

АНАЛІЗ РОЗРАХУНКІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДУ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ІЗОЛЯЦІЙНО-УКЛАДАЛЬНИХ РОБІТ

В. Б. Запухляк

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: srgg@nung.edu.ua*

Запропоновано застосовувати метод трьох моментів при розрахунку напруженого стану трубопроводу під час проведення ізоляційно-укладальних робіт суміщеним способом. Проведено аналіз існуючих способів розрахунку напруженого стану. Проведено порівняння результатів розрахунку за базовими методами та методом трьох моментів та зроблені відповідні висновки.

Ключові слова: *трубопровід, ізоляційно-укладальні роботи, напружений стан, трубоукладач*

Вступ. При будівництві магістральних трубопроводів ізоляційно-укладальними роботами (ІУР) є процес очищення зовнішньої поверхні трубопроводів від бруду, окалини, іржі, снігу, льоду, їх ізоляція і укладання в траншею. Ці роботи виконує механізована ізоляційно-укладальна колона після того, як на трасі трубопроводу окремі труби чи їх довгомірні секції зварені у суцільну нитку та розроблені траншеї для укладання трубопроводу. Такий спосіб проведення ІУР отримав назву суміщеного способу. Механізована колона виконує наступні операції:

– на трубопровід, що лежить на бровці траншеї, крани-трубоукладачі насаджують за допомогою тролейних підвісок, очисно-ізоляційну (очисну і ізоляційну) машину – за допомогою спеціального конуса, що надівається на торець нитки трубопроводу;

– крани-трубоукладачі піднімають початкову ділянку трубопроводу на висоту, що забезпечує рух по трубопроводу очисно-ізоляційної (чи очисної і ізоляційної) машини, і зміщують кінець трубопроводу так, щоб ізоляційна машина розташовувалася над віссю траншеї і була опущена в неї приблизно на 0,5 м;

– колона рухається синхронно – очисно-ізоляційна (чи очисна і ізоляційна) машина безперервно (за виключенням технологічних зупинок), а крани-трубоукладачі переривчасто підлаштовуючись до ходу машин і витримуючи відстані один від одного в межах допусків;

– очисний блок очисно-ізоляційної машини (чи очисна машина) очищає трубопровід до металевого блиску і одночасно наносить на тру-

бопровід ґрунтовку або клейкий шар; ізоляційний блок (чи ізоляційна машина) наносить ізоляційне покриття;

– рухаючись по ходу робіт, крани-трубоукладачі насувають трубопровід у бік траншеї так, щоб очисно-ізоляційна машина (чи ізоляційна машина) находилась в початковому положенні (над траншеєю), а ізольований трубопровід у міру просування колони вільно укладався на дно траншеї.

Станом на сьогодні досить часто застосовують труби, що ізолюються в заводських умовах і переваги при цьому очевидні. Механізовані ізоляційно-укладальні колони стають колонами з ізоляції стиків трубопроводу і укладанню його в траншею. Окрім цього спрощується технологічна схема проведення робіт, яка носить назву роздільної.

Безумовно, що застосування на будівництві труб, що ізолюються в заводських умовах, оцінюється як позитивне інженерно-технічне рішення. Проте питання збереження заводського ізоляційного покриття від пошкоджень під час навантаження і розвантаження, транспортування, зварювання труб в секції, а секцій у нитку і т. п. не вирішені повністю [1].

Аналіз сучасних досліджень і публікацій.

Під час очистки, ізоляції і укладання трубопроводу в траншею потрібно піднімати трубопровід на висоту, необхідну для проходу очисної та ізоляційної машин. Це приводить до згину трубопроводу і виникнення напруженого стану в стінці. Також під час зміщення трубопроводу з бровки на вісь траншеї відбувається його вигинання в горизонтальній площині, що зумовлює складний напружений стан трубопроводу.

Розрахунок параметрів ізоляційно-укладальної колони проводиться для того щоб правильно розмістити машини в ізоляційно-укладальній колоні, вибрати віддалі між ними та підібрати марку трубоукладачів.

При розрахунку напруженого стану трубопроводу потрібно враховувати навантаження від власної ваги трубопроводу та зусилля, які діють на трубоукладачах, а під час виконання ГУР суміщеним способом – додатково від ваги очисної і ізоляційної машин.

Отже, при виконанні ГУР суміщеним способом розрахунок напруженого стану трубопроводу буде ускладнений додатковими навантаженнями, тому проведемо аналіз визначення напружень в тілі трубопроводу саме для такого способу.

Кількість трубоукладачів в ізоляційно-укладальній колоні складає 3-7 залежно від діаметра трубопроводу, ваги одного погонного метру труби і вантажопідйомності трубоукладачів. При будь-якій організації робіт для трубопроводів діаметром 720 мм і більше повинно бути не менше чотирьох трубоукладачів, а для трубопроводів діаметром менше 720 мм не менше трьох трубоукладачів.

Робота ізоляційно-укладальної колони суміщеним способом може виконуватись за різними схемами залежно від діаметру трубопроводу,

наявних засобів механізації, місцевих умов та інших чинників. Для уніфікації технології виконання робіт розроблені типові схеми, які базуються на розрахунку та перевірені практикою. Схеми розстановки трубоукладачів, очисної і ізоляційної машини, які можна застосувати для виконання ізоляційно-укладальних робіт суміщеним способом наведені на рис. 1 [2, 3].

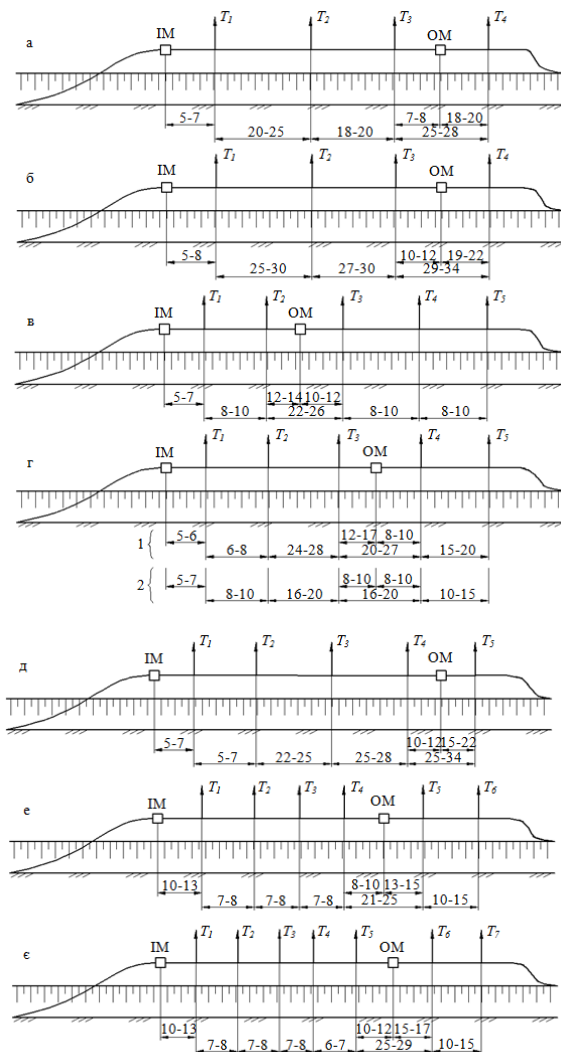


Рис. 1. Схеми укладання трубопроводів суміщеним способом: а – діаметр трубопроводу 720 мм; б, в, г – діаметр трубопроводу 1020 мм; д, е – діаметр трубопроводу 1220 мм; з – діаметр трубопроводу 1420 мм; Т1-Т7 – трубоукладачі; ІМ – ізоляційна машина; ОМ – очисна машина

Розглянемо один з найпоширеніших способів розрахунку ізоляційно-укладальної колони. [2, 3, 4]

В технологічній схемі проведення ізоляційно-укладальних робіт є величини, які визначаються умовами роботи. До них відносяться: вага

ізоляційної і очисної машин, власна вага трубопроводу і його жорсткість, глибина траншеї, віддалі від точки торкання трубопроводу дна траншеї до ізоляційної, очисної машин та трубоукладачів, довжина піднятої ділянки трубопроводу, висота піднімання трубопроводу над бровою під машинами. Вагою нанесеної на поверхню труби ізоляції нехтується.

Машини в ізоляційно-укладальній колоні розміщують так щоб:

- напруження в трубопроводі від згину у двох площинах та від навантажень ізоляційної, очисної машин і кранів трубоукладачів були в пружній області;

- не відбувалося перевантаження трубоукладачів;

- були витримані технологічні віддалі між очисною та ізоляційною машиною та між ізоляційною машиною і точкою торкання трубопроводом дна траншеї.

Для одночасного виконання вказаних вище умов потрібно розв'язати диференційне рівняння пружної осі згину трубопроводу.

Розрахункова схема згину трубопроводу у вертикальній площині наведена на рис. 2. Ця схема характеризується несиметричною формою згину осі трубопроводу.

Вихідним диференціальним рівнянням пружної осі згину трубопроводу для двох (суміщена і роздільна) способів виконання ізоляційно-укладальних робіт є відоме рівняння виду

$$EIy''(x) = M(x), \tag{1}$$

де E – модуль пружності матеріалу труби; I – момент інерції поперечного перерізу трубопроводу; $M(x)$ – згинаючий момент в перерізі x .

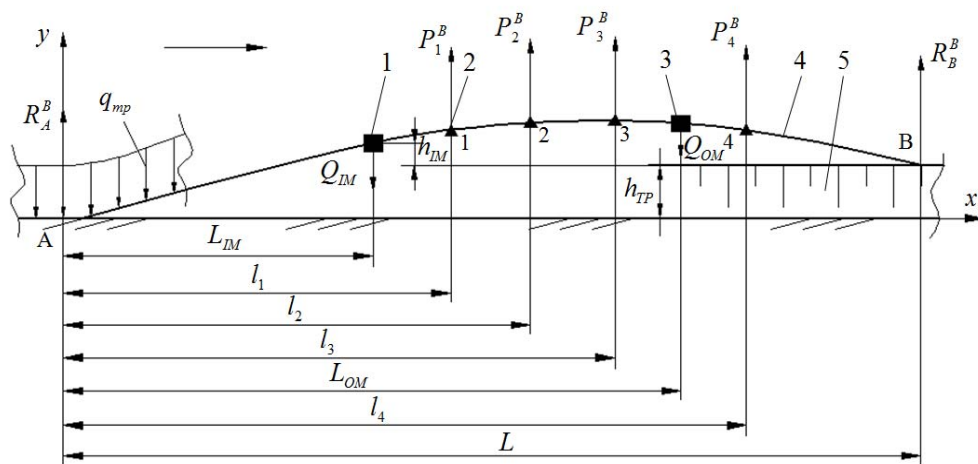


Рис. 2. Розрахункова схема згину трубопроводу у вертикальній площині: 1 – ізоляційна машина; 2 – трубоукладач; 3 – очисна машина; 4 – трубовід; 5 – траншея

Для розрахунку приймається умова, що в точках торкання трубопроводу з ґрунтом кути повороту поперечного перерізу трубопроводу рівні нулю ($\varphi = 0$). Крім того, робиться припущення, що в перерізах, які відповідають точкам торкання трубопроводу з ґрунтом, згинаючі моменти рівні нулю ($M_0 = M_L = 0$).

Рівняння (1) в розгорнутому і спрощеному вигляді буде:

$$EIy''(x) = M(x) = R_A^B x - Q_{IM}(x - L_{IM}) + P_1^B(x - l_1) + P_2^B(x - l_2) + P_3^B(x - l_3) - Q_{OM}(x - L_{OM}) + P_4^B(x - l_4) - q_{mp} \frac{x^2}{2}, \quad (2)$$

$$EIy''(x) = R_A^B x - \sum_{i=1}^2 Q_i(x - L_i) + \sum_{j=1}^n P_j(x - l_j) - \frac{q_{mp} x^2}{2}, \quad (3)$$

де R_A^B – реакція ґрунтової основи у місці торкання трубопроводу дна траншеї; Q_{IM} , Q_{OM} – відповідно вага ізоляційної та очисної машини; L_{IM} , L_{OM} – відповідно віддалі від точки торкання трубопроводу дна траншеї до ізоляційної та очисної машини; l_1 , l_2 , l_3 , l_4 – віддалі від точки торкання трубопроводу дна траншеї до трубоукладачів; P_1^B , P_2^B , P_3^B , P_4^B – зусилля у вертикальній площині, які діють на трубоукладачі; q_{mp} – вага одиниці довжини труби.

Після інтегрування рівняння пружної осі згину трубопроводу буде

$$y(x) = \frac{1}{6EI} \left(R_A^B x^3 - \sum_{i=1}^2 Q_i(x - L_i)^3 + \sum_{j=1}^n P_j^B(x - l_j)^3 - \frac{q_{mp} x^4}{4} \right). \quad (4)$$

Реакція ґрунтової основи R_A^B залежить від місця розташування ізоляційної машини, скориставшись рівнянням пружної осі згину (1) ділянки трубопроводу на відрізьку $0 < x \leq L_{IM}$ та підставивши значення координат ізоляційної машини, визначається величина реакції

$$R_A^B = \frac{24EI(h_{TP} + h_{IM}) + q_{mp} L_{IM}^4}{4L_{IM}^3}. \quad (5)$$

Для визначення зусиль у вертикальній площині, які діють на трубоукладачі, віддалей між ними, може бути декілька варіантів розв'язку задачі. Перший – це коли при згині необхідно забезпечити рівність згинаючих моментів у всіх перерізах, де трубопровід підтримується трубоукладачами. Другий – коли необхідно забезпечити рівність зусиль на гаках трубоукладачів.

Вирази для визначення згинаючих моментів M_1^B , M_2^B , M_3^B , M_4^B , які виникають в стінках піднятої ділянки трубопроводу в місцях розміщення трубоукладачів мають вид

$$\left\{ \begin{aligned} M_1^B &= R_A^B l_1 - Q_{IM} (l_1 - L_{IM}) - \frac{q_{mp} l_1^2}{2}, \\ M_2^B &= R_A^B l_2 - Q_{IM} (l_2 - L_{IM}) + P_1^B (l_2 - l_1) - \frac{q_{mp} l_2^2}{2}, \\ M_3^B &= R_A^B l_3 - Q_{IM} (l_3 - L_{IM}) + P_1^B (l_3 - l_1) + P_2^B (l_3 - l_2) - \frac{q_{mp} l_3^2}{2}, \\ M_4^B &= R_A^B l_4 - Q_{IM} (l_4 - L_{IM}) + P_1^B (l_4 - l_1) + P_2^B (l_4 - l_2) + P_3^B (l_4 - l_3) - Q_{OM} (l_4 - L_{OM}) - \frac{q_{mp} l_4^2}{2}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для розв'язку системи рівнянь (6) приймається припущення про рівність згинаючих моментів, тобто

$$M_1^B = M_2^B = M_3^B = M_4^B = M, \quad (7)$$

і визначаються значення зусиль у вертикальній площині, які діють на трубоукладачі P_1^B, P_2^B, P_3^B .

Для побудови епюри згинаючих моментів у вертикальній площині необхідно визначити реакцію ґрунтової основи берми траншеї R_B^B у вертикальній площині

$$R_B^B = \frac{M + \frac{q_{mp} \cdot (L - l_4)^2}{2}}{L - l_4}. \quad (8)$$

Пізніше проводиться визначення зусилля у вертикальній площині, що діє на четвертий трубоукладач

$$P_4^B = \frac{M - R_B^B (L - l_3) + Q_{OM} (L_{OM} - l_3) + \frac{q_{mp} (L - l_3)^2}{2}}{l_4 - l_3}. \quad (9)$$

Значення абсцис x_1^{max} і x_5^{max} , де мають місце максимальні величини згинаючих моментів у вертикальній площині, та величини цих моментів визначаються відповідно за формулами

$$x_1^{max} = \frac{R_A^B}{q_{mp}}, \quad x_5^{max} = \frac{R_B^B}{q_{mp}}, \quad (10)$$

$$M_1^{max} = R_A^B x_1^{max} - \frac{q_{mp} (x_1^{max})^2}{2}, \quad M_5^{max} = R_B^B x_5^{max} - \frac{q_{mp} (x_5^{max})^2}{2}. \quad (11)$$

За результатами розрахунку будуються епюру згинаючих моментів, які діють на трубопровід у вертикальній площині (рис. 4, а).

Також проводиться розрахунок напруженого стану трубопроводу з урахуванням його деформації у горизонтальній площині за схемою приведеною на рис. 3.

Згинаючі моменти в опорних перерізах трубопроводу при його деформації у горизонтальній площині визначаються розв'язавши диференціальне рівняння пружної осі згину трубопроводу (1), (3)

$$\begin{cases} EIy''(x) = -P_1^r(x-l_1) + P_2^r(x-l_2) + P_3^r(x-l_3) - P_4^r(x-l_4), \\ EIy'(x) = \frac{1}{2}[-P_1^r(x-l_1)^2 + P_2^r(x-l_2)^2 + P_3^r(x-l_3)^2 - P_4^r(x-l_4)^2] = 0, \\ y(x) = \frac{1}{6EI}[-P_1^r(x-l_1)^3 + P_2^r(x-l_2)^3 + P_3^r(x-l_3)^3 - P_4^r(x-l_4)^3] = -\left(\frac{B_{TP}}{2} + c\right), \end{cases} \quad (12)$$

де P_1^r , P_2^r , P_3^r , P_4^r – зусилля у горизонтальній площині, які діють на трубоукладачі; B_{TP} – ширина траншеї; c – віддаль від краю траншеї до осі трубопроводу розміщеного на бермі.

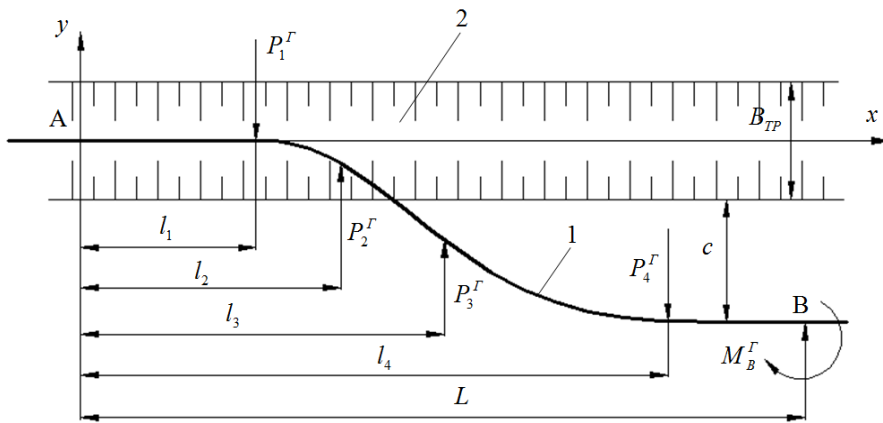


Рис. 3. Розрахункова схема згину трубопроводу у горизонтальній площині: 1 – трубопровід; 2 – траншея

Дану систему рівнянь розв'язують, прийнявши наступні припущення

$$\begin{cases} P_1^r = P_2^r = P', \\ P_3^r = P_4^r = P''. \end{cases} \quad (13)$$

Тоді знаходяться горизонтальні зусилля, які діють на трубоукладачі

$$P'' = -\frac{6EI\left(\frac{B_{TP}}{2} + c\right)}{\frac{(L-l_4)^2 - (L-l_3)^2}{(L-l_2)^2 - (L-l_3)^2} \left((L-l_2)^3 - (L-l_1)^3 \right) + (L-l_3)^3 - (L-l_4)^3}, \quad (14)$$

$$P' = \frac{P'' \left((L-l_4)^2 - (L-l_3)^2 \right)}{(L-l_2)^2 - (L-l_1)^2}. \quad (15)$$

Тоді, визначивши горизонтальні зусилля, значення згинаючих моментів в горизонтальній площині рівні

$$\begin{cases} M_1^r = 0, \\ M_2^r = -P_1^r(l_2 - l_1), \\ M_3^r = -P_1^r(l_3 - l_1) + P_2^r(l_3 - l_2), \\ M_4^r = -P_1^r(l_4 - l_1) + P_2^r(l_4 - l_2) + P_3^r(l_4 - l_3), \\ M_B^r = -P_1^r(L - l_1) + P_2^r(L - l_2) + P_3^r(L - l_3) - P_4^r(L - l_4). \end{cases} \quad (16)$$

За результатами розрахунку будувється епюра згинаючих моментів у горизонтальній площині (рис. 4, б).

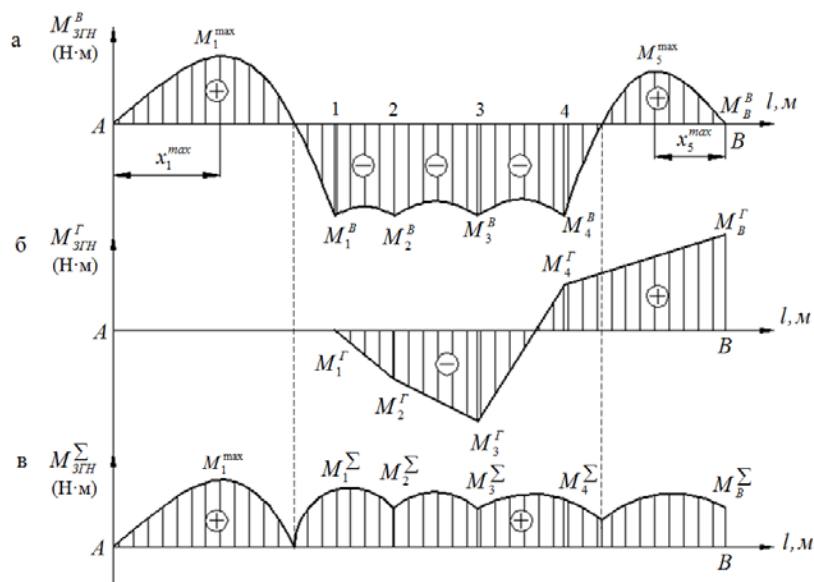


Рис. 4. Епюри згинаючих моментів: а – епюра згинаючих моментів у вертикальній площині; б – епюра згинаючих моментів у горизонтальній площині; в – епюра сумарних згинаючих моментів

Для визначення максимального згинаючого моменту будувється сумарна епюра згинаючих моментів. Значення сумарних згинаючих моментів в опорних точках трубопроводу визначається за формулою

$$M_i^\Sigma = \sqrt{(M_i^B)^2 + (M_i^r)^2}. \quad (17)$$

За результатами розрахунків будують епюру сумарних згинаючих моментів (рис. 4, в).

Для перевірки трубопроводу на міцність з епюри сумарних згинаючих моментів визначається максимальне значення згинаючого моменту M_{max}^Σ і перевіряється виконання умови міцності

$$\sigma = \frac{M_{max}^\Sigma}{W} \leq [\sigma], \quad (18)$$

де W – момент опору поперечного перерізу труби; $[\sigma]$ – допустиме напруження в трубопроводі.

Постановка задачі.

З приведенного вище матеріалу видно, що при розрахунку напруженого стану трубопроводу під час виконання ГУР суміщеним способом приймаються певні припущення, зокрема: по-перше, що згинаючі моменти (при розрахунку у вертикальній площині), які виникають в стінці піднятої ділянки трубопроводу в місцях розміщення трубоукладачів є рівні між собою (7), а, по-друге, що поперечні зусилля (при розрахунку у горизонтальній площині), на окремих трубоукладачах рівні між собою (13). Такі припущення викликають сумнів у достовірності результатів розрахунку, оскільки відомо, що: перші два трубоукладачі (за ходом руху колони) займають найважливіше положення в колоні, вони підстраховують один одного, попереджуючи аварії в колоні у випадку несправності або пошкоджень одного з цих трубоукладачів; останній трубоукладач працює в найскладніших умовах оскільки на нього діє значний перекидаючий момент, оскільки він підтримує трубопровід на висоті потрібній для роботи ізоляційної машини і одночасно прикладає досить великі зусилля для зміщення трубопроводу на вісь траншеї; передостанній трубоукладач (при великій кількості трубоукладачів в колоні) може частково допомагати останньому. Тому пропонується застосувати для визначення напруженого стану трубопроводу під час його укладання альтернативну методику, при якій трубопровід розраховується як багатопрогінна нерозрізна балка з пересувними опорами, а розрахунок виконується на основі теореми про три моменти. Нижче приведемо дану методику, а також порівняємо результати розрахунку напруженого стану трубопроводу 1420x20 мм за цією методикою та за базовою, що приведена вище.

Основні результати дослідження.

1. Згин трубопроводу у вертикальній площині

Задачу розрахунку параметрів ізоляційно-укладальної колони розглянемо при використанні п'яти кранів-трубоукладачів (або груп спарених трубоукладачів) для укладання трубопроводу діаметром 1420 мм (див. рис. 5, а). Для крайніх прогонів довжиною відповідно l_1 та l_2 , використовуючи диференційне рівняння зігнутої осі балки, можна записати

$$EIh_{13} = \frac{1}{6} \left[R_o (l_1 - b)^3 - \frac{q(l_1 - b)^4}{4} \right], \quad (19)$$

$$EIh_5 = EIh_{oc} = \frac{1}{6} \left[R_A l_2^3 - \frac{q l_2^4}{4} \right], \quad (20)$$

висота підйому трубопроводу для вільного проходу ізоляційно $h_{13} = h_{mp} + 0,3(M)$ та очисної $h_{oc} = \frac{D_3}{2} + (0,5 \dots 0,7)(M)$ машини; h_{mp} – глибина

траншеї; D_3 - зовнішній діаметр трубопроводу, що укладається; R_O та R_A – реакції опори; b – відстань від трубоукладача № 1 до ізоляційної машини; q – вага погонного метра трубопроводу.

Слід зауважити, що на початку координат (у місці спирання трубопроводу на дно траншеї) прогин y_0 та кут повороту φ_0 рівні нулю. Також у точці A , де колона опирається на берму траншеї прогин y_A та кут повороту φ_A рівні нулю.

Реакції опори визначаються за формулами

$$R_O = \frac{ql_1}{2} + Q_{is} \frac{b}{l_1} + \frac{M_1}{l_1}, \quad (21)$$

$$R_A = \frac{ql_2}{2} + \frac{M_5}{l_2}. \quad (22)$$

Тоді рівняння (19) та (20) приймуть вигляд

$$EIh_{is} = \frac{1}{6} \left[\left(\frac{ql_1}{2} + \frac{Q_{is}b}{l_1} + \frac{M_1}{l_1} \right) (l_1 - b)^3 - \frac{q(l_1 - b)^4}{4} \right], \quad (23)$$

$$EIh_{ou} = \frac{1}{6} \left[\frac{ql_2^4}{4} + M_5 l_2^2 \right]. \quad (24)$$

Використовуючи вираз (19) складаємо рівняння трьох моментів для кожної пари прогонів [5, 6]

$$\begin{cases} M_O l_1 + 2M_1(l_1 + l) + M_2 l = -\frac{q}{4}(l_1^3 + l^3) - 6EI \left(\frac{h_1}{l_1} - \frac{A_2}{l} \right) - Q_{is} \frac{a \cdot b}{4} (a + l), \\ M_1 l + 2M_2(l + l) + M_3 l = -\frac{q}{4}(l^3 + l^3) - 6EI \left(\frac{A_2}{l} - \frac{A_3}{l} \right), \\ M_2 l + 2M_3(l + l) + M_4 l = -\frac{q}{4}(l^3 + l^3) - 6EI \left(\frac{A_3}{l} - \frac{A_4}{l} \right), \\ M_3 l + 2M_4(l + l) + M_5 l = -\frac{q}{4}(l^3 + l^3) - 6EI \left(\frac{A_4}{l} \right) - Q_{ou} \frac{c \cdot d}{l} (d + l), \\ M_4 l + 2M_5(l + l_2) + M_A l_2 = -\frac{q}{4}(l^3 + l_2^3) - 6EI \left(\frac{h_{ou}}{l_2} \right) - Q_{ou} \frac{c \cdot d}{l} (c + l). \end{cases} \quad (25)$$

Зауважимо, що $M_O = 0$ та $M_A = 0$ (в перерізах, де трубопровід торкається ґрунту, згинаючі моменти рівні “0”).

В приведеній системі рівнянь прийняті такі позначення: M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 – згинаючі моменти в опорних перерізах (місцях де трубопровід підтримується трубоукладачами); l – довжина прогону між трубоукладачами (в даному розрахунку приймаємо цю довжину однаковою для всіх 4-х прогонів (в загальному випадку ці довжини можуть бути різними); a – відстань від місця торкання трубопроводу з ґрунтом до ізоляційної машини; c – відстань від трубоукладача №4 до очисної машини; d – відстань від очисної машини до трубоукладача №5; EI – жорсткість перерізу трубопроводу; Q_{is} та Q_{ou} – відповідно вага ізоля-

ційної та очисної машини; h_1 – висота підйому трубопроводу трубоукладачем №1; Δ_2 – зміщення опори №2 відносно опори №1; Δ_3 – зміщення опори №3 відносно опори №2; Δ_4 – зміщення опори №4 відносно опори №3.

Прийемо, що трубопровід від опори № 1 до опори № 4 піднятий рівномірно. Тоді $\Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \frac{(h_{mp} + h_{oc}) - h_1}{3}$.

Таким чином ми отримали сім рівнянь (рівняння (23), (24) та система (25)) з вісьмома невідомими ($l_1, l_2, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, k$).

Порядок розрахунку наступний: задаємось числом k ($k = l/l_1$ – відношення довжини прогонів) і розв'язуємо систему семи рівнянь із сімома невідомими. Результати розрахунку зведемо у табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків напруженого стану трубопроводу у вертикальній площині при проведенні ізоляційно-укладальних робіт при різних значеннях параметра k ($D_s = 1420$ мм, $\delta = 20$ мм, 5 трубоукладачів, $[\sigma] = R_2 = 293$ МПа, $W = 3,08 \cdot 10^{-2}$ м³)

Параметр $k = \frac{l}{l_1}$	Величина опорних моментів, МН·м					Довжина прогонів, м		Загальна довжина, м	Макс. напруження, МПа
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	l_1	l_2	$L = l_1 + l_2 + 4k \cdot l_1$	$\sigma_{max} = \frac{ M_{max} }{W}$
0,25	-9,638	2,045	-0,670	-1,493	-6,442	100,2	82,5	282,5	312,9
0,30	-9,492	1,856	-0,976	-0,998	-6,278	100	82,1	302,1	308,2
0,35	-9,325	1,607	-1,224	-0,832	-6,135	99,7	81,7	321,0	302,8
0,40	-9,161	1,316	-1,454	-0,850	-6,019	99,4	81,5	340,0	297,4
0,45	-9,012	0,987	-1,686	-0,982	-5,933	99,103	81,4	358,9	296,5
0,50	-8,884	0,634	-1,929	-1,195	-5,879	98,9	81,1	377,8	288,4
0,55	-8,783	0,248	-2,190	-1,469	-5,857	98,7	81,0	396,8	285,2
0,60	-8,709	0,166	-2,472	-1,793	-5,868	98,6	81,1	416,3	282,8
0,65	-8,666	-0,609	-2,778	-2,161	-5,911	98,5	81,2	435,8	281,4
0,70	-8,653	-1,082	-3,110	-2,570	-5,987	98,5	81,4	455,7	280,9
0,75	-8,673	-1,585	-3,471	-3,018	-6,097	98,5	81,7	475,7	281,6
0,80	-8,727	-2,121	-3,862	-3,504	-6,240	98,6	82,0	496,1	283,3

Зауважимо, що у всіх випадках ($k = 0,25 \dots 0,8$) максимальний момент буде під трубоукладачем №1, а також, що тільки починаючи з $k = 0,45$ виконується умова міцності (18). Зі збільшенням числа $k = 0,45 \dots 0,8$ величина максимального моменту залишається в перерізі під трубоукладачем №1, але незначно зменшується в абсолютному значенні, при цьому зростає загальна довжина піднятого трубопроводу (див. табл. 1). Отже, рекомендується для приведених вище умов приймати $k = 0,45$.

Провівши розрахунок для приведеної системи рівнянь при $k = 0,45$ були отримані наступні значення згинальних моментів: $M_1 = -9,012 \cdot 10^6$ Н·м; $M_2 = 9,866 \cdot 10^5$ Н·м; $M_3 = -1,686 \cdot 10^6$ Н·м; $M_4 = -0,982 \cdot 10^6$ Н·м; $M_5 = -5,933 \cdot 10^6$ Н·м; $l_1 = 99,103$ м; $l_2 = 81,41$ м.

Для побудови епюр поперечних сил та згинаючих моментів треба провести наступні розрахунки:

1) визначити реакції опор за формулами (21) та (22);

2) визначити навантаження на гаки трубоукладачів:

- для трубоукладача 1

$$K_1^I = \frac{ql_1}{2} + Q_{is} \frac{a}{l_1} - \frac{M_1}{l_1}; K_1^{II} = \frac{ql}{2} - \frac{M_1}{l} + \frac{M_2}{l}; K_1 = K_1^I + K_1^{II};$$

- для трубоукладачів 2 та 3

$$K_i^I = \frac{ql}{2} + \frac{M_{i-1}}{l} - \frac{M_i}{l}; K_i^{II} = \frac{ql}{2} - \frac{M_i}{l} + \frac{M_{i+1}}{l}; K_i = K_i^I + K_i^{II};$$

- для трубоукладача 4

$$K_4^I = \frac{ql}{2} + \frac{M_3}{l} - \frac{M_4}{l}; K_4^{II} = \frac{ql}{2} + Q_{oc} \frac{d}{l} - \frac{M_4}{l} + \frac{M_5}{l}; K_4 = K_4^I + K_4^{II};$$

- для трубоукладача 5

$$K_5^I = \frac{ql}{2} + Q_{oc} \frac{c}{l} - \frac{M_4}{l} - \frac{M_5}{l}; K_5^{II} = \frac{ql_2}{2} + \frac{M_5}{l_2}; K_5 = K_5^I + K_5^{II}.$$

3) провести перевірку правильності визначення реакцій опор та навантаження на гаки трубоукладачів

$$R_O + R_A + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 - Q_{is} - Q_{oc} - q(l_1 + l_2 + 4l_1 \cdot k) = 0;$$

4) визначити координати точки максимуму моментів та величини цих моментів.

За результатами розрахунків будується еюра поперечних сил та згинаючих моментів у вертикальній площині (рис. 5, б, в).

2. Згин трубопроводу у горизонтальній площині

На рис. 5, г приведена схема пружно-зігнутої осі трубопроводу в горизонтальній площині при проведенні ізоляційно-укладальних робіт суміщеним методом і використанні п'яти трубоукладачів.

Наперед невідомо, який напрямок мають горизонтальні зусилля $P_{1Г}, P_{2Г}, P_{3Г}, P_{4Г}, P_{5Г}$, а також опорний момент M_A та реакція $R_{АГ}$. Тому попередньо приймаємо напрямки цих силових факторів, так як показано на рис. 5, г. Відхилення пружної осі трубопроводу від початкового положення позначені на рис. 5, г символом "y" з відповідним індексом (наприклад y_3 – відхилення пружної осі трубопроводу від початкового положення під трубоукладачем № 3).

Для трубопроводу $D_3 = 1420$ мм, приймаємо ширину траншеї на дні $B_{mp} = 1,5 \cdot D_3$, а на верху $B = B_{mp} + 2 \cdot h_{mp} \cdot \text{tg}(\varphi_{ep})$ (φ_{ep} – кут внутрішнього тертя ґрунту), відстань від трубопроводу до берми траншеї $c = 0,2$ м.

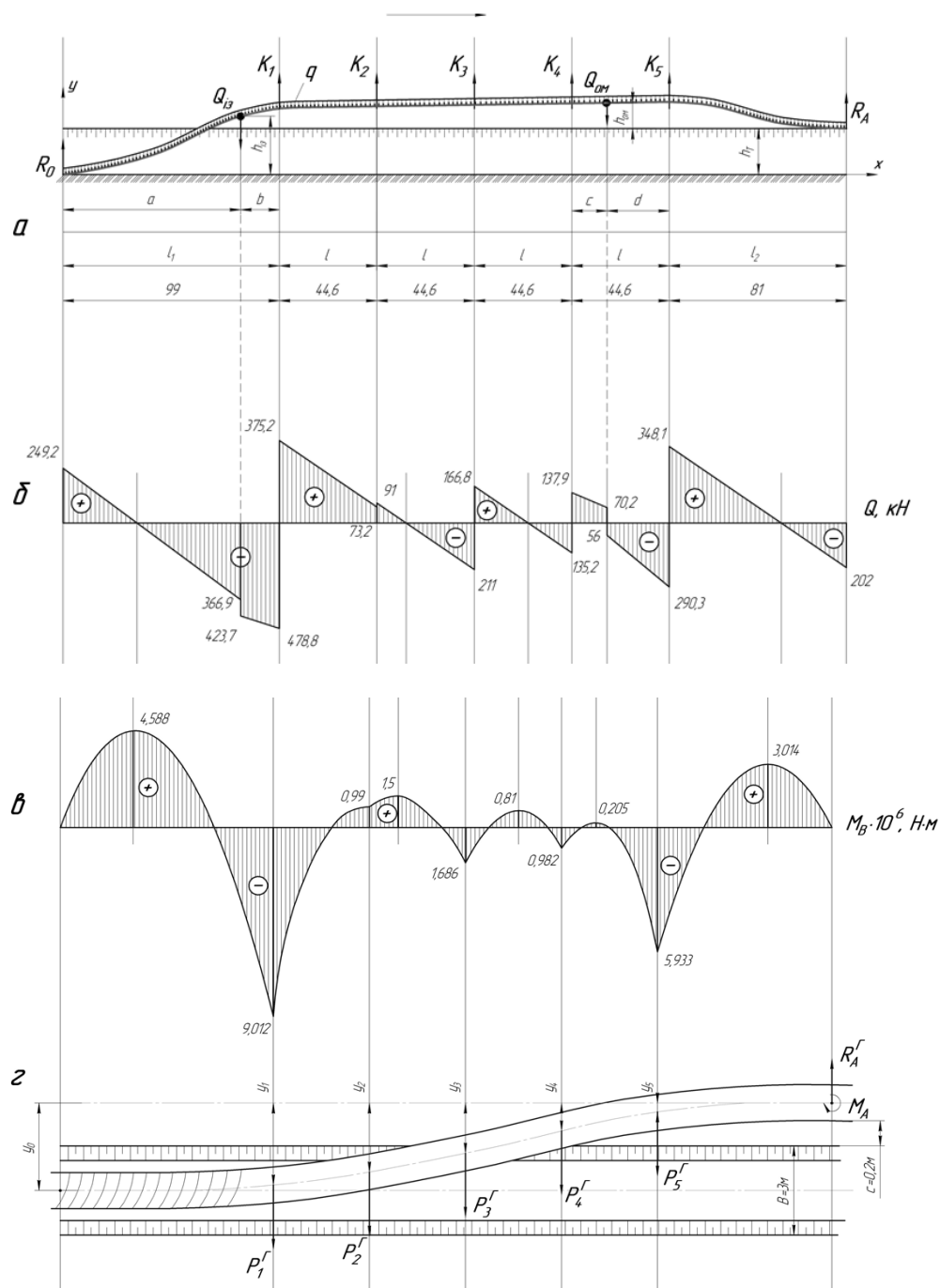


Рис. 5. Розрахункові схеми та епюри від навантажень при проведенні ізоляційно-укладальних робіт сумішним методом: а – технологічна схема ІУР сумішним методом; б – епюра поперечних сил (вертикальна площина); в – епюра згинаючих моментів (вертикальна площина); г – схема пружнозигнутої осі трубопроводу (горизонтальна площина)

Відхилення пружної осі трубопроводу від початкового положення для заданої схеми становить

$$y_0 = \frac{B}{2} + c + \frac{D_3}{2} \text{ (м)}.$$

Запишемо рівняння прогинів для точок, де діють зусилля від трубоукладачів

$$\begin{cases} EIy_5 = -M_A \frac{(l_2)^2}{2} + R_A \frac{(l_2)^3}{6} \\ EIy_4 = -M_A \frac{(l_2+l)^2}{2} + R_A \frac{(l_2+l)^3}{6} - P_5 \frac{(l)^3}{6} \\ EIy_3 = -M_A \frac{(l_2+2l)^2}{2} + R_A \frac{(l_2+2l)^3}{6} - P_5 \frac{(2l)^3}{6} - P_4 \frac{(l)^3}{6} \\ EIy_2 = -M_A \frac{(l_2+3l)^2}{2} + R_A \frac{(l_2+3l)^3}{6} - P_5 \frac{(3l)^3}{6} - P_4 \frac{(2l)^3}{6} - P_3 \frac{(l)^3}{6} \\ EIy_1 = -M_A \frac{(l_2+4l)^2}{2} + R_A \frac{(l_2+4l)^3}{6} - P_5 \frac{(4l)^3}{6} - P_4 \frac{(3l)^3}{6} - P_3 \frac{(2l)^3}{6} - P_2 \frac{(l)^3}{6} \end{cases} \quad (26)$$

Рівняння моментів відносно точки А матиме вигляд

$$P_1(4l+l_2) + P_2(3l+l_2) + P_3(2l+l_2) + P_4(l+l_2) + P_5l_2 - M_A = 0. \quad (27)$$

У вищенаведених формулах $R_A = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$.

Для перевірки складемо рівняння

$$\frac{-M_A \frac{(l_2+4l+l)^2}{2} + R_A \frac{(l_2+4l+l)^3}{6} - P_5 \frac{(4l+l)^3}{6} - P_4 \frac{(3l+l)^3}{6} - P_3 \frac{(2l+l)^3}{6} - P_2 \frac{(l+l)^3}{6} - P_1 \frac{(l)^3}{6}}{EI} - y_0 = 0. \quad (28)$$

Як видно з системи рівнянь (26) пружна лінія трубопроводу описується рівнянням $y=ax^2+bx^3$, для визначення коефіцієнтів a та b необхідно мати координати двох точок: $X_1=L_{заг}$; $Y_1=y_0$; $X_2=0,5 \cdot L_{заг}$; $Y_2=0,5 \cdot Y_1$ і скласти систему двох рівнянь. Після цього визначаємо відхилення пружної осі трубопроводу від осі траншеї y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 , які входять в систему рівнянь (26).

Розв'язок системи рівнянь (26) та рівняння (27) дасть наступні результати $P_1 = 56,429$ кН, $P_2 = -196,69$ кН, $P_3 = 273,286$ кН, $P_4 = -195,027$ кН, $P_5 = 58,503$ кН, $M_A = -856,063$ кН·м, $R_A = -3,499$ кН. При цьому перевірка (28) виконується.

Для побудови епюр поперечних сил та згинаючих моментів необхідно визначити значення згинаючих моментів в точках тримання трубоукладачами: $M_1^r = 0$; $M_2^r = -P_1l$; $M_3^r = -P_12l - P_2l$; $M_4^r = -P_13l - P_22l - P_3l$; $M_5^r = -P_14l - P_23l - P_32l - P_4l$. Також в точці опирання трубопроводу на ґрунт $MA = -P_1(4l+l_2) - P_2(3l+l_2) - P_3(2l+l_2) - P_4(l+l_2) - P_5l_2$. Крім того визначаються екстремальні значення моментів в точках екстремума x_2, x_3, x_4, x_5 .

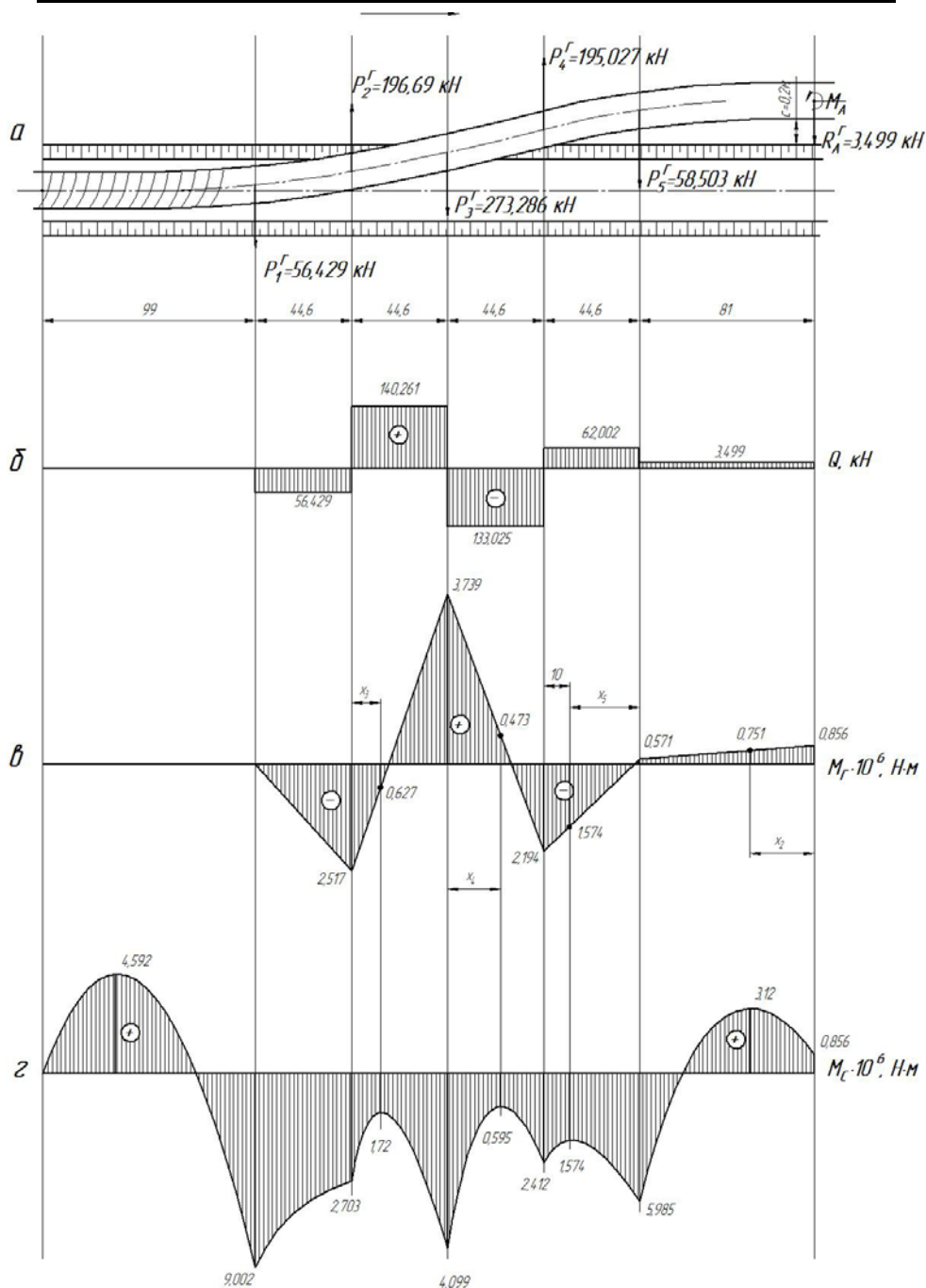


Рис. 6. Розрахункові схеми та епюри від навантажень при проведенні ізоляційно-укладальних робіт суміщеним методом: а - навантаження на трубопровід у горизонтальній площині; б – епюри поперечних сил від навантаження у горизонтальній площині; в – епюри згинаючих моментів від навантаження у горизонтальній площині; г – сумарна епюра моментів від навантаження у вертикальній та горизонтальній площинах

На рис. 6, *a* наведена схема пружно-зігнутої осі трубопроводу із силовими факторами, які отримані в результаті розрахунку (з відповідними знаками), а на рис. 6, *б, в* побудовані епюри поперечних сил та згинаючих моментів, які діють у горизонтальній площині при ізоляційно-укладальних роботах.

3. Порівняння базового розрахунку з розрахунком за методом трьох моментів

Оