частинами. На підставі аналітичних розв'язків задач вивчено вплив пошкоджень типу тріщин нормального відриву, зближення блоків основи та їх розвороту довкола осі труби на напружено-деформований стан трубопроводу. Побудовано графіки розподілу переміщень, кутів повороту та еквівалентних напружень Мізеса залежно від величини і напрямку взаємного переміщення та розвороту берегів розлому за різних віддалей від анкера до дефекту основи. Встановлено, що накладання додаткової в'язі у вигляді анкерного кріплення призводить до істотного підвищення еквівалентних напружень у трубі. Виявлено також, що для труби під внутрішнім тиском зближення блоків основи є небезпечнішим, аніж їх розходження.

Ключові слова: підземний трубопровід, анкер, напруження, міцність, тектонічний розлом, розривні переміщення основи.

Рассматриваются вопросы прочности подземных трубопроводов, эксплуатируемых в условиях осложненной геологического или техногенного характера (движения коренной почвы в зоне тектонического разлома, взаимные перемещения и повороты скальных блоков и др.). Целью работы является изучение влияния ограничения подвижности трубопровода, наложенного анкерной крепью, на напряженное состояние в стенке трубы в окрестности локального повреждения основания. Исследование статички трубопровода проводили в геометрически линейной постановке, моделируя его стержнем с трубчатым сечением, а при рассмотрении вопросов прочности – безмоментной цилиндрической оболочкой. Взаимодействие трубы с плотной основой через ґрунтовую засыпку описывали, используя гипотезу упругой прослойки Винклера.

Изучали деформацию закрепленной анкером трубы, вызванную локальными нарушениями сплошности основания, которые моделировали заданными разрывами продольного перемещения и угла поворота блоков. Такой подход дает возможность оценивать прочность протяженных подземных коммуникаций не по внешним нагрузкам от почвы, которые обычно являются неизвестным, а по наблюдаемым параметрам движения берегов разлома. Предельное состояние трубопровода под внутренним давлением транспортируемого продукта и под дополнительной нагрузкой от кинематической возмущения исследовали в рамках энергетической теории прочности. Сформулировали краевые задачи для дифференциальных уравнений растяжения-сжатия и кручения прямолинейного стержня с разрывными правыми частями. На основании аналитических решений задач изучено влияние поврежденных типа трещин нормального отрыва, сближения блоков основы и их разворота вокруг оси трубы на напряженно-деформированное состояние трубопровода. Построены графики распределения перемещений, углов поворота и эквивалентных напряжений Мизеса в зависимости от величины и направления взаимного перемещения и разворота берегов разлома при различных расстояниях от анкера до дефекта основания. Установлено, что наложение дополнительной связи в виде анкерного крепления приводит к существенному повышению эквивалентных напряжений в трубе. Обнаружено также, что для трубы под внутренним давлением сближение блоков основы более опасно, чем их разхождение.

Ключевые слова: подземный трубопровод, анкер, напряжение, прочность, тектонический разлом, разрывные перемещения основания.

The article considers the issues of underground pipeline strength, which are operated in geological or technogenic complication conditions (movements of indigenous soil in the tectonic fault zone, mutual displacements and rotations of rock blocks, etc.). The work aims at studying of a mobility limitation effect of a pipeline anchorage imposed on the stress state in the pipe wall in the site of a local damage foundation. The pipeline static was investigated in a geometrically linear formulation, modeling it with a tubular cross-section, and with a momentless cylindrical shell for straight issues. The interaction of the pipe with a dense base through soil backfill was described by the hypothesis of Winkler's elastic layer. The deformation of the anchored pipe caused by base local continuity disturbances was studied, which was modeled by the given jumps of longitudinal displacement and the block angle of rotation. This approach makes it possible to evaluate the strength of long underground communications not on the external load from the ground, which is usually unknown, but according to the observed parameters of riverside movements. The limiting state of the pipeline under the internal pressure of the transported product and under additional loading from kinematic perturbation was investigated by the energy theory of strength. The authors formulated boundary value problems for differential tensile-compression equations and torsion of a straight bar with discontinuous right-hand sides. On the basis of analytical solutions to the problems, the effect of normal separation crack damage, foundation blocks convergence and their turn around the axis of the pipe on the stress-strain state of the pipeline was studied. Plots of displacement distribution, angles of rotation and equivalent stresses of von Mises are constructed depending on the magnitude and direction of the mutual displacement and reversal of the riverside at different distances from the anchor to the base defect. It has been found that overlapping anchors in the form of anchorage leads to a significant increase in the equivalent stresses in the pipe. It has also been found that for pipes under internal pressure, the approximation of the base blocks is more dangerous than their divergence.

Keywords: underground pipeline, anchor, stress, strength, tectonic fault, fracture displacement of the base.

