

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ, ЩО РЕМОНТУЄТЬСЯ

В. В. Ніколаєв

УМГ «Черкаситрансгаз»

вул. Сумгайтська, 3, м. Черкаси, 18023, Україна. E-mail: nikolaev-vv@utg.ua

О. Ф. Іткін

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kmto@mail.ru

Визначено основні показники надійності безперебійної експлуатації магістральних трубопроводів на етапі їх експлуатації. Приведена математична модель напружено-деформованого стану ремонтної ділянки. Визначено напружено-деформований стан ділянки трубопроводу, що ремонтується, з метою розробки ефективної системи попередження відмов магістральних трубопроводів, як при проектуванні та експлуатації, так і при вибіркового ремонту. Встановлено, що зміна прямолінійного, ненавантаженого згинаючими моментами розташування, призводить до зміни напружено-деформованого стану трубопроводу. Запропоновані аналітичні вирази для визначення та контролювання напружено-деформованого стану трубопроводу в процесі проведення ремонтних робіт. Запропонована методика розрахунку напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу при виїмці ґрунту та провисанні трубопроводу.

Ключові слова: трубопровід, напружено-деформований стан, ремонт.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕМОНТИРУЕМОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

В. В. Николаев

УМГ «Черкаситрансгаз»

ул. Сумгайтская, 3, г. Черкаси, 18023, Украина. E-mail: nikolaev-vv@utg.ua

А. Ф. Иткин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kmto@mail.ru

Определены основные показатели надежности бесперебойной эксплуатации магистральных трубопроводов на этапе их эксплуатации. Приведена математическая модель напряженно-деформированного состояния ремонтируемого участка. Определено напряженно-деформированное состояние ремонтируемого участка трубопровода с целью разработки эффективной системы предупреждения отказов магистральных трубопроводов, как при проектировании и эксплуатации, так и при выборочном ремонте. Установлено, что изменение прямолинейного, ненагруженного изгибающими моментами расположения, приводит к изменению напряженно-деформированного состояния трубопровода. Предложены аналитические выражения для определения и контроля напряженно-деформированного состояния трубопровода в процессе проведения ремонтных работ. Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния участка трубопровода при выемке грунта и провисании трубопровода.

Ключевые слова: трубопровод, напряженно-деформированное состояние, ремонт.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В Україні функціонує більше 40 тис. кілометрів магістральних трубопроводів, призначених для транспортування нафти і газу. Багато з них відпрацювали чверть століття і більше. Під впливом внутрішнього навантаження від транспортованих по них продуктів, зовнішнього середовища і режиму експлуатації поступово знижується несуча здатність трубопроводів, що неминуче призводить до їх зношення і вимагає ремонту дефектних ділянок, які з'являються в процесі довготривалої експлуатації, заміни цих ділянок трубопроводів на нові.

В окремих випадках доводиться понижувати робочий тиск, який значно відрізняється від проектного, що, в свою чергу, призводить до зниження обсягів транспортування нафти чи газу.

Чималий вік трубопроводів об'єктивно пов'язаний зі збільшенням ризику аварій і відмов при експлуатації у разі відсутності ефективної системи їх попередження. Підвищення надійності трубопроводів тривалої експлуатації є актуальною проблемою на етапі їх експлуатації.

Вирішення цієї проблеми полягає в розробці ефективної системи попередження відмов магістральних трубопроводів, як при проектуванні та експлуатації, так і при вибіркового ремонту. Ремonti із зупинкою транспортування газу чи нафти, з випуском газу із ділянки в атмосферу чи видаленням нафти та очищенням трубопроводу, що підлягає ремонту, вирізанням та вварюванням технологічної котушки, – призводить до значних утрат газу чи нафти та невиконання плану транспортування, витрат на проведення самих вогневих робіт і т.п. [1]. Тому актуальними є методи ремонту без припинення транспорту продукту [2].

Статистичний аналіз аварій показав, що однією з причин зниження надійності сталевих трубопроводів є механічні пошкодження та корозія металу труб. Більша частина дефектів віддалена один від одного. Для їх усунення потрібен вибіркового ремонт.

У технологічний цикл ремонту лінійної частини магістрального трубопроводу включається створення ремонтного котловану. При проведенні земляних робіт із розкопки трубопроводу, на відкритій ділянці

трубопровід змінює своє проектне положення. Зміна прямолінійного, ненавантаженого згинаючими моментами розташування, призводить до зміни напружено-деформованого стану трубопроводу. Це пов'язано з тим, що при виїмці ґрунту він провисає. Зміна температурного поля, у свою чергу, призводить до появи додаткових осьових зусиль, що діють на трубопровід [3]. Крім того, змінюється податливість основи ґрунту на краях котловану.

