

Техніка і технології

УДК 539.4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОТЯГУВАННЯ ТРУБИ ЧЕРЕЗ ТРУБОПРОВІД БІЛЬШОГО ДІАМЕТРА

І.В.Ориняк¹, В.М.Василюк², А.В.Богдан¹, М.В.Стецьків²

¹Інститут проблем міцності, вул.Тімірязєвська, 2, м.Київ, 01014, Україна, or@ipp.kiev.ua

²ВАТ “Укртранснафта”, вул. Артема, 60, м.Київ, 04050, Україна, office@ukrtransnafta.com

Построена численна модель для расчета усилий протягивания и определения контактных усилий взаимодействия опорных колец на внутреннем трубопроводе с трубопроводом большего диаметра. Модель учитывает сложный геометрический профиль внешней трубы, возможность неконтакта колец, вес внутреннего трубопровода и действие выталкивающей силы, продольную и поперечную (от провиса) силы от троса, податливость системы труба-кольцо и т.п.. Результаты расчета использовались при определении интервала расстановки колец и выборе их размеров (высоты). Отмечена возможность возникновения эффекта натянутой струны, если увеличение коэффициента трения приводит к нелинейно нарастающему увеличению усилия протягивания.

The numerical modeling of the broaching process of the less diameter pipe section through the pipeline of the bigger inner diameter. It consists in the calculation of the required outer pulling force applied to inner pipe section and the distributed contact forces of the support rings with the wall of bigger pipe. The model takes into account the complex vertical profile of the outer pipeline, the possibility of loss of contact in the rings, the weight of inner pipe, the upward buoyancy force when part of outer pipe is filled with water, the mutual compliances between the rings and outer pipe wall and so on. The results of calculation were used for the decision making about the interval between the rings, about their height and construction of head part of the inner pipe. Some geometrically nonlinear effects were investigated and their role in nonlinear increasing of broaching force with increase of friction coefficient was demonstrated.

1 Постановка задачі

В процесі експлуатації метал магістральних трубопроводів старіє, втрачає необхідні властивості, а також в ньому виникають різного роду дефекти. Ділянки, що вичерпали свій ресурс, підлягають ремонту або повній заміні. Проте для підводних переходів процес повної заміни є надзвичайно ресурсоємким. Одним з відносно дешевих способів їх ремонту є протягування через існуючий трубопровід трубопроводу меншого діаметра (дюкер). Окрім загального економічного вигаду, при цьому отримуємо ще й додатковий захист трубопроводу зовнішньою трубою (кожухом).

Схема процесу протягування подана на рис.1. На дюкері закріплюють опорно-направляючі кільця (ОНК), розташовані з певним інтервалом (не обов'язково однаковим), дюкер тягнуть за допомогою троса, який при-

кріпленого до лебідки. Очевидно, що зусилля протяжки, в основному, залежать від ваги труби та коефіцієнта тертя системи “ОНК-кожух”. Тому для зменшення тягового зусилля протяжки кожух частково заповнюють рідиною. Існують й інші фактори, що впливають на процес протягування: питома вага та жорсткість трубопроводу, відстані між кожухом та дюкером, податливість контактної зони, геометрія кожуха, інтервал розстановки ОНК і т.ін.

Необхідно відзначити, що теорія і практичні методики розрахунку для такого виду ремонту магістральних трубопроводів не розроблені. При виконанні робіт здебільшого спираються на досвід та інтуїцію. Проте для більш успішного планування і проектування робіт було б корисним вирішити такі питання:

визначення максимальної сили натягу троса, яка необхідна для протягування усього дюкера;

- розрахунок максимальних поперечних зусиль на ОНК.

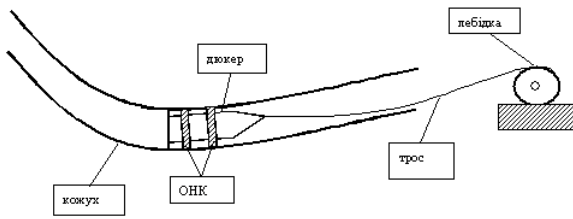


Рисунок 1 - Схема протягування

Це дасть можливість правильно вибрати такі елементи системи протягування як лебідка, трос, ОНК та оголовок дюкера; оптимізувати їх конструктивні особливості з метою мінімізації зусиль протягування та поперечних навантажень на ОНК.

Мета дослідження полягає в розробці алгоритму для створення комп'ютерної моделі даного процесу та аналіз з її допомогою впливу вказаних вище факторів.

Перш ніж описати модель процесу протягування, розглянемо допоміжні задачі. Деякі результати будуть наведені для реального процесу, що моделювався. Він характеризується такими параметрами: внутрішній діаметр дюкера $D = 1,2 м$; зовнішній діаметр дюкера $d = 0,72 м$; товщина його стінки $t = 0,016 м$; густина металу внутрішньої труби

$$\rho_{тр} = 7800 \frac{кг}{м^3}$$

2 Допоміжні задачі

2.1 Виштовхувальна сила рідини

Прийmemo від'ємний знак в напрямку дії сили виштовхування. Тоді власна погонна вага труби

$$P_1 = m_0 g = \frac{\pi}{4} (d^2 - (d - 2t)^2) \rho_{тр} g = 2983 Н$$

Вага повністю зануреної труби складає $P_2 = m_0 g - \rho g \pi r^2 = -1005 Н$. В проміжній зоні вага погонного метра труби, P , обчислюється за формулою

$$P = m_0 g - \rho g V, \quad (1)$$

де V - об'єм витісненої рідини.