Вступ

Експлуатація підземних трубопроводів на ділянках аномальної поведінки основи: підтоплені та заболочені території, карстові порожнини чи технологічні виробки, області промерзання-відтавання, просідання та сповзання ґрунту, зони тектонічних розломів, сейсмо- та селенебезпечні райони – належить до нестандартних умов роботи і потребує додаткового аналізу з супутніми гідрогеологічним та інженерно-геологічним моніторингом та із застосуванням реологічних моделей механіки ґрунтів. Не зважаючи на різноманіття цих моделей [1–3], механічне навантаження на трубопровід на аномальних ділянках важко передбачити. Приклади оцінювання допустимих навантажень на трубопровід у областях зсуву чи просідання ґрунту за допомогою традиційних підходів можна побачити, зокрема, у монографії [4] та пра-

цях [5–7]. Для підвищення безпеки трубопровідних систем, прокладених у гірських районах та через зони розломів, потребують розвитку інженерні методи та моделі розрахунку напруженого стану трубопроводів у місцях локального пошкодження скелястої основи.

Найчастіше для дослідження механіки трубопроводу, який перетинає зону розлому, застосовують числові методи аналізу [8–10]. У працях [11, 12] запропоновано підхід до аналітичної оцінки позаштатних напружень у трубопроводі за кінематичними параметрами пошкодження основи, таких як ізольовані розриви переміщень та кутів повороту. Автори статті [13] розвинули цю модель на випадок вібраційного навантаження; у праці [14] враховано нелінійну взаємодію труби з фрагментами блочної основи.

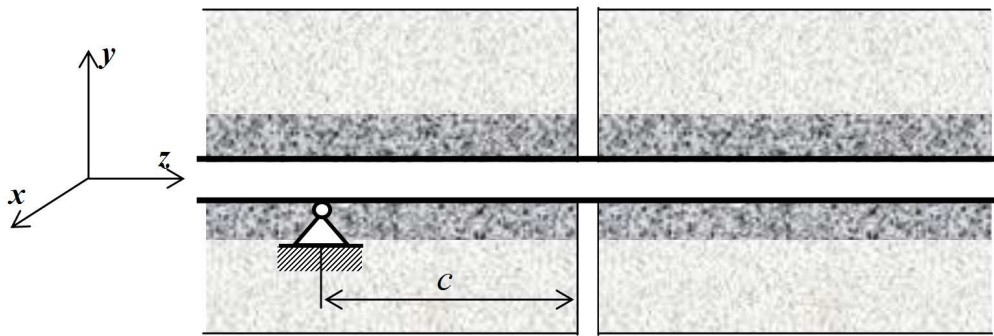


Рисунок 1 – Схема підземного трубопроводу з анкерним закріпленням поблизу розлому ґрунту

У цій статті маємо за мету вивчити вплив обмеження рухомості трубопроводу, накладеного анкерним кріпленням, на напружений стан у стінці труби обабіч місця локального пошкодження основи. Задля досягнення цілі дослідження вирішуються такі задачі: постулюються ключові гіпотези моделі, формулюється крайова задача розтягу-стиску та скруту трубопроводу, будується аналітичний розв'язок задачі, проводиться числовий аналіз впливу анкерного кріплення на напружено-деформований стан труби поблизу розлому.

Постановка та розв'язок крайової задачі

Нехай прямолінійна нитка трубопроводу, розташована вздовж осі z , взаємодіє з блочною скельною основою через шар ґрунтової засипки (рис. 1). У початку координат трубопровід з'єднано із блоком основи через анкерне кріплення. Трубопровід перетинає розлом основи на деякій віддалі від анкера. Досліджуємо вплив переміщень та поворотів сусіднього блоку на напружено-деформований стан закріпленого анкером трубопроводу, навантаженого штатним внутрішнім тиском транспортованого продукту.

Приймемо припущення моделі, описаної в працях [11, 12], а саме: дослідження проводимо в геометрично та фізично лінійній постановці; трубопровід моделюємо нескінченим прямолінійним стрижнем з трубчастим поперечним перерізом; трубопровід взаємодіє з абсолютно жорсткими блоками основи через шар ґрунтової засипки, який відповідає лінійно-пружній моделі Вінклера; взаємні переміщення та повороти блоків основи описуються розривними функціями від осової координати; при детальнішому розгляді питань міцності труба вважається безмоментною оболонкою.

На підставі згаданих припущень сформулювали крайову задачу деформування нескінченного стрижня:

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

Тут прийнято позначення:

z – осьова координата з початком у місці кріплення анкера;

u_z, φ_z – осьове переміщення та кут закручування трубопроводу;

EF, GJ_p – жорсткості труби щодо розтягу та скруту;

D – зовнішній діаметр труби;

k_τ – дотичний коефіцієнт постелі;

$u_z^0 = \Delta H(z-c), \varphi_z^0 = \Theta H(z-c)$ – розривні функції переміщення та розвороту основи;

Δ, Θ – переміщення та поворот блоків;

$H(\dots)$ – функція Гевісайда;

c – віддаль від анкера до розлому.