СНіП 2.05.06–85 "Магістральні трубопроводи" не дає прямих вказівок чи методичних рекомендацій щодо визначення напружень у найбільш навантаженому перерізі трубопроводу з урахуванням зміни в часі несучої здатності ґрунту на ремонтній ділянці.

При цьому потрібна розробка математичних моделей та методів розрахунку напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу, що враховує вплив реологічних процесів ґрунтів. Це дозволить в більшому обсязі відображувати дійсні умови роботи та вирішувати проблеми прогнозування конструктивної надійності трубопровідної системи вже на стадії проектування.

Мета роботи – визначення напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу, що ремонтується.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Приводиться математична модель деформування ділянки трубопроводу на в'язкопружній основі з урахуванням повзучості ґрунтів і моментального напруженого стану трубопроводу на границях ремонтного котловану.

Рівняння повздовжньо-поперечного вигину довгомірної ділянки трубопроводу ($L/l > 3$) на в'язкопружній основі отримано з урахуванням розв'язку теорії повздовжньо-поперечного вигину балки на пружній основі та наведено у вигляді:

$$EI(x) \frac{d^4 w}{dx^4} - N(x) \frac{d^2 w}{dx^2} + a(x, t)w = q(x), \quad (1)$$

де w – прогин трубопроводу; $EI(x)$ – жорсткість трубопроводу на вигин; $N(x)$ – стискаюче повздовжнє зусилля від внутрішнього тиску; $q(x)$ – інтенсивність зовнішнього напруження; $a(x, t)w$ – реакція ґрунту в перерізі x трубопроводу в термін часу t .

При цьому на межах ділянки трубопроводу довжиною L (рис. 1) накладені граничні умови у вигляді переміщення δ_1, δ_2 та кутів повороту перерізів φ_1, φ_2 залежно від профілю траси.

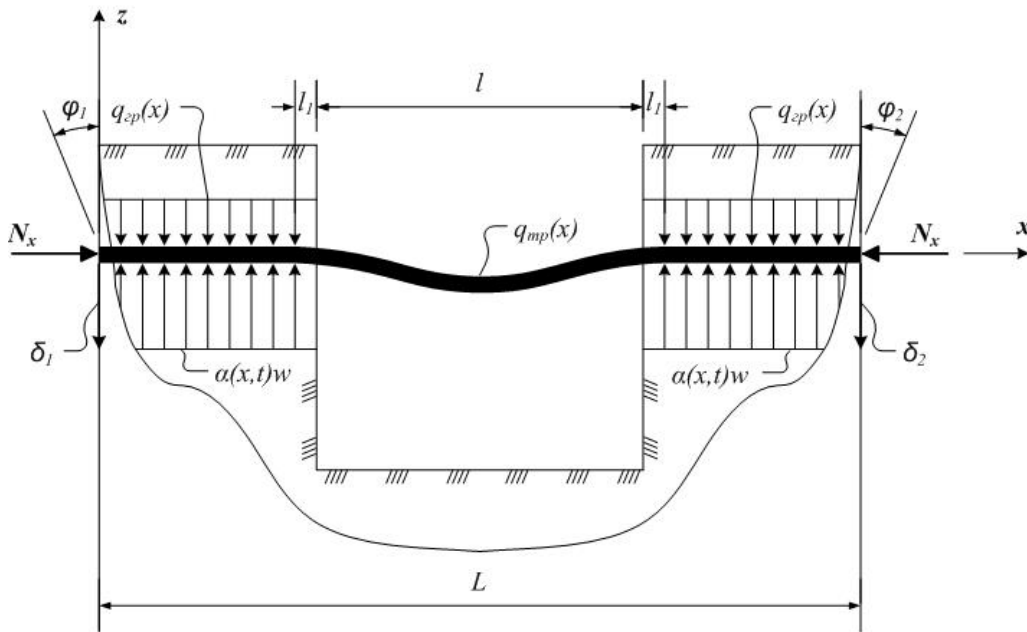


Рисунок 1 – Схема довгомірної ділянки трубопроводу на в'язкопружній основі: $q_{mp}(x)$ – власна вага трубопроводу; $q_{gp}(x)$ – власна вага ґрунту; $N(x)$ – повздовжня стискаюча сила; $a(x, t)w$ – реакція основи ґрунту; L – довжина ремонтної ділянки трубопроводу; l – довжина ремонтного котловану; l_1 – довжина ділянки врахування повзучості ґрунту; δ_1, δ_2 – зміщення та φ_1, φ_2 – кути повертання перетинів на межах довгомірної ділянки трубопроводу

Врахування повзучості ґрунтів на межах ремонтного котловану довжиною l_1 (рис.1) представлений теорією Л. Больцмана [4] і має вигляд інтегрального рівняння Вольтери другого роду:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{gp}} + \frac{1}{E_{gp}} \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де $\varepsilon(t)$ – деформація ґрунту по вертикалі (осідання); $\sigma(t)$ – контактні напруження; E_{gp} – модуль деформації ґрунту; t – момент часу спостереження; τ – передуючий моменту спостереження час; $K(t-\tau)$ – функція впливу повзучості.

