

УДК 622.692.4.07

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБОПРОВОДУ ПРИ ЙОГО ПІДСАДЦІ

¹Б.С.Білобран, ²Л.С.Шлапак

¹ Національний університет "Львівська Політехніка", 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 13, тел. (0322) 398521, e-mail: chgeo@gls.cn.ua

² ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) , e-mail: public@ifdtung.if.ua

Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при подкопе. При разработке математической модели использована модель начального упругопластического тела. Для упрощения математической модели не учитывалась податливость дна траншеи и внешние деформации трубы в ходе ремонта на величину эквивалентного продольного усилия.

The methods of stress – stained state estimation for the pipeline with the undermining is proposed. The mathematical model of initial elastic – plastic body is used to modelling the such pipeline. To simplify the mathematical model the trench bottom pliability is not considered both with the external deformation of pipeline during the reconstruction on the value of the equivalent longitudinal effort.

Аналіз причин аварій на магістральних трубопроводах свідчить, що значна їх кількість спричинена пошкодженням розташованих на недостатній глибині ділянок різними машинами і механізмами та іншими зовнішніми впливами. Для зменшення ризику таких пошкоджень та підвищення надійності експлуатації магістральних трубопроводів виникає потреба підсадки (заглиблення) вказаних ділянок до регламентованої чинними нормами [1] глибини.

З економічної точки зору найбільш цікавим є застосування способів підсадки підземного трубопроводу без припинення перекачування продукту при понижених тисках.

У зв'язку з цим важливого практичного значення набувають дослідження стосовно опрацювання способів заглиблення трубопроводу, які б не понижували рівень механічної надійності конструкції як під час виконання ремонтних робіт, так і в післяремонтний період.

На рис. 1 зображено розрахункову схему трубопроводу при підсадці з підтримкою провисаючої частини в одному перерізі та ручному способі ремонту.

З метою спрощення математичної моделі знехтуємо піддатливістю дна траншеї та впливом деформативності труби під час ремонту на величину еквівалентної поздовжньої сили. Це призводить до дещо завишених значень згинальних моментів та поздовжньої сили, рухаючись таким чином при розрахунках в запас міцності. В цьому разі еквівалентна поздовжня сила обчислюється за формулою [2]

$$S = (E\alpha\Delta t + 0,2\sigma_{кц}) F, \quad (1)$$

де: α, E – відповідно коефіцієнт лінійного розширення і модуль пружності матеріалу труб;

Δt – температурний перепад;

$\sigma_{кц}$ – кільцеве напруження від внутрішнього тиску;

F – площа поперечного перерізу стінки труби.

На прилеглій спереду до підкопаної зони ділянки взаємодію трубопроводу з ґрунтом опишемо за допомогою моделі ідеального пружно-пластичного тіла. Коефіцієнт постелі ґрунту та його граничний опір будемо визначати за формулами [2]

$$k_0 = \frac{0.12E_{zp}}{(1 - \mu_{zp}^2)\sqrt{D + 2\delta_{iz}}}; \quad (2)$$

$$q_0 = q_{zp} = (D + 2\delta_{iz})R_{zp},$$

де: E_{zp}, μ_{zp} і R_{zp} – модуль деформації, коефіцієнт Пуассона і несуча здатність ґрунту;

D – зовнішній діаметр труби;

δ_{iz} – товщина ізоляції.

З огляду на невеликі значення прогинів трубопроводу в межах його лінійної взаємодії з ґрунтом впливом поздовжньої сили на ці прогини нехтуємо. Згідно з [3] прогин і кут повороту на краю півнескінченної балки на пружній основі становлять

$$w_0 = r_3 Q_0 - r_2 M_0; \quad (3)$$

$$\Theta_0 = r_2 Q_0 - r_1 M,$$

де: EI – жорсткість труби при згині;

$$r_1 = \frac{1}{EI\beta_0}; \quad r_2 = \frac{1}{2EI\beta_0^2}; \quad (4)$$

$$r_3 = \frac{1}{2EI\beta_0^3}; \quad \beta_0 = \sqrt{\frac{k_0(D + 2\delta_{iz})}{4EI}}$$

Для визначення переміщень основної ділянки розрахункової схеми використаємо загальний розв'язок диференціального рівняння поздовжньо-поперечного згину, який для нашого випадку має такий вигляд:

а) на відтинку граничного опору ґрунту $0 \leq z_1 \leq a_0$

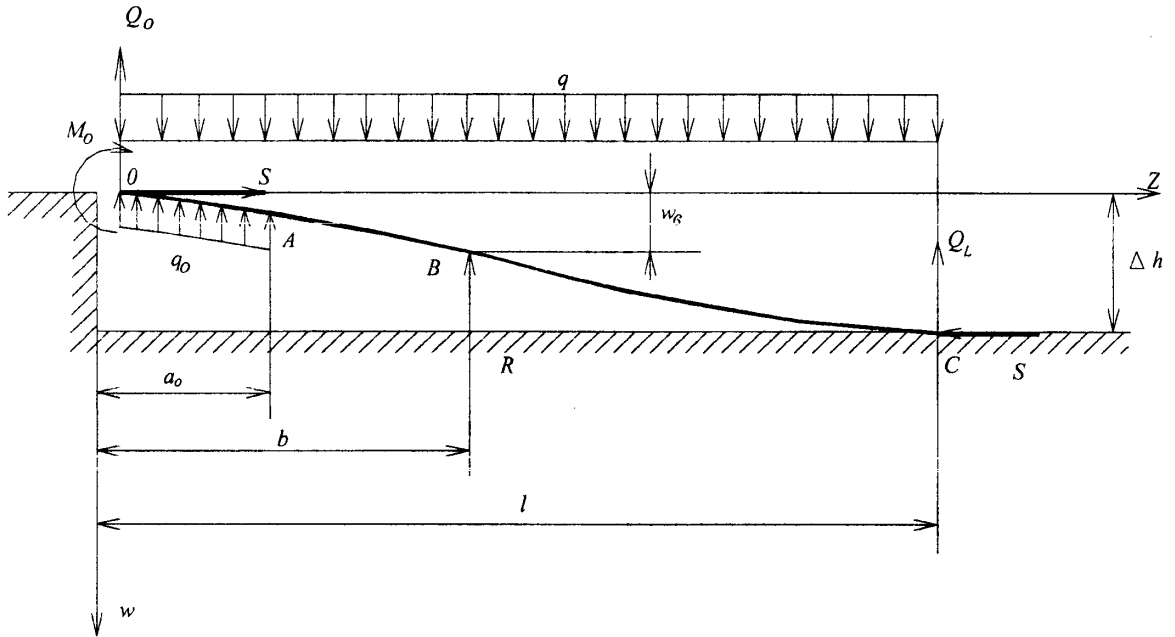


Рисунок 1 — Розрахункова схема підсадки трубопроводу

$$w(z_1) = w_0 + C_1 \sin kz_1 + C_2 \cos kz_1 + \frac{(q - q_0)z_1^2}{2S} - \frac{Q_0 z_1}{S} - \frac{M_0}{S} - \frac{q - q_0}{k^2 S}; \quad (5)$$

б) на підкопаній ділянці $a_0 \leq z_2 \leq b$

$$w(z_2) = w_0 + C_3 \sin kz_2 + C_4 \cos kz_2 + \frac{qz_2^2}{2S} - \frac{Q_0 z_2}{S} - \frac{M_0}{S} - \frac{q_0 a_0 (2z_2 - a_0)}{2S} - \frac{q}{k^2 S}; \quad (6)$$

в) на підкопаній ділянці $b \leq z_3 \leq l$

$$w(z_3) = w_0 + C_5 \sin kz_3 + C_6 \cos kz_3 + \frac{qz_3^2}{2S} - \frac{Q_0 z_3}{S} - \frac{R(z_3 - b)}{S} - \frac{M_0}{S} - \frac{q_0 a_0 (2z_3 - a_0)}{2S} - \frac{q}{k^2 S}; \quad (7)$$

де $k = \sqrt{S/EI}$; $C_1 \dots C_6$ – постійні, які визначаються із умов сумісності переміщень на границях ділянок.

З цих умов знаходимо

$$C_1 = \frac{Q_0}{S} \left(\frac{1}{k} + r_2 k \right) - \frac{M_0 r_1 k}{S}; \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{M_0}{S} + \frac{q - q_0}{k^2 S};$$

$$C_3 = C_1 + \frac{q_0}{k^2 S} \sin ka_0; \quad (9)$$

$$C_4 = C_2 + \frac{q_0}{k^2 S} \cos ka_0;$$

$$C_5 = C_3 + \frac{R}{kS} \cos kb; \quad (10)$$

$$C_6 = C_4 - \frac{R}{kS} \sin kb.$$

При нехтуванні піддатливістю дна траншеї кут повороту і згинальний момент на кінці викривленої ділянки дорівнюють нулю. Отже,

$$\Theta(l) = w'(l) = 0; \quad M(l) = EIw''(l) = 0. \quad (11)$$

Використавши вираз для прогинів (7) та рівняння статки для вирізанної частини $\sum Y_i = 0$, на підставі цих умов одержуємо систему рівнянь для визначення основних невідомих Q_0, M_0

$$Q_0 \left[(1 + r_2 k^2) \cos kl - 1 \right] - M_0 k \times$$

$$\times (\sin kl + r_1 k \cos kl) + R (\cos k(l - b_i) - 1) -$$

$$- \frac{q - q_0}{k} \sin kl - \frac{q_0}{k} \sin k(l - a_0) - q_0 a + ql = 0;$$

$$Q_0 \left(\frac{1}{k} + r_2 k \right) \sin kl + M_0 (\cos kl - r_1 k \sin kl) +$$

$$+ \frac{q - q_0}{k^2} \cos kl + \frac{R}{k} \sin k(l - b) + \frac{q_0}{k^2} \times$$

$$\times \cos k(l - a_0) - \frac{q}{k^2} = 0.$$

Прогин трубопроводу над проміжною опорою та на кінці надземної ділянки

Таблиця 1 — Вихідні дані для розрахунку напруженого стану трубопроводу для випадку підсадки з ручним підкопом під трубопроводом

Вихідні дані	Значення
Категорія	III
Зовнішній діаметр D , мм	1020
Товщина стінки h , мм	10
Товщина ізоляції δ_{i3} , мм	5
Товщина прилиплого ґрунту δ_{zp} , мм	3
Внутрішній тиск p , МПа	2,2
Тип ґрунту	піщаний
Модуль деформації ґрунту E_{zp} , МПа	20
Коефіцієнт Пуассона ґрунту μ_{zp}	0.2
Умовна несуча здатність ґрунту R_{zp} , МПа	0.15
Об'ємна вага ґрунту γ_{zp} , кН/м ³	15
Температурний перепад Δt , °С	10
Розрахунковий опір матеріалу труби R_2 , МПа	360
Допустиме напруження згину $[\sigma]_{32}$, МПа	218

$$w(b) = w_0 + C_3 \sin kb + C_4 \cos kb - \frac{Q_0 b}{S} - \frac{M_0}{S} + \frac{q}{S} \left(\frac{b^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right) - \frac{q_0 a_0 (2b - a_0)}{2S} + \frac{q}{S} \left(\frac{b^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right) - \frac{q_0 a_0 (2b - a_0)}{2S}; \quad (13)$$

$$w(l) = \Delta h = w_0 + C_5 \sin kl + C_6 \cos kl - \frac{Q_0 l}{S} - \frac{M_0}{S} - \frac{R(l-b)}{S} + \frac{q}{S} \left(\frac{l^2}{2} - \frac{1}{k^2} \right) - \frac{q_0 a_0 (2l - a_0)}{2S}. \quad (14)$$

Найбільший згинальний момент, що виникає скраю півнескінченного непідкопаного трубопроводу, обчислюють за формулами

$$z_0 = \frac{1}{\beta_0} \arctg \frac{1}{1 - \frac{2\beta_0 M_0}{Q_0}}; \quad (15)$$

$$M_{max}^0 = e^{-\beta_0 z_0} \times \left[M_0 (\sin \beta_0 z_0 + \cos \beta_0 z_0) - \frac{Q_0}{\beta_0} \sin \beta_0 z_0 \right]. \quad (16)$$

Згинальний момент в перерізі над проміжною опорою

$$M_B = S(C_3 \sin kb + C_4 \cos kb) - \frac{qEl}{S}. \quad (17)$$

Екстремальний згинальний момент на відтинку BC (рис. 1)

$$M_3 = S(C_5 \sin kz_3 + C_6 \cos kz_3) - \frac{qEl}{S}, \quad (18)$$

де

$$z_3 = \frac{1}{k} \arctg \frac{C_5}{C_6}. \quad (19)$$

Найменше значення ремонтних напружень відповідає умові

$$|M_{max}^0| = |M_B| = M_3. \quad (20)$$

Найбільш раціональними стосовно міцності труби є значення опорного зусилля R та відстані b , при яких виконується ця умова.

Викладену вище розрахункову модель було застосовано при аналізі напружено-деформованого стану стосовно підсадки ділянки магістрального нафтопроводу "Дружба" діаметром 1020 мм на ділянці Унеча-Мозир, що залягала на недостатній глибині. В місцях виходу на поверхню ізоляційне покриття зверху труби було сильно пошкоджене, а її поверхня подряпана сільськогосподарськими механізмами. Все це зумовило необхідність виконати заглиблення трубопроводу на глибину не менше 0,8 м.

Теоретичні дослідження напруженого стану матеріалу труб виконано для випадку підсадки з ручним підкопом під трубопроводом з урахуванням вихідних даних, поданих у табл. 1.

В табл. 2 наведені результати розрахунку основних параметрів, що характеризують згин трубопроводу при підсадці без підтримки провисаючої ділянки.

Таблиця 2 — Результати розрахунку основних параметрів згину трубопроводу при підсадці без підтримки провисаючої частини

l , м	z_0 , м	w_a , м	Δh , м	$\max \sigma_{32}$, МПа
20.0	2.91	0.021	0.077	55.3
24.0	2.46	0.029	0.138	84.6
28.0	2.12	0.048	0.230	121.5
32.0	1.98	0.051	0.355	169.2
36.0	2.31	0.071	0.583	227.3

Таблиця 3 — Результати порівняльного розрахунку найбільших ремонтних напружень у трубопроводі з урахуванням піддатливості дна траншеї та без її урахування

Параметри	w_0 , мм	$\max \sigma_{32}$, МПа	z_0 , м
Уточнена розр. схема	6.62	215.5	2.06
Спрощена розр. схема	6.66	216.5	2.075
Розбіжність, %	0.6	0.5	0.6

З табл. 2 видно, що небезпечний переріз, де виникає найбільший згинальний момент під час підсадки, знаходиться на початку непідкопаної ділянки, приблизно на відстані $z_0 = 2 \div 3$ м від її краю. Найбільша допустима величина підсадки без підтримки трубопроводу становить близько 0,54 м. При $\Delta h > 0,54$ м найбільші ремонтні напруження згину будуть перевищувати допустиме їх значення 218 МПа.

Числові дослідження засвідчили, що підсадку досліджуваної ділянки нафтопроводу "Дружба" на глибину $\Delta h = 0,8$ м можна здійснити, підтримуючи підкопану трубу одним механізмом. У цьому разі підтримувати провисаючий відтинок трубопроводу зусиллям 300 кН найбільш доцільно на відстані 17,9 м від краю підкопу. Для цього випадку найбільші ремонтні напруження дорівнюють 150,1 МПа, що близько до мінімального значення, яке відповідає умові $\min | \max M_{3\Gamma} |$, коли $| \max M_0 | = | M_B | = M_C$.

Для оцінки впливу пружної піддатливості ґрунту дна траншеї на основні параметри технологічного процесу підсадки трубопроводу застосовано методику розрахунку капітального ремонту трубопроводу [4], що враховує цей вплив. В табл. 3 зроблено порівняння результатів розрахунку прогину на краю підкопу w_0 , найбільших ремонтних напружень $\max \sigma_{32}$ та координати z_0 , що визначає розташування небезпечного перерізу, в якому вони виникають, з урахуванням піддатливості дна траншеї при $k_L = 0,5$ МН/м³ та без її урахування (при нульових граничних умовах в точці дотику трубопроводу до дна траншеї).

Розрахунки виконано для розглянутого вище випадку підсадки трубопроводу $D = 1020$ мм на глибину $\Delta h = 0,54$ м. Як бачимо, при однако-

вій глибині підсадки нехтування деформативністю дна траншеї неістотно впливає на результати розрахунків, різниця не перевищує 1%. Тому при практичних розрахунках на міцність достатньо використати спрощену розрахункову схему з нульовими граничними умовами на кінці зігнутої ділянки.

Література

1. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы // Минстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1997. – 60 с.
2. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: Справ. пособие. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
3. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т. 2. – М.: Наука, 1965. – 480 с.
4. Билобран Б.С., Пискозуб Л.И., Слюсаренко М.И. Продольно-поперечный изгиб магистрального трубопровода при ремонте в траншее // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: Экспресс-информация. – М.: ВНИИОЭНГ, 1987. – Вып.3. – С. 5-9.