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

$$\begin{aligned}
 u_z(z) &= \Delta \left(H(z-c) - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|z|+c}{\gamma_z}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|z-c|}{\gamma_z}\right) \operatorname{sgn}(z-c) \right), \\
 \varphi_z(z) &= \Theta \left(H(z-c) - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|z|+c}{\gamma_\theta}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|z-c|}{\gamma_\theta}\right) \operatorname{sgn}(z-c) \right), \quad (2)
 \end{aligned}$$

Тут

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

t – товщина стінки труби.

Компоненти тензора напружень у стінці труби знаходимо із співвідношень:

$$\sigma_z = E \frac{du_z}{dz} + \nu \sigma_\theta, \quad \sigma_\theta = p \frac{D}{2t},$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{GD}{2} \frac{d\varphi_z}{dz}. \quad (3)$$

Тут p – внутрішній тиск у трубопроводі;

ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби.

Підстановкою результату (2) у співвідношення (3) можна отримати вирази для напружень у трубі та оцінити вплив позаштатних чинників (взаємних переміщень та повороту блоків основи) на напружений та граничний стан трубопроводу, навантаженого внутрішнім тиском. Остаточоно:

$$\sigma_z(z) = \frac{E\Delta}{2\gamma_z} \left(\exp\left(-\frac{|z|+c}{\gamma_z}\right) \operatorname{sgn}(z) + \exp\left(-\frac{|z-c|}{\gamma_z}\right) \right) + \nu p \frac{D}{2t},$$

$$\sigma_\theta(z) = p \frac{D}{2t},$$

$$\tau_{z\theta}(z) = \frac{GD\theta}{4\gamma_\theta} \left(\exp\left(-\frac{|z|+c}{\gamma_\theta}\right) \operatorname{sgn}(z) + \exp\left(-\frac{|z-c|}{\gamma_\theta}\right) \right). \quad (4)$$

Для аналізу граничного стану труби доцільно використовувати енергетичну концепцію міцності:

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma], \quad (5)$$

де еквівалентне напруження Мізеса –

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{z\theta}^2}; \quad (6)$$

$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу труби.

Аналіз результатів

Конкретні числові розрахунки проводили для підземного магістрального трубопроводу, прийнявши для труби $D = 1420$ мм, $t = 18$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, а для постелі $k_\tau = 2$ МПа/м. Внутрішній тиск вважали таким, що створює у трубі тангенціальне напруження $\sigma_\theta = 300$ МПа. Розглядали три варіанти позаштатного кінематичного збурення: взаємне розходження блоків основи (тріщина нормального відриву) на величину $\Delta = D/20 = 71$ мм,

взаємне зближення блоків основи на величину $\Delta = -D/20 = -71$ мм та взаємний розворот блоків довкола осі труби на кут $\Theta = 0,1$ рад.

На підставі формул (2)–(4), (6) будували графічні залежності поздовжніх переміщень та кутів повороту трубопроводу і основи, а також еквівалентних напружень у трубі від безрозмірної осової координати $\zeta = z/D$, відраховуваної від анкера, для різних значень віддалі c від анкера до розлому. Крім того, розглядали й інший ракурс – залежності переміщень, кутів повороту та напружень від безрозмірної координати $\xi = (z-c)/D$, яка відраховується від розлому, для різних значень віддалі c від розлому до анкера. Результати дослідження подано на рис. 2–7. На усіх діаграмах переміщень і кутів повороту пунктирні лінії відповідають розривній кінематиці основи u_z^0, φ_z^0 ; на усіх діаграмах напружень пунктиром позначено еквівалентне напруження лише від штатного внутрішнього тиску:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{1 - \nu + \nu^2} \sigma_\theta \approx 2,67 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

Слід зазначити, що взаємне зближення блоків призводить до більших значень σ_{eq} , ніж розходження берегів розлому. Це відбувається тому, що у стиснутій вздовж осі трубі під внутрішнім тиском головні напруження мають різні знаки, а у розтягнутій трубі головні напруження – додатні.

Висновки

Розроблена модель деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи дозволяє оцінити напружений та граничний стан труби за кінематичними параметрами розтріскування основи з урахуванням взаємодії впливів розлому та анкерного кріплення.

Встановлено, що взаємне зближення блоків основи є більш небезпечним для цілісності трубопроводу порівняно з розкриттям тріщини нормального відриву. Це твердження справедливе для будь-яких координат розташування анкера.