Обчисливши V залежно від висоти рівня рідини, будемо мати

$$P = m_0 g - \rho g \left[r^2 \arccos\left(\frac{r - h_i}{r}\right) - (r - h_i) \sqrt{2rh_i - h_i^2} \right], \quad (2)$$

де: R - радіус дюкера; m_0 - маса труби; h_i - рівень рідини, відраховується від нижньої стінки дюкера ($0 < h_i < 2r$).

2.2 Взаємодія троса та оголовка дюкера

Трос біля точки закріплення з оголовком буде провисати, і лише через деяку відстань l він лягає на зовнішню трубу. Зрозуміло, що трос підходить до оголовка під деяким кутом, а це означає, що, крім поздовжнього зусилля, він передає дюкеру ще й поперечне, яке може призвести до негативних наслідків, проте на практиці часто не враховується. Особливо це стосується випадку, коли перші ОНК розташовані на певній відстані від точки кріплення, що призводить до виникнення згинального моменту відносно цих ОНК і як результат до додаткового збільшення поперечних зусиль на ці ОНК.

Оскільки тяговий трос є ланцюгом, що має певну вагу, його прогин при малих кутах описується згідно з [1] параболічною залежністю

$$y = \left(\frac{h_1}{l} + \frac{ql}{2N} \right) x - \frac{qx^2}{2N}, \quad (3)$$

де: h - різниця рівнів підвісу троса; l - довжина прольоту троса; q - вага погонного метра троса; N - сила натягу троса. Оскільки $y'(l) = 0$ (рис.2), то

$$l = \sqrt{\frac{2Nh_1}{q}}. \quad (4)$$

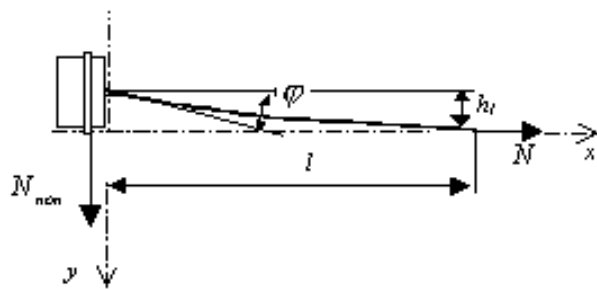


Рисунок 2 - Розрахунок навантажень на першій ОНК

Продиференціювавши (3), з врахуванням (4), знайдемо кут у точці підвісу

$$\varphi = \arctg\left(\frac{h_1}{l} + \frac{ql}{2N}\right) \approx \sqrt{\frac{2qh_1}{N}} \text{ рад}. \quad (5)$$

Отримане значення кута в точці підвісу слід враховувати для розрахунку додаткового поперечного зусилля, що передається на оголовок,

$$\Delta p_1 = N \cdot \sin(\varphi - \varphi_{труби}). \quad (6)$$

Зокрема, якщо труба розміщена горизонтально ($\varphi_{труби} = 0$), то $\Delta p_1 \approx \sqrt{2qh_1 N}$. Тоді, наприклад, якщо тягове зусилля $N = 80 тс$, $q = 16 кг$, $h = \frac{d}{2} + l_o = 0,46 м$ ($l_o = 0,1 м$ - висота ОНК), то $\varphi \approx 0,0136 \text{ рад}$ і $\Delta p_1 \approx 1085 кгс$.

2.3 Профіль зовнішньої труби

Профіль ділянки задається системою дискретних точок $A_k(x_k, y_k)$, $k = \overline{1, n}$, що беруться з проектної документації чи з результатів замірів, але, зрозуміло, що ці дані містять похибку, яка в окремих випадках може призвести до надзвичайно неточних подальших розрахунків. Для ілюстрації розглянемо приклад.

Маємо ідеально рівний горизонтальний реальний профіль трубопроводу. Очевидно, що тоді згинальний момент та перерізуюча сила дорівнюють нулю. Нехай виміри профілю були проведені через деякий інтервал $L(m)$ з певною похибкою, причому похибка здійснювалась по чергово вниз і вгору на $A(mm)$ від реального профілю в кожній точці вимірювання. Зрозуміло, що отримані точки прямими лініями з'єднувати не можна, адже профіль пружної лінії трубопроводу повинен задаватись гладкою кривою, неперервною аж до 4-ї похідної включно. Видається очевидним, що отримані дані можна апроксимувати співвідношенням

$w = A \cos \frac{\pi x}{L}$. Таким чином, отримаємо напружену трубу зі згинальним моментом

$M = w''EI = -\frac{A\pi^2}{L^2}EI \cos \frac{\pi x}{L}$ і напруженням

$\sigma = w''ER = \frac{A\pi^2}{2L^2}Ed \cos \frac{\pi x}{L}$. Наприклад, коли

$L = 1m$, $A =$ напруження σ складає $1000MPa$. Очевидно, що зменшення інтервалу вимірювань призводить до збільшення неіснуючих розрахункових напружень.

Отже, формальне знаходження неперервної кривої, що проходить через задані точки, веде до принципових неточностей. Один із можливих шляхів побудови геометрії зовнішньої труби полягає в апіорному визначенні точності вимірювань (тобто в заданні дисперсії вимірювань) і проведенні такої математичної кривої шляхом мінімізації функціонала похибок, щоб дисперсія відхилень реальних точок від заданої кривої дорівнювала заданій дисперсії. Другий, більш ефективний шлях, на нашу думку, полягає в тому, щоб вважати, що результати вимірювань дають не точки труби, а точки земляної траншеї, в яку вкладається зовнішня труба. Тоді геометрія труби визначається на основі числової процедури, розробленої нами раніше [2], яка враховує реальні характеристики пружно-пластичної взаємодії труби та ґрунту. На рис.3 наведено приклад застосування такої процедури для ділянки 580-840м підводного переходу р.Псел. Тут по осі ординат відкладені вертикальні координати точок профілю "траншеї" та труби, задані в метрах. Зауважимо, що максимальне відхилення труби від траншеї становить до 8см. Алгоритм процедури в рамках даної статті обговорюватись не буде, проте зазначимо, що існує певна подібність рівнянь і алгоритмів, наведених нижче, з тими, що використовувались в процедурі.

2.4 Розрахунок контактної податливості системи "ОНК-кожух"

ОНК являють собою пояс, на поверхні якого розміщені запаєні трубки по чотири в одному поздовжньому ряду (рис.4). ОНК виготовлені з полімерного матеріалу. При їх взаємодії з кожухом виникають взаємні переміщення. Для

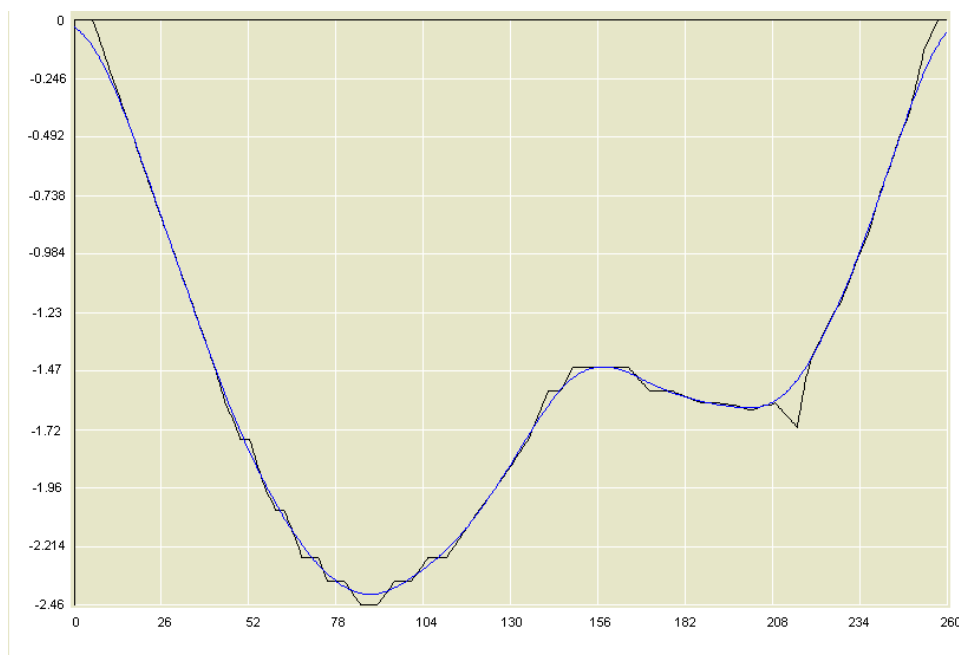


Рисунок 3 - Фрагмент результату апроксимаційної процедури: ламана лінія - профіль траншеї, гладка крива - профіль труби

їх врахування введемо поняття взаємної податливості, яка може бути представлена як сума власних податливостей ОНК та кожуха. Як відомо, $w = C \cdot P$, де w – переміщення, C – податливість, P – сила. Вважаючи, що в поздовжній контакт одночасно вступають чотири трубки (1 ряд трубок), податливість ОНК знаходимо за формулою

$$C_1 = \frac{l_o}{4FE_o} = \frac{l_o}{4\pi d_o t_o E_o}, \quad (7)$$

де: d_o діаметр трубки, t_o - товщина трубки, а l_o - її довжина. Розглядаючи дію зосередженої сили на кожух, податливість стінок кожуха згідно з [3] визначається виразом

$$C_2 = \frac{0,802}{4} \left[3(1-\nu^2)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{D}{2t_k} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \frac{1}{\pi E t_k}, \quad (8)$$

де t_k - товщина стінки кожуха. Тоді податливість системи “ОНК-кожух” $C = C_1 + C_2$. Використовуючи реальні характеристики труби (зовнішній діаметр кожуха $D = 1,02 м$, товщина стінки кожуха $t_k = 0,016 м$, $E = 2 \cdot 10^5 МПа$) і ОНК ($t = 0,003 м$, зовнішній діаметр $d_o = 0,03 м$, довжина $l_o = 0,09 м$, $E_o = 1,5 \cdot 10^3 МПа$), отримаємо, що $C \approx 6 \cdot 10^{-8}$, причому податливість кілець в 4 рази більша за податливість кожуха.

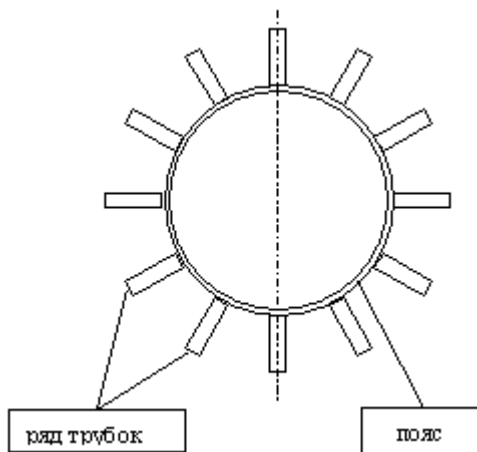


Рисунок 4 - Схема ОНК

3 Математична модель

3.1 Основні геометричні та фізичні співвідношення

Вважаємо, що дюкер містить K ОНК, які розбивають його на $K + 1$ відрізків. Основними параметрами при розв’язанні даної задачі є переміщення поперечне w та поздовжнє u ; кут нахилу труби θ ; згинальний момент M ; Q , N – поперечна та поздовжня сили відповідно; ра-

діус кривизни R . Диференціальні співвідношення між ними, записані для k -го відрізка трубопроводу, мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dQ(s)}{ds} = -\frac{N(s)}{R(s)} + P(s)\cos\theta(s) + p_k\delta(s-s_k), \\ \frac{dN(s)}{ds} = \frac{Q(s)}{R(s)} + P(s)\sin\theta(s) + p_k k_{mp}\delta(s-s_k), \\ \frac{dM(s)}{ds} = Q(s), \\ \frac{1}{R(s)} = \frac{d\theta(s)}{ds} = \frac{M(s)}{EI}, \\ \frac{dw(s)}{ds} = \frac{u(s)}{R(s)} + (l+1)\sin\theta(s), \\ \frac{du(s)}{ds} = -\frac{w(s)}{R(s)} + (l+1)\cos\theta(s), \end{cases} \quad (9)$$

де: $l = -\frac{N(s)}{EF} + \alpha \cdot \Delta T$ – відносне видовження елементарного участка; $\delta(s-s_k)$ – δ -функція Дірака; α – коефіцієнт температурного розширення; ΔT – зміна температури; s_k – координата k -ої опори(ОНК); k_{mp} – коефіцієнт тертя системи “ОНК-кожух”. Систему рівнянь (9) доповнюють умови контакту, що використовуються для визначення поперечних контактних зусиль p_k ;

$$\begin{cases} w(s) = Cp_k + w_0(s), \text{ якщо нижній контакт, } i & p_k > 0 \\ w(s) - h = Cp_k + w_0(s), \text{ якщо верхній контакт, } & p_k < 0 \\ p_k = 0, \text{ якщо точка безконтактна,} & \end{cases} \quad (10)$$

де: h – максимальне поперечне зміщення осі дюкера відносно осі кожуха; $w_0(s)$ - положення кожуха.

Бачимо, що дана задача є геометрично не-лінійною з тристоронніми умовами контакту. При розв’язанні задач такого типу надзвичайно важливим є вибір алгоритму числового інтегрування.

3.2 Алгоритм розв’язку

Числова процедура полягає в інтегруванні системи диференціальних рівнянь (9) та послідовного ітераційного процесу. Під час кожної ітерації виконуються такі кроки:

- початково вважаємо, що всі точки ОНК є точками нижнього контакту;
- будується система лінійних рівнянь, яка пов’язує всі вказані вище розрахункові параметри першого та останнього ОНК;
- знаходять розрахункові параметри на кожному ОНК;
- уточнюються значення отриманих параметрів:
 - якщо точка була точкою нижнього контакту, а ми отримали, що $p_i < 0$ або точка була точкою верхнього контакту, а ми отримали, що

$p_i > 0$, то це означає, що точка не є контактною;

- якщо точка була точкою верхнього контакту і на попередньому наближенні вона була звільнена для руху вниз, а тепер виявилось, що вона повинна рухатись назад угору або точка була точкою нижнього контакту і на попередньому наближенні вона була звільнена для руху вгору, а тепер виявилось, що вона повинна рухатись назад вниз, то таку точку одразу вводимо у відповідний контакт;

- для всіх інших точок виконуємо процедуру "поправок" переміщень. При цьому враховуємо, що кожна точка може за одне наближення зміститись на відстань не більше $\frac{h}{5}$, де h – люфт, дозволений для дюкера. Враховуючи ці обмеження, знаходимо спільний коефіцієнт руху і робимо відповідні поправки;

д) коректування тягового зусилля: на початку ітераційного процесу вхідним є певне значення тягового зусилля. На кожному кроці воно уточнюється, виходячи з міркувань, що на кінці дюкера при правильному виборі значення тягового зусилля маємо отримати нульове значення;

е) коректування геометрії і довжини елементарної ділянки.

Ітераційний процес продовжується до тих пір, поки поточні переміщення не будуть знехтувані малими порівняно з початковими і на кінці дюкера тягове зусилля буде рівне нулю.

3.3 Модельні задачі

Розгляд модельних задач покликаний вирішити такі питання:

а) перевірка коректності розрахункової процедури, основні труднощі реалізації якої пов'язані з геометричною нелінійністю та умовами контактності;

б) дослідження деяких ідеалізованих проблем, які можуть мати місце в реальних процесах.

а) з метою перевірки алгоритму врахування умов контактності результати, отримані за допомогою розробленого алгоритму, зіставлялися з результатами, отриманими з використанням програмного комплексу "PIPEMASTER" [4]. Для тестування брали прямий профіль кожуха і задавали певним чином початкове поперечне розподілене навантаження. Після проведення ітераційного процесу отримали кінцевий розподіл поперечних навантажень на ОНК, а також властивість контактності (верхній контакт, нижній контакт або відсутність контакту з стінкою кожуха) для кожного кільця. Тоді в ПК "PIPEMASTER" в якості вхідних даних задавалися аналогічні навантаження з врахуванням отриманої властивості контактності: відсутність контакту ОНК означає відсутність відповідної опори. Виявилось, що кінцевий розподіл реакцій опор та напружень в "PIPEMASTER" ідентичний кінцевому розподілу навантажень на ОНК (в тому числі для

тих, що мають скінченну податливість), отриманому за допомогою розробленої програми.

Для тестування проблеми геометричної нелінійності формально запишемо диференціальні рівняння (9) у вигляді

$$\vec{W}_{k+1} = A_k(\vec{W}_k)\vec{W}_k, \quad (*)$$

де: \vec{W}_k – вектор-стовпець, що містить набір основних параметрів k -го елемента трубопроводу; $A_k(\vec{W}_k)$ – матриця, яка пов'язує основні параметри k -го та $(k+1)$ -го елементів трубопроводу і залежить від основних параметрів вектор-стовпця \vec{W}_k . Перевірка здійснюється шляхом підстановки отриманих результатів в систему диференціальних рівнянь (9) і, таким чином, перевірки матричного співвідношення (*), а також відповідності елементів матриці A_k елементам вектор-стовпця \vec{W}_k .

б) Проаналізуємо вплив наявності оголовка (незакріплена консоль на початку дюкера) на зусилля на перші ОНК. Як було вказано вище, трос підходить до дюкера під певним кутом, а це означає, що за наявності оголовка на першому ОНК виникає додатковий згинальний момент, який рівний добутку сили натягу троса на довжину консолі. Даний ефект може призвести до значних поперечних зусиль на ОНК і це, зрозуміло, потрібно враховувати при розрахунку конструкції оголовка. Як приклад розглянемо калібр з консоллю довжиною 1,5м і вагою 1500Н/м, ОНК з інтервалом 2м, який тягнуть по прямому горизонтальному кожуху (заповненому та незаповненому водою) з силою $N = 100000H$. Схема розподілу поперечних зусиль на декілька початкових ОНК подано на рис.5 та 6. Ця задача довела, що вага консоль призводить до збільшення поперечного зусилля на першій ОНК, а також в окремих випадках до відсутності контакту у декількох наступних ОНК для "сухої" ділянки. При повному зануренні оголовка спричинює відсутність контакту на першій та другій ОНК, але більший від середнього за калібром на третій ОНК.

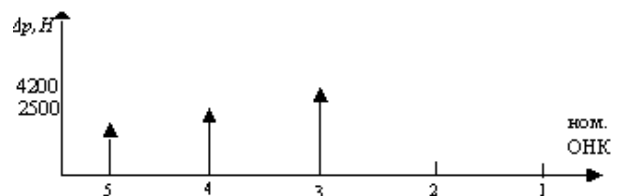


Рисунок 5 - Розподіл зусиль біля оголовка на ділянці, заповненій рідиною (ОНК через 2 м)

Розглянемо вплив перехідної зони між "сухою" та "мочною" ділянками. Для цього змодельуємо задачі з різною довжиною перехідної зони, розташованої посередині труби: 100, 80, 60, 40, 0м. При цьому використаємо калібр (дюкер, який має постійну довжину на протязі всього процесу протягування), достатньо довгий для того, щоб не впливали граничні умови

на його кінцях, на якому розміщені ОНК з інтервалом 2м (це означає, що номінальне поперечне навантаження на ОНК в „сухий” зоні дорівнює 6000Н, а в „мокрій” – 2000Н), максимальне поперечне зміщення 8см. В зоні переходу рівень заливу води лінійно залежить від абсциси ОНК, і розподілена сила визначається з формули (2). Графік поперечних навантажень на ОНК для переходу довжиною 100 і 60м наведено на рис.7. З результатів бачимо, що значна частина трубопроводу в зонах занурення зависає (відсутній контакт з стінками кожуха), а в точках контакту виникають зусилля, більші від номінальних, причому величина максимального зусилля збільшується зі зменшенням довжин перехідної зони і при 100, 60, 0м досягає відповідно 12000Н, 15000Н, 17000Н. Змінюючи величину максимального поперечного зміщення від 1 до 10 см, було помічено таку тенденцію: зменшення люфту веде до зменшення зони зависання ОНК (більша кількість точок знаходиться в контакті), а це означає, що зменшується величина максимального поперечного зусилля на ОНК. Варто також відзначити, що при зміні інтервалу між ОНК характер розподілу напружень між ОНК не міняється порівняно з інтервалом 2м, але, зрозуміло, збільшується величина максимального поперечного навантаження. Наприклад, при інтервалі 3 та 6м максимальне поперечне зусилля відповідно становило 15000Н та 27000Н при довжині перехідної зони 100м.

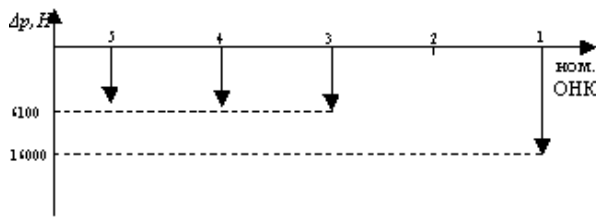
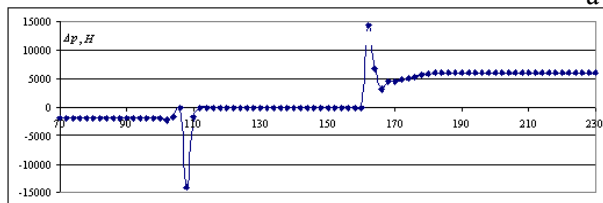
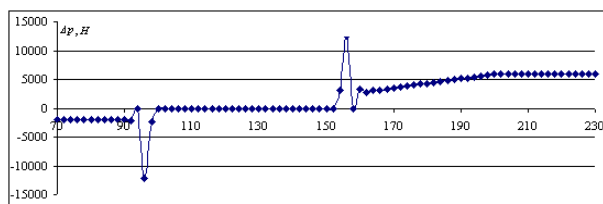


Рисунок 6 - Розподіл зусиль біля оголовка на “сухий” ділянці (ОНК через 2 м)



а) зона напівзанурення 100 м;
б) зона напівзанурення 60 м;

Рисунок 7 - Розподіл поперечних зусиль на достатньо довгому калібрі

4 Результати розрахунків для підводного переходу через р.Псьол

Розглянуті модельні задачі виявили нерівномірність розподілу поперечних навантажень на ОНК. Проте, більш важливим є врахування геометрії кожуха.

Реальний процес протягування через підводний перехід р.Псьол проводився в два етапи: а)протягування калібру довжиною 150м; б)протягування дюкера з врахуванням даних, отриманих при протягуванні калібру.

4.1 Протягування калібру

Протягування калібру здійснювалось з метою перевірки життєздатності основних конструкційних елементів та визначення коефіцієнта тертя в реальних умовах зокрема. Для аналізу результатів протягування та їх використання в подальших розрахунках записувалась діаграма тягових зусиль протяжки (рис.8, по осі ОХ відкладено відстань заглиблення оголовка калібру, по осі ОУ – зусилля в тс, яке потрібно множити на 6, щоб отримати реальне).

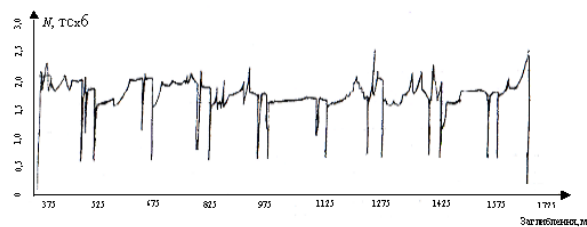


Рисунок 8 - Діаграма тягових зусиль при розтягуванні калібру

Згідно з рекомендаціями виробника ОНК RACI були розставлені з інтервалом 2м. На початку калібру був закріплений оголовок довжиною 1,5м і вагою $1500 \frac{H}{м}$, кожух максимально можливо заповнили водою. Після протягування калібру виявилась зруйнованою половина ОНК від початку калібру та декілька - від кінця. На жаль, тягові зусилля були задокументовані лише на ділянці протягування 375-1725м. Проте, за словами виконавців робіт, на ділянці 0-375м тягове зусилля становило 80000Н при русі калібру і 90000Н при зрушенні з місця. Враховуючи, що аналогічні виміри для самого троса 50000 і 61000Н, отримуємо, що на рух самого калібру йшло зусилля 30000-35000Н (згідно з реальним заливом води калібр ще не був повністю у воді); в цьому випадку розрахунки засвідчили, що мав місце коефіцієнт тертя $k_{mp} = 0,12 \div 0,25$, який відповідає документації виробника ОНК ($k_{mp} = 0,18$). Якщо ж розглянути діаграму зусиль (рис.8) на калібр на ділянці 375-525м, то зусилля відразу на початку становить 145000-50000=95000Н. За даними розрахунків, навіть з врахуванням значної кривизни геометрії кожуха (рис.9), такий різкий перепад зусиль неможливий без впливу додаткових факторів (значне стирання ОНК і збіль-

шення k_{mp} або руйнування ОНК). На користь версії про руйнування свідчить те, що за розрахунками поперечні зусилля досягали 36000Н при положенні оголовка на відстані 320м від початку і 47000Н – на відстані 335м, що більше, ніж вказане виробником максимально допустиме поперечне зусилля 27000Н. Проте, одностороннього висновку щодо місця руйнування кілець зробити не можна. Зважаючи на це, ми будемо користуватись консервативним коефіцієнтом тертя, вважаючи, що ОНК не зруйновані. В таблиці 1 наведено коефіцієнти тертя, розраховані програмою при відповідних максимальних зусиллях протягування, взятих для кожної ділянки протяжки довжиною 150м. З цих даних і визначаємо консервативний коефіцієнт тертя, який дорівнює 0,35.

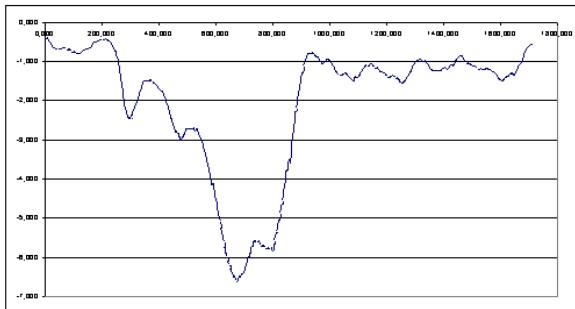


Рисунок 9 - Профіль підводного переходу через р. Псьол

Таблиця 1

Ділянка	Максимальне зусилля (без врахування троса), Н	Розрахунковий коефіцієнт тертя
375-525м	55000	0,34
525-675м	54000	0,35
675-825м	60000	0,35
825-975м	61000	0,36
975-1125м	48000	0,32
1125-1275м	50000	0,3
1275-1425м	72000	0,29
1425-1575м	61000	0,3
1575-1725м	73000	0,35

Ще при розгляді модельних задач було помічено, що на перше ОНК передається значне зусилля від троса. Кривизна реальної геометрії ще більше посилює цей ефект. Крім того, внаслідок малої податливості суттєво навантаженим є ще й кінець калібру. Так, розрахунки зусиль на ОНК засвідчили, що залежно від положення калібру найбільші зусилля на початкове ОНК досягають 49000Н, на проміжні – 23000Н, на кінцеве – 35000Н.

4.2 Протягування дюкера

Зважаючи на те, що протягування калібру було невдалим (зруйнувалась значна частина ОНК) в силу факторів, описаних вище, для протягування дюкера потрібно вирішити питання щодо оптимізації поперечних навантажень на ОНК взагалі і на перше ОНК зокрема та визначення тягового зусилля.

З метою вирішення проблеми з великим поперечним навантаженням на перше ОНК біля оголовка було вирішено установити трубу більшого діаметра (трохи більшим від суми діаметра дюкера та висоти ОНК) довжиною 0,5м, яка б сприймала на себе це навантаження, не зруйнувала і унеможливила принцип “доміно”, коли руйнування першого ОНК спричинює збільшення поперечного навантаження на друге ОНК, яке відтак також руйнується і спричиняє збільшення навантаження на третє ОНК і т.д.

Зрозуміло, що на поперечне навантаження на ОНК впливає інтервал між ОНК. Розрахунки засвідчили, що зі зменшенням інтервалу між ОНК спадає максимальне поперечне навантаження на нього, проте сума модулів поперечних зусиль зростає, а, отже, при заданому k_{mp} збільшується тягове зусилля. Отримані розрахункові значення поперечних навантажень в проміжних точках (на відстані 20м від оголовка) при моделюванні для інтервалу 2,3,5,6,8м подані в таблиці 2 (довжина дюкера 900м, люфт 8см, коефіцієнт тертя 0,2). Хоча при більшому інтервалі (5,6,8м) поперечне навантаження на одне ОНК більше, але в цьому випадку можна використати ОНК, яке складається з двох елементів і, як видно, зусилля на один елемент буде меншим, ніж на ОНК з одного елемента, розміщеного з інтервалом 2,3м. До подібного результату призводить і збільшення висоти ОНК, тобто зменшення люфту: зменшується навантаження на ОНК, але збільшується тягове зусилля.

Таблиця 2

Інтервал, м	Максимальне навантаження на ОНК, Н	Максимальне навантаження на одне ОНК, Н (два елементи в ОНК)
2	21413	-
3	33366	-
5	36108	18054
6	37333	18666,5
8	39568	19874

Таким чином, з одного боку вигідно розставляти ОНК з малим інтервалом і малим люфтом. Але при цьому виникає більше тягове зусилля, яке може виявитись надто великим або призвести до негативного ефекту натягнутого троса. Цей ефект полягає в тому, що при певних умовах, зокрема при досягненні осьовим зусиллям певного значення, в трубопроводі починають проявлятися властивості не тільки балки, але й троса. При цьому поздовжня сила впливає на поперечну, і удавана податливість труби зменшується. Тоді дюкер намагається розміститись у кожусі більш коротким шляхом (наблизитись до прямої лінії), з меншою кількістю контактних точок, а це означає, що збільшуються максимальні контактні зусилля, і як наслідок збільшується сума модулів контактних навантажень, а, отже, зростає тягове зусилля.

Більш детально пояснимо два механізми цього явища, які тісно пов'язані між собою. При малих коефіцієнтах тертя залежність тягового зусилля від k_{mp} лінійна, але, починаючи з певного порогу, з'являється нелінійна залежність – різко зростає зусилля протягування (рис.10). Аналогічно малий коефіцієнт тертя не впливає на максимальні поперечні навантаження (вони не змінюються), але, починаючи з деякого значення коефіцієнта тертя навантаження на ОНК починають зростати (рис.11), а отже збільшується тягове зусилля.

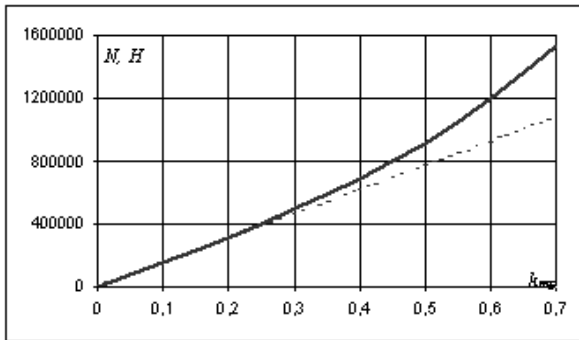


Рисунок 10 - Залежність сили протягування від коефіцієнта тертя (дюкер 1500 м, реальний рівень заливу води, ОНК через 3 м)

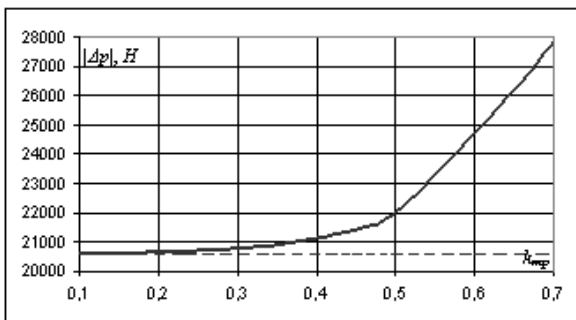


Рисунок 11 - Залежність максимального поперечного навантаження на ОНК проміжної зони 1200-1400 м від коефіцієнта тертя (дюкер 1500 м, реальний рівень заливу води, ОНК через 3 м)

Бачимо, що оптимізація не є однозначною – покращання одного параметра може призвести до значного погіршення іншого. Тому в реальному процесі вирішено було використовувати комплексне поєднання факторів оптимізації.

Зважаючи на сказане та враховуючи наявні матеріали, було запропоновано таку схему дюкера: на проміжку 20м від труби більшого діаметра кільця установлювати з інтервалом 2м (по два елементи в ОНК) для розвантаження початку дюкера, а далі з інтервалом 6м (по два елементи в ОНК). ОНК брались висотою 9см, а, отже, люфт становив 8,8см, діаметр більшої труби 0,92м, тобто сума діаметра дюкера та висоти ОНК 0,91м < 0,92м.

Зрозуміло, що внаслідок наявності на початку дюкера труби такого великого діаметра, деяка кількість ОНК біля цієї труби не буде контактною. В результаті розрахунку математичної моделі розташування ОНК отримали, що перші два ОНК ніколи на бувають навантаженими, третє кільце (на відстані 6м від труби

0,92м) зазнає навантаження до 11000Н, а четверте досить навантажене – зусилля до 23000Н. Зважаючи на це, було вирішено здійснити таку остаточну розстановку ОНК: перше ОНК (складається з трьох елементів) через 7м від труби діаметром 0,92м, відтак чотири ОНК (з двох елементів) з інтервалом 2м, а всі інші ОНК (з двох елементів) - через 6м.

Таким чином здійснювалось моделювання для визначення тягового зусилля при протягуванні дюкера з параметрами: коефіцієнт тертя „кільце-метал” дорівнював 0,35 „метал-метал” – 0,4, люфт – 8,8см, повний залив води і схема розстановки описана вище.

В таблиці 3 наведено результати розрахунку тягових зусиль для різних заглиблень дюкера. Ці консервативні значення слугували певним орієнтиром на кожній ділянці протяжки, яка технологічно відбувалась поетапно по 150м. Це означає, що при їх реальному досягненні необхідно додатково втручатись в процес протягування. Наприклад, можна збільшувати рівень заливу води, бо, як показали розрахунки, при заливці на 0,5м нижче реального рівня заливу відповідні зусилля при закінченні протягування будуть становити близько 900000Н (при заглибленні 1700м), а на 0,5м вище - відповідно 700000Н.

Таблиця 3

Заглиблення дюкера, м	Розраховане зусилля протягування, Н
100	111559
500	336461
800	443934
1100	576347
1400	660958
1700	813806

Проте насправді розрахованих вище критичних значень зусиль протягування досягнуто не було, вони були на 20-40% менші орієнтовних. Дюкер був витягнутий на трохи більшу відстань для перевірки незруйнованості ОНК. Всі кільця виявились цілими. На кінець протягування тягове зусилля становило 550000Н, а це, згідно розрахунків, означає, що мав місце $k_{mp} = 0,25$ і, отже, припущення, що на калібрі ОНК руйнувались на початковій ділянці протягування 0-375м, швидше за все, вірне.

Таким чином, описана вище модель дюкера довела свою життєздатність і була вдало використана при протягуванні реального трубопроводу.

Висновок

В роботі використано оригінальний метод визначення реального профілю кожуха за дискретними точками вимірювань, який враховує пружно-пластичну взаємодію трубопроводу та ґрунту траншеї. Побудовано точну математичну модель протягування трубопроводу меншого діаметра через трубопровід більшого діаметра і розроблено алгоритм розв'язування задачі,

на основі якого було створено комп'ютерну програму. Розгляд реальних задач за допомогою цієї програми виявив нерівномірність розподілу поперечних зусиль на ОНК, при цьому досить навантаженим було перше ОНК (внаслідок додаткового поперечного зусилля від троса та малої податливості початку труби), для калібру навантаженим також є останнє ОНК (внаслідок малої податливості кінця труби).

Аналіз протягування калібру довжиною 150 м дав підстави для рекомендації щодо протягування дюкера та дав можливість побудувати схему розстановки ОНК на ньому, яка була вдало використана в реальному процесі. Проте однозначних теоретичних рекомендацій щодо основних елементів протягування дати не можна, адже оптимізація одного параметра (напр., тягового зусилля) може призвести до значного погіршення іншого важливого фактора (напр., навантаження на ОНК).

З практичної точки зору розроблена програма може бути зручним засобом при конфігу-

руванні конструкційних елементів для виконання подібних робіт на інших переходах.

Література

1. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др. Сопротивление материалов. 4-е изд. Киев.: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.
2. Орыняк И.В., Радченко С.А. Численный анализ влияния подвижек грунтов на напряженное состояние трубопроводов // Тезисы докладов научно-технического семинара «Повышение эксплуатационной надежности линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы ДК «Укртрансгаз». – Киев: 2002. – С. 43.
3. Даревский В.М. Определение перемещений и напряжений в цилиндрической оболочке при локальных нагрузках. Вып.1, 1964.
4. Орыняк И.В., Радченко С.А. Напряженное состояние в криволинейных подземных трубах // Пробл. прочности. – 2003. – №4. – С. 93-104.

XII Міжнародна науково-технічна конференція

МАШИНОБУДУВАННЯ І ТЕХНОСФЕРА ХХІ СТОЛІТТЯ

м. Севастополь
(12-17 вересня 2005 р.)

Оргкомітет конференції

83000, Донецьк, вул. Артема, 58
Донецький національний технічний університет,
кафедра технології машинобудування

Тел./факс: (062) 305 01 04, 291 08 05
моб. тел. 050 620 23 96

E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua,
<http://www.dgtu.donetsk.ua>,
<http://donntu.edu.ua/russian/konf/mashinebuild/index.htm>

Олександр Миколайович МИХАЙЛОВ
Ігор Олексійович ГОРОБЕЦЬ
Тетяна Георгіївна ІВЧЕНКО
Микола Васильович ГОЛУБОВ
Світлана Анатоліївна РИБІНА

Під час роботи конференції відбудеться з'їзд Міжнародного союзу машинобудівників (МСМ)

Тематика конференції:

- *Практика і перспективи створення і застосування прогресивних і нетрадиційних технологій. Інтегровані технології. Збирання в машинобудуванні, приладобудуванні. Абразивні та віброабразивні технології*
- *Механізація та автоматизація виробничих процесів. Прогресивне обладнання*
- *Комплексна автоматизація проектування, підготовки і керування виробництвом*
- *Проблеми створення і застосування прогресивних інструментів та інструментальних матеріалів*
- *Керування якістю продукції та технічних систем. Проблеми інженерії поверхневого шару виробів*
- *Сучасні проблеми машинобудування і деталей машин*
- *Сучасні проблеми інженерії матеріалів, процесів і матеріалознавства в машинобудуванні. Покриття виробів машинобудування*
- *Питання моделювання і розрахунків складних технічних систем*
- *Спеціальна техніка і технології техносфери. Екологічні проблеми техносфери*
- *Сучасні проблеми інженерної освіти*
- *Економічні проблеми техносфери*