З рівняння (1) отримали вираз для модуля деформації ґрунту у вигляді:

$$E_{zp}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{E_{zp,0}}{1 + \frac{1}{\sigma(t)} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau}, \quad (3)$$

де E_{zp0} – модуль деформації ґрунту в момент часу $t=0$; $\sigma(t)$ – контактні напруження.

Достатньо задовольняючою та необхідною умовою є слабо сингулярне ядро А.Р. Ржаніцина [5–7]:

$$K(t-\tau) = A \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot (t-\tau)^{\gamma-1}, \quad (4)$$

де A, γ, β – параметри ядра повзучості, які визначаються методом накладання експериментальної та теоретичної кривих повзучості.

Інтеграл виразу (3) з урахуванням (4) апроксимований функцією вигляду:

$$\int_{\tau}^1 K(t-\tau)d\tau = A \left[(\beta e)^{-\gamma} e^{\beta(t-\tau)} \Gamma(\gamma+1) - \gamma (\beta(e-\tau))^{-\gamma} e^{\beta(t-\tau)} \Gamma(\gamma\beta(t-\tau)) \right] / \gamma, \quad (5)$$

Чисельне розв’язання (3), (5) можливе тільки у випадку, якщо відомий закон зміни контактних напружень $\sigma(t)$ по поверхні конструкції в зоні контакту з ґрунтом.

Взаємодія трубопроводу з ґрунтом описується залежністю опору ґрунту q_{zp} від поперечного зміщення труби w в момент часу t :

$$q_{zp} = -d \cdot c(t) \cdot w, \text{ при } |w| \leq \frac{q_{np}}{d \cdot c(t)}, \quad (6)$$

де $c(t)$ – коефіцієнт нормального опору ґрунту; d – зовнішній діаметр труби.

Співвідношення (6) справедливе до тої пори, поки опір ґрунту менше його несучої здатності:

$$q_{zp} = q_{np}, \text{ при } |w| \geq \frac{q_{np}}{d \cdot c(t)}; \quad q_{np} = R_{zp} \cdot d. \quad (7)$$

Тут R_{zp} – умовна несуча здатність ґрунту.

Величина жорсткості ґрунту a залежить від коефіцієнту нормального опору ґрунту c та ширини поверхні, що опирається (зовнішнього діаметру трубопроводу d) у момент часу t розглянутого перетину трубопроводу x як:

$$a(t) = c(t) \cdot d, \quad (8)$$

Залежність коефіцієнту нормального опору ґрунту від його фізико-механічних властивостей та часу наведена у вигляді:

$$c(t) = \frac{0,12 E_{zp}(t) n}{\left(1 - (v_{zp})^2\right) \sqrt{l_0 d}}, \quad (9)$$

де $E_{zp}(t)$ – модуль деформації ґрунту неруйнівної структури; n – коефіцієнт зниження модуля деформації ґрунту засипання порівняно з ґрунтом неруйнівної структури; v_{zp} – коефіцієнт Пуассона ґрунту; l_0 – одинична довжина трубопроводу ($l_0=1m$); d – зовнішній діаметр труби.

Залежно від навантажень, впливів і відносної жорсткості трубопроводу на всій глибині дільниці ґрунт здійснює тільки в стадії, яка характеризується умовою (6).

Розрахунок балки на в’язкопружній основі визначає тільки повздовжні напруження. Насправді при дії внутрішнього тиску в трубі виникають, як осеві (повздовжні), так і окружні (кільцеві) напруження. Тому розрахунок НДС при вигині вісесиметричної циліндричної оболонки здійснюється за безмоментною теорією. Для контролю вісесиметричного деформування трубопроводу на краях ремонтного котловану (рис. 1) застосували напівбезмоментну теорію оболонок, яка дозволяє визначити додатково виникаючі кільцеві напруження від дії ґрунту. Зміна реакції ґрунту у часі відповідає $a(x,t)w$ диференційного рівняння балки на в’язкопружній основі (1).

Диференціальне рівняння рівноваги тонкостінної циліндричної оболонки записані в зміщеннях у циліндричній системі координат:

$$\frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} \right) + B_{11} \left(W + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - p_z r = 0;$$

$$B_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} r + B_{33} \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial \varphi} \right) + p_x r = 0; \quad (10)$$

$$\frac{B_{11}}{r} \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + B_{33} r \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi \partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) -$$

$$- \frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^3 W}{\partial \varphi^2} \right) + p_s r = 0,$$

де W, U, V – відповідно радіальне, вісьове та кільцеве зміщення середньої поверхні циліндричної оболонки; B_{11}, B_{33} – величини інтегральних характеристик жорсткості; D – циліндрична жорсткість; p_z, p_x, p_s – відповідно радіальна, вісьова та окружна складова напруження.

Граничні умови для жорсткого затискання:

- геометричні умови $W=0, U=0, V=0$;
- статичні умови $M=0, N=0$.

Граничний стан надземної ділянки напірного трубопроводу відповідає умові рівноваги максимальних повздовжніх напружень межі текучості металу. Несуча здатність трубопроводу (результуючі напруження) визначиться за енергетичною теорією.

Далі надається обґрунтування достовірності отриманих результатів [8, 9] із розрахунку довгомірної ділянки трубопроводу на пружній основі шляхом порівняння результатів розрахунку методом кінцевих різниць з результатами рішень аналітичним способом. Для цього загальна задача розділилася на декілька окремих задач, маючих точне рішення:

- а) деформація довгомірної ділянки трубопроводу тільки під впливом поперечної дії;
- б) деформація довгомірної ділянки під впливом повздовжнього напруження;

в) деформація довгомірної ділянки трубопроводу, який лежить на пружній основі, під впливом поперечної дії.

Розрахунки за окремими текстовими задачами показують, що розходження по вишукуваній функції прогину w не перевищує 1,5 %, якщо кількість вузлів методу кінцевих різниць більше 80.

Для обґрунтування внутрішнього сходження результатів розрахунку напружено-деформованого стану циліндричної оболонки за напівбезмоментною теорією виконаний тестовий розрахунок прямокутної пластини методом кінцевих різниць. Розрахунок похибок виконаний по середній точці для величини прогину та моментів на вигин, по середній крайній точці для величини перетинаючої сил перетину. Результати розрахунку показують, що при кількості вузлів більше 90 відносні похибки склали не більше 2 %.

Достовірність результатів розрахунку напружень σ_s в окружному напрямку обґрунтовувалась порівнянням із результатом розрахунку σ_s по теорії безмоментного напруженого стану (рішення Лапласа). При розрахунку кінцевих різниць похибка обчислення складала 1 % при кількості більше 100 вузлів методу кінцевих різниць.

Алгоритм розв'язання задачі деформування в часі відпрацьовувався на тестовій задачі вигину круглої пластини під впливом сконцентрованої сили в центральній точці. Результати оцінювалися порівняно з вирішенням методом апроксимацій А.А. Ільюшина. Максимальне відхилення в досліджуваному інтервалі часу $(t-\tau)$ – 0,3 міс. не перевищує 3,5 %. Також виконаний порівняльний аналіз з аналітичним розв'язанням диференційного рівняння (1) без урахування стискуючої сили способом функцій Крилова. Розходження за вишукуваною функцією вигину складало 3 %.

Розглянемо розрахунок НДС трубопроводу довжиною $L=50$ м, прогоном $l=10$ м.

Модуль деформації ґрунту $E_{ep}=800$ МПа; коефіцієнт Пуассона ґрунту $\nu_{ep}=0,4$; параметри ядра пов-

зучості ґрунту $\gamma=0,1456$ 1/год.; $A=3,2949$ 1/год.; $\beta=0,1440$ та коефіцієнт опору ґрунту $c=0,11316$ МПа/мм. Трубопровід зовнішнього діаметру $d=1020$ мм і товщиною стінки $h=12$ мм, $p=3$ МПа, межа міцності матеріалу труби $\sigma_{ep}=600$ МПа, межа текучості $\sigma_m=420$ МПа, модуль пружності $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $\nu=0,3$.

Дослідження змін НДС у часі (рис. 2 і 3) доводить, що для надземної ділянки трубопроводу прогин посередині прогону в момент часу $t=1440$ год збільшився на 172 %, напруження вигину від поперечної дії – на 82 % порівняно з пружним розв'язанням ($t=0$ год).

Результати розрахунку циліндричної оболонки від дії максимального значення реакції ґрунту відображені в табл. 1.

Таблиця 1 – Змінення прогину та напружень оболонки в часі

Показники	Термін часу t , год.	
	0,17	1440
Прогин W , мм	-0,0206	-0,0239
Вісьові напруження σ_x , МПа	-8,153	-9,470
Окружні напруження σ_s , МПа	-0,143	-0,143

На рис. 4, 5 відображені результуючі прогини та напруження. При $x=l/2$ (рис. 2) та $t=1440$ год – $W_r(x,t)=4,15$ мм; $\sigma_r(x,t)=208$ МПа.

Збільшення розміру l_1 реологічних процесів на краях ремонтного котловану (рис. 1) призводить до збільшення прогину довгомірної ділянки трубопроводу (табл. 2). Виконаний комплексний розрахунок трубопроводу довжиною $L=100$ м, прогоном $l=32$ м. Модулі деформації ґрунтів $E_{ep1}=E_{ep2}=2000$ МПа, коефіцієнти Пуассона ґрунтів $\nu_{ep1}=\nu_{ep2}=0,4$.

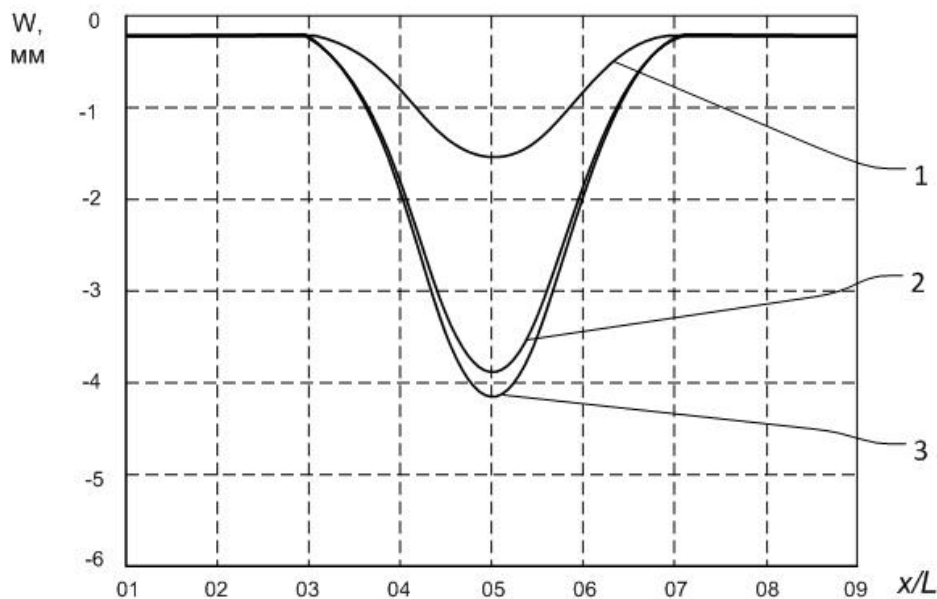


Рисунок 2 – Графік зміни прогину w трубопроводу: 1 – термін часу $t=0$ год; 2 – $t=7$ год; 3 – $t=1440$ год

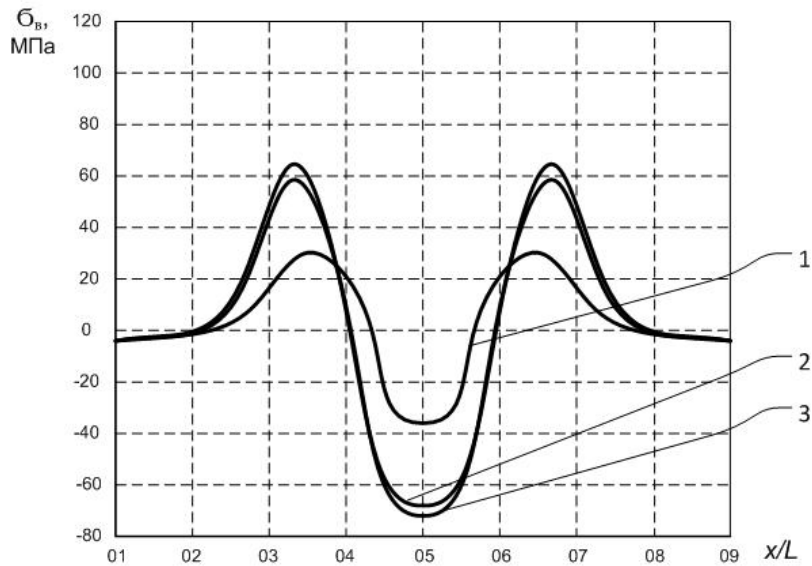


Рисунок 3 – Графік зміни повздовжніх напружень вигину σ_b :
1 – термін часу $t = 0$ год; 2 – $t = 7$ год; 3 – $t = 1440$ год

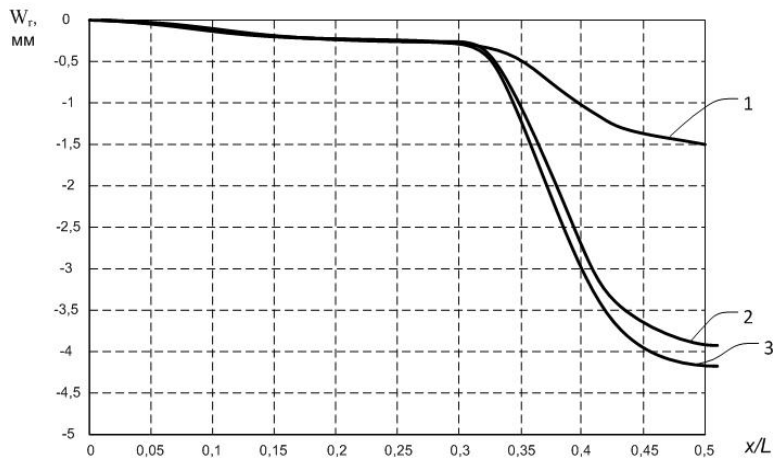


Рисунок 4 – Графік зміни результуючих прогинів W_r : 1 – термін часу $t = 0$ год; 2 – $t = 7$ год; 3 – $t = 1440$ год

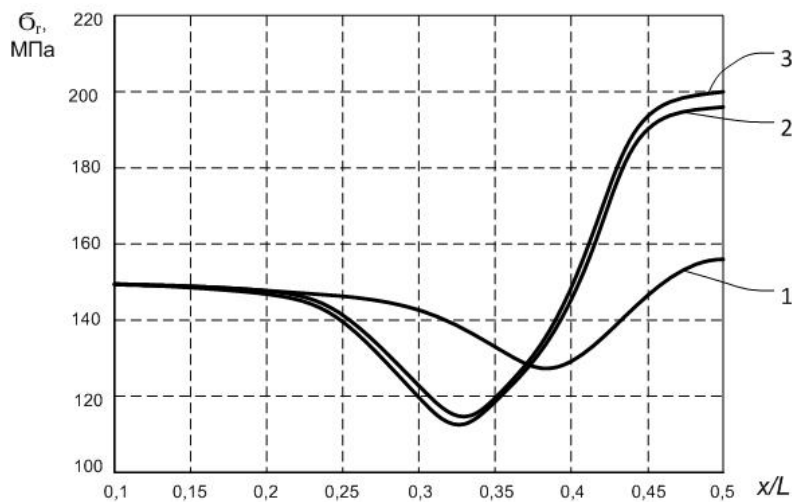


Рисунок 5 – Графік зміни результуючих напружень σ_r :
1 – термін часу $t = 0$ год; 2 – $t = 7$ год; 3 – $t = 1440$ год

Розрахункові коефіцієнти нормального опору ґрунтів $c_1 = c_2 = 0,11316$ МПа/мм в момент часу $t = 0$ год, розрахункові параметри ядер повзучості ґрунтів

$\gamma_1 = 0,1477$ 1/год; $A_1 = 9,4500$ 1/год; $\beta_1 = 0,1472$ та $\gamma_2 = 0,1475$ 1/год; $A_2 = 9,8866$ 1/год; $\beta_2 = 0,1475$. Трубопровід виконаний із труб $d = 1420$ мм та $h = 16,5$ мм,

маючих межу міцності $\sigma_{gp} = 600$ МПа, межу текучості $\sigma_T = 470$ МПа, модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Трубопровід відповідає III категорії. Інтенсивність розрахункових вертикальних напружень $q_{mp} = 10$ н/мм та $q_{ep} = 20$ н/мм. Рабо-

чий тиск у трубопроводі $P = 7,5$ МПа. Розрахункове кільцеве напруження $\sigma_{кц} = 346,8$ МПа.

На рис. 6 наведена залежність прогину трубопроводу від часу для двох ґрунтів із незначною різницею за реологічними властивостями.

Таблиця 2 – Змінення прогину посередині прогону трубопроводу ($x = l/2$) при різних значеннях l_1 (рис. 2): $l_{11} = 2$ м; $l_{12} = 4$ м; $l_{13} = 5$ м

Прогин, мм	Термін часу t , год.						
	0	0,17	4	24	240	720	1440
W_{11}	-1,525	-3,727	-3,846	-3,994	-4,064	-4,112	-4,130
W_{12}	-1,525	-6,282	-6,778	-7,640	-8,012	-8,400	-8,544
W_{13}	-1,525	-7,228	-8,034	-9,392	-10,019	-10,744	-11,026

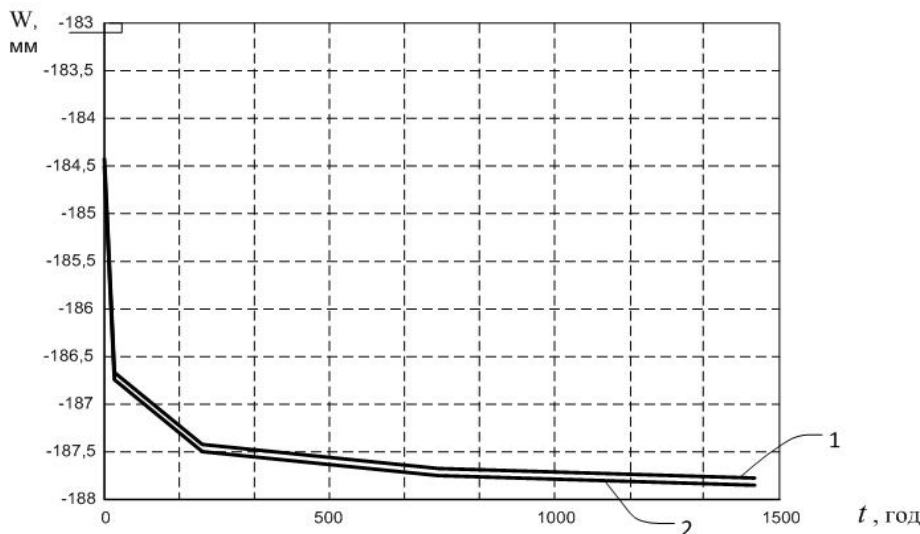


Рисунок 6 – Деформування трубопроводу в часі ($x = l/2$):

1 – ґрунт ($\gamma_1 = 0,1477$ 1/год; $A_1 = 9,4500$ 1/год; $\beta_1 = 0,1472$); 2 – ґрунт ($\gamma_2 = 0,1475$ 1/год; $A_1 = 9,8866$ 1/год; $\beta_1 = 0,1475$)

У момент часу $t = 0$ год максимальний прогин посередині прогону $w = 12,4$ мм, а за терміном часу 1440 год – $w_1 = 18,8$ мм та $w_2 = 18,9$ мм.

Дослідження змінення НДС ремонтної ділянки трубопроводу в часі показує, що для надземної ділянки трубопроводу прогин посередині прогону з врахуванням реологічних процесів ґрунтів у момент часу $t = 1440$ год (60 діб) збільшився на 52 % порівняно з пружним розв'язанням ($t = 0$ год), а напруження вигину від поперечної дії збільшилось на 12 %. Максимальні повздовжні вісьові результуючі напруження склали 198 МПа при розрахунковому опорі матеріалу труби $R_2 = 274,7$ МПа.

Значення результуючих величин максимальних прогинів і напружень (при $x = l/2$ та $t = 1440$ год) склали: $W_r(x, t) = 19$ мм; $\sigma_r(x, t) = 472$ МПа.

ВИСНОВКИ. Математична модель деформування ремонтної ділянки трубопроводу на в'язкопружній основі дозволила оцінити рівень напружень та несучу здатність ремонтної ділянки трубопроводу в часі.

Урахування повзучості ґрунтів дозволило виконати аналіз змінення напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу: сталося збільшення прогину посередині прогону для першого та другого

розрахунків відповідно на 52 і 172 %, розрахункових повздовжніх напружень – на 12 і 82 % порівняно з пружним рішенням.

Дослідження впливу моментного напруженого стану тонкостінної циліндричної оболонки з позиції напівбезмоментної теорії при змінному коефіцієнті постелі ґрунту в часі на НДС ремонтної ділянки трубопроводу показало: збільшення прогину циліндричної оболонки склало 22 %, результуючих напружень – 23 % порівняно з розв'язанням за теорією стріжня на в'язкопружній основі.

Аналіз напружено-деформованого стану ремонтної ділянки виконаний з урахуванням зміни ореолу (l_1) реологічних процесів ґрунтів. Розрахунок трубопроводу (довжина $L = 50$ м, прогоном $l = 10$ м, зовнішній діаметр $d = 1020$ мм, товщина стінки $h = 12$ мм, довжина $l_1 = 2$ м, внутрішній тиск $P = 3$ МПа) показує, що збільшення ореолу реології ґрунту (l_2) до 4 м допустимо. Подальше збільшення значення до l_3 призведе порушення умов експлуатації трубопроводу.

Прогнозування деформування ремонтної ділянки трубопроводу (довжина $L = 100$ м, прогоном $l = 32$ м, зовнішній діаметр $d = 1420$ мм, товщина стінки $h = 16,5$ мм, довжина $l_1 = 2$ м, внутрішній тиск $P = 7$ МПа) з урахуванням реології ґрунтів (параметри повзучості ґрунту: $\gamma_2 = 0,1475$ 1/год; $A_1 = 9,8866$ 1/год;

$\beta_I=0,1475$) показало, що при проходженні 60 діб збільшення рівня напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу знаходиться в допустимих межах. Подальше збільшення ореолу реології ґрунту до l_2 , l_3 у вказаний період часу призводить до порушення нормативних умов експлуатації даної ділянки трубопроводу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблеми міцності трубопровідного транспорту / Ю.Є. Якубовський, Н.А. Малюшін, С.В. Якубовська, О.М. Платонов. – Санкт-Петербург: Надра, 2003. – 200 с.

2. Математична модель формоутворення захисного покриття на поверхні магістрального трубопроводу / Ю.М. Дьомін, М.І. Назаренко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 3/2011(68), част. 1. – С. 90–92.

3. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації / В.С. Буг, О.І.

Олейник, С.В. Макимов (ІЕЗ ім. Є.О. Патона) // ГБН В.3.1–00013741–12:2011 – С. 40–48.

4. Аналіз математичних моделей / В.О. Галкін. Москва: Бинум. Лабораторія знань, 2011. – С. 82–86.

5. Мусхелишвили, Н.І. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: ЕЕ Медиа, 2012. – С. 708.

6. Мусхелишвили, Н.І. Сингулярные интегральные уравнения. – М.: ЕЕ Медиа, 2010. – С. 512.

7. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. – М.: Янус, 1995. – 520 с.

8. Решение задачи надежности элементов конструкции при внешнем случайном кинематическом воздействии / И.В. Мищенко, С.А. Вамболь // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (85). – С. 138–144.

9. Математические задачи обработки эксперимента / В.Я. Галкин, П.Н. Заикин. – М.: МГУ, 1984. – 232 с.

DETERMINATION OF THE DEFORMATION STATE OF A PIPELINE AREA UNDER REPAIR

V. Nikolayev

Gas Mains Administration (GMA) «Cherkasitransgaz»

vul. Sumgaitkaya, 3, Cherkasy, 18023, Ukraine. E-mail: nikolaev-vv@utg.ua

A. Ytkyn

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto@mail.ru

The main reliability indicators of uninterrupted operation of the pipelines during their operation are identified. The mathematical model of the deformation state of the pipeline area being repaired is provided. The stress-strain state of the pipeline under repair is defined with aim to develop an effective system of the mail pipelines failure prevention, both when in design and operation or partial repair. It was identified that the alteration of straight, non-bending unloaded tube location leads to change in the deformation state of the pipeline. The analytical expressions for the determination and control of the deformation state of the pipeline during repairs are provided. A method for calculating the stress-strain state of the pipeline when its excavation or sagging is offered.

Key words: pipeline, the stress-strain state, repair.

REFERENCES

1. Yakubovskiy, Yu.E., Maliushin, N.A., Yakubovska, S.V., and Platonov, O.M. (2003), *Problemy mitsnosti truboprovodnogo transport* [Pipelines strength problems], Nadra, Saint Petersburg, Russia.

2. Diomin, Yu.M., Nazarenko, M.I. (2011), “Mathematical model of protective coating forming on the surface of the pipeline”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 3, no. 68, part 1, pp. 90–92.

3. But, V.S., Oleinyk, O.I., and Makymov, S.V. (2011), “Trunk pipelines. Arc welding repair while operation mode”, *E.O. Paton Electric Welding Institute, Industry-Specific Building Standards B.3.1–00013741–12:2011*, pp. 40–48.

4. Galkin, V.O. (2011), *Analiz matematychnykh modelei* [Mathematical models analysis], Binom. Laboratoria Znan, Moscow, Russia.

5. Muskhelishvili, N.I. (2012), *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti* [Basic Tasks

of mathematical theory of elasticity], YoYo Media, Moscow, Russia.

6. Muskhelishvili, N.I. (2010), *Singuliarnye integralnye uravnenia* [Singular integral equations], YoYo Media, Moscow, Russia.

7. Lifanov, I.K. (1995), *Metod singuliarnykh integralnykh uravneniy i chislennyi eksperiment* [Method of singular equations and numerical experiment], Yanus, Moscow, Russia.

8. Mishchenko, I.V. and Vambol, S.A. (2014), “Reliability prediction problem solution for structural elements”, *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 2, no. 85, pp. 138–144.

9. Galkin, V.Ya. and Zaikin, P.N. (1984), *Matematicheskie zadachi obrabotki eksperimenta* [Mathematical problems of experiment processing], Moscow State University, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 26.05.2014.