Накладання додаткової в'язі у вигляді анкерного кріплення призводить до підвищення еквівалентних напружень у трубопроводі тим більшого, що ближче анкер розміщений до берега розлому.

Наведені у статті дослідження доцільно продовжувати, враховуючи ефект температурного перепаду і монтажний вигин труби при профілюванні та повороті траси.

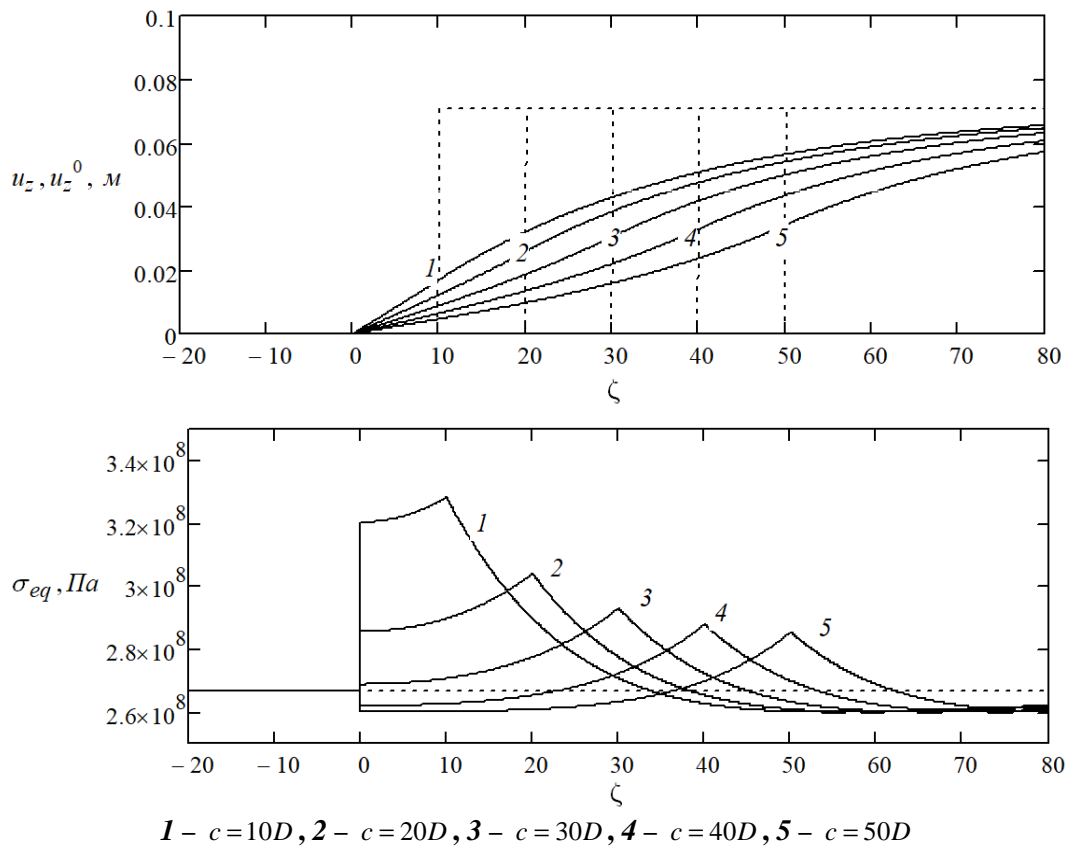


Рисунок 2 – Переміщення та еквівалентні напруження у трубі біля анкера від розходження блоків за різних віддалей до розлому

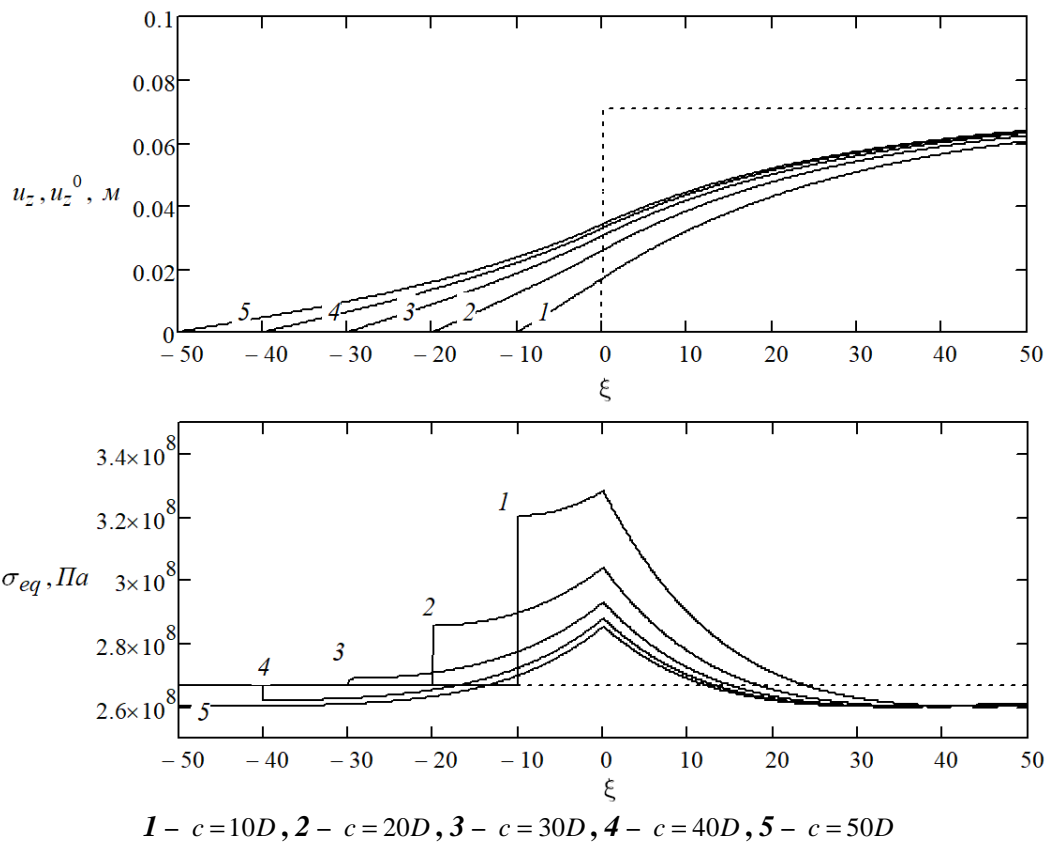
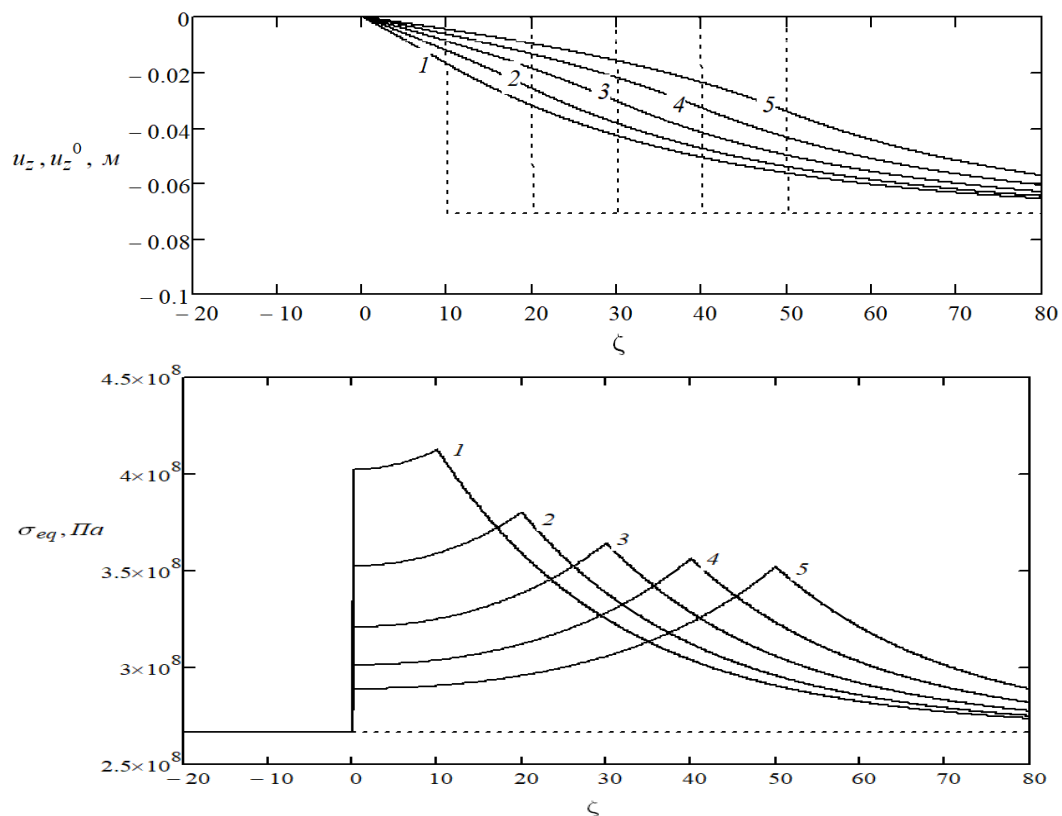
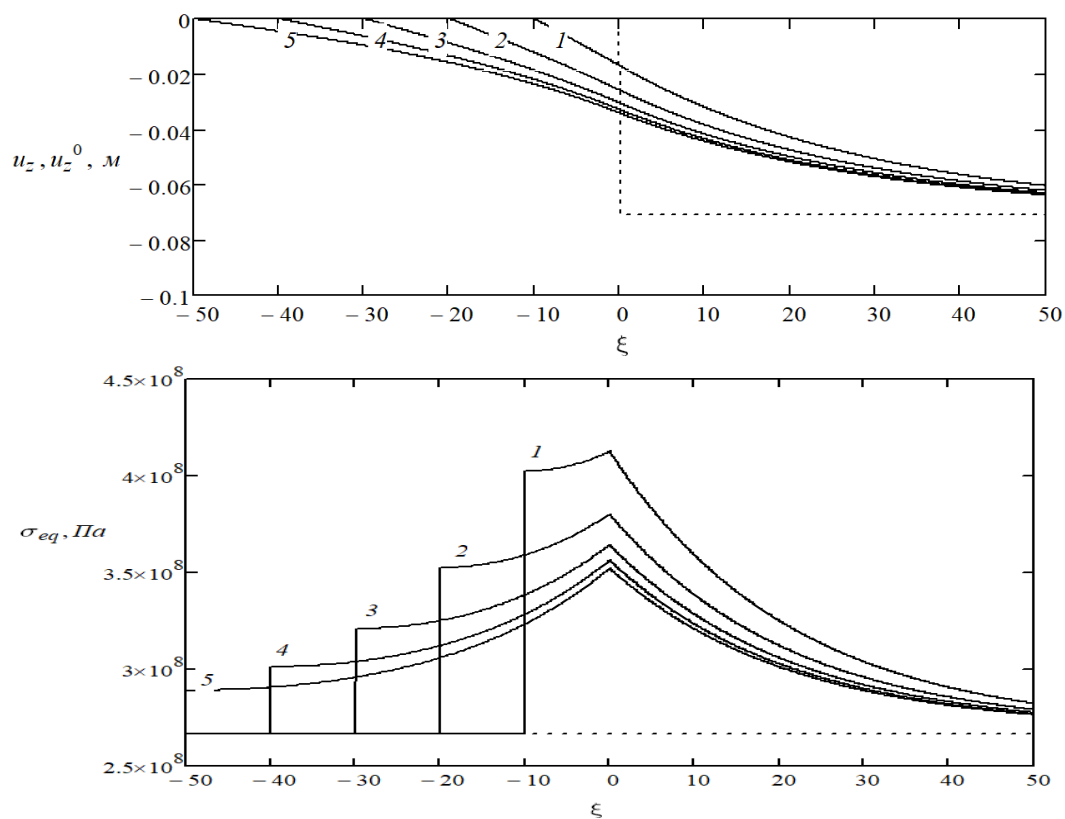


Рисунок 3 – Переміщення та еквівалентні напруження у трубі біля розлому від розходження блоків за різних віддалей до анкера



1 – $c = 10D$, 2 – $c = 20D$, 3 – $c = 30D$, 4 – $c = 40D$, 5 – $c = 50D$

Рисунок 4 – Переміщення та еквівалентні напруження у трубі біля анкера від зближення блоків за різних віддалей до розлому



1 – $c = 10D$, 2 – $c = 20D$, 3 – $c = 30D$, 4 – $c = 40D$, 5 – $c = 50D$

Рисунок 5 – Переміщення та еквівалентні напруження у трубі біля розлому від зближення блоків за різних віддалей до анкера

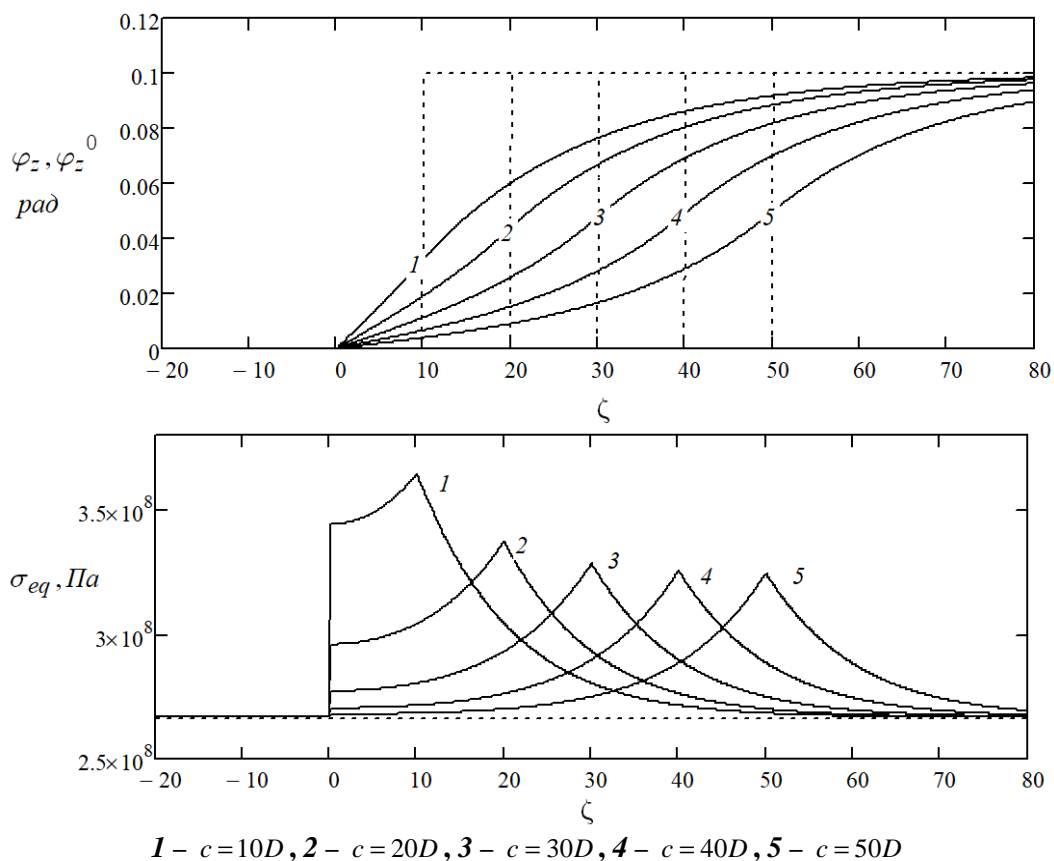


Рисунок 6 – Кути повороту та еквівалентні напруження у трубі біля анкера від розвороту блоків за різних віддалей до розлому

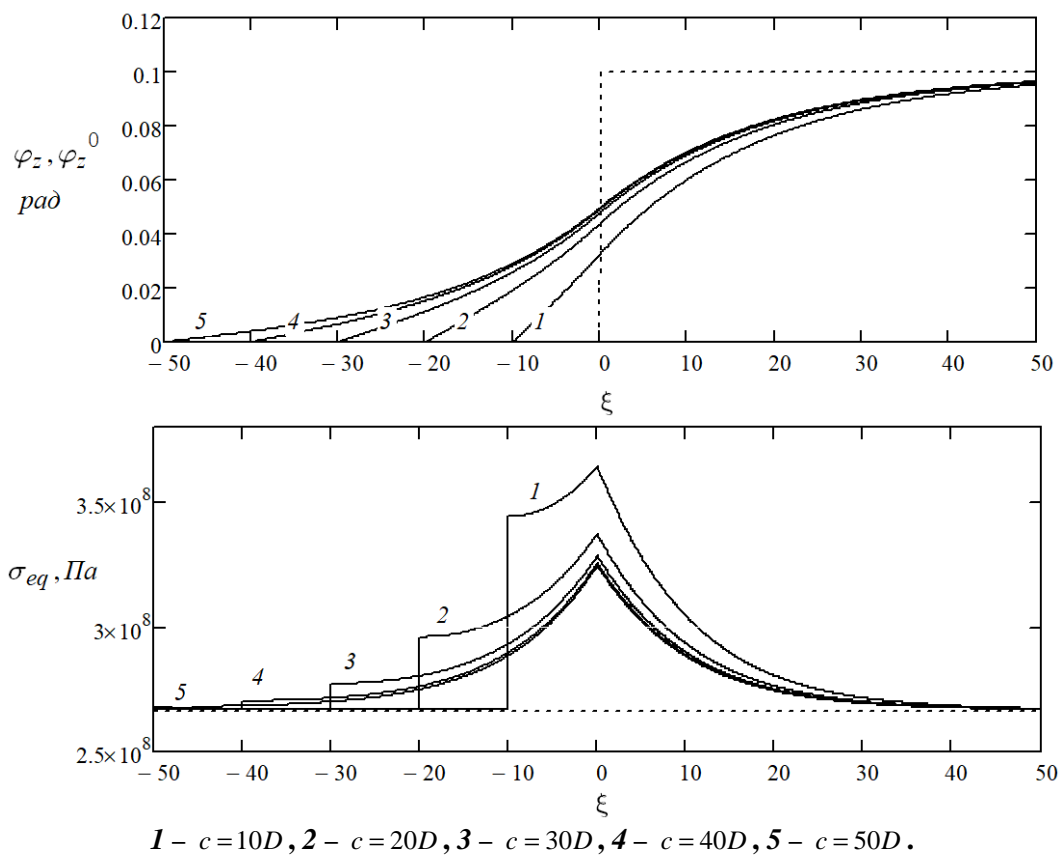


Рисунок 7 – Кути повороту та еквівалентні напруження у трубі біля розлому від розвороту блоків за різних віддалей до анкера

Література

References

1. Айнбиндер А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1992. 287 с.
2. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ „ЕЛИМА”, 2004. 1104 с.
3. Харионовский В. В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 467 с.
4. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы. Проектирование и строительство. М.: Недра, 1982. 384 с.
5. Крижанівський С. І., Рудко В. П., Шацький І. П. Оцінка допустимих навантажень на трубопровід у зоні сповзання ґрунту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2004. Т. 40, № 4. С. 98–100.
6. Velychkovych A. S., Andrusyak A.V., Pryhorovska T. O., Ropyak L. Y. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2019. Vol. 74, Article Number 65.
7. Trifonov O. V. Cherniy V. P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 33, Issue 1. P. 54–62.
8. Vazouras P., Karamanos S.A., Dakoulas P. Mechanical behavior of buried pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 61. P. 164–180.
9. Zhang J., Liang Z., Han C. J. Finite element analysis of wrinkling of buried pressure pipeline under strike-slip fault. *Mechanika*. 2015. Vol. 21, Issue 3. P. 31–36.
10. Орыняк И. В., Богдан А. В. Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщ. 1. Разработка численной процедуры. *Пробл. прочности*. 2007. № 3. С. 51–74.
11. Шацький І. П., Струк А. Б. Напружений стан трубопроводу в зонах локального руйнування ґрунту. *Пробл. прочности*. 2009. № 5. С. 127–133.
12. Шацький І. П., Струк А. Б. Деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи. *Доп. НАН України*. 2009. № 12. С. 69–74.
13. Shatskyi I., Struk A., Vaskovskyi M. Static and dynamic stresses in pipeline built on damaged foundation. *Trans. VŠB – TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.* 2017. Vol. 17, Issue 2. P. 119–124.
14. Шацький І., Струк А. Оцінювання напруженого стану підземного трубопроводу за кінематичними параметрами розтріскування основи. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В.Панасюка*. Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2009. С. 981–984.

1. Aynbinder A. B. Raschet magistralnyh i promyslovyh truboprovodov na prochnost i ustoychivost. Spravochnoe posobie. M.: Nedra, 1992. 287 p.
2. Mazur I. I., Ivantsov O. M. Bezopasnost truboprovodnyh sistem. M.: ELIMA, 2004. 1104 p.
3. Harionovskiy V. V. Nadezhnost i resurs konstruksiy gazoprovodov. M.: Nedra, 2000. 467 p.
4. Borodavkin P. P. Podzemnyie magistralnyie truboprovody. Proektirovanie i stroitelstvo. M.: Nedra, 1982. 384 p.
5. Kryzhaniv's'kyi E. I., Rudko V. P., Shats'kyi I. P. Estimation of admissible loads upon a pipeline in the zone of sliding ground. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, Issue 4. P. 547–551.
6. Velychkovych A. S., Andrusyak A.V., Pryhorovska T. O., Ropyak L. Y. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2019. Vol. 74, Article Number 65.
7. Trifonov O. V. Cherniy V. P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 33, Issue 1. P. 54–62.
8. Vazouras P., Karamanos S.A., Dakoulas P. Mechanical behavior of buried pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 61. P. 164–180.
9. Zhang J., Liang Z., Han C. J. Finite element analysis of wrinkling of buried pressure pipeline under strike-slip fault. *Mechanika*. 2015. Vol. 21, Issue 3. P. 31–36.
10. Orynyak I. V., Bogdan A. V. Problem of large displacements of buried pipelines. Part 1. Working out a numerical procedure. *Strength of Materials*. 2007. Vol. 39, Issue 3. P. 257–274.
11. Shats'kyi I. P., Struk A. B. Stressed state of pipeline in zones of soil local fracture. *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41, Issue 5. P. 548–553.
12. Shatskyi I. P., Struk A. B. Deformuvannia pidzemnoho truboprovodu v mistsyakh lokalnoho ruynuvannia osnovy. *Dop. NAN Ukrainy*. 2009. No 12. P. 69–74.
13. Shatskyi I., Struk A., Vaskovskyi M. Static and dynamic stresses in pipeline built on damaged foundation. *Trans. VŠB – TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.* 2017. Vol. 17, Issue 2. P. 119–124.
14. Shatskyi I., Struk A. Otsiniuvannia napruzhenoho stanu pidzemnoho truboprovodu za kinematychnymy parametramy roztriskuvannia osnovy. *Mekhanika ruynuvannia materialiv i mitsnist konstruksii / Pid zah. red. V.V.Panasiuka*. Lviv: Fiz.-mekh. in-t im. H.V.Karpenka NAN Ukrainy, 2009. P. 981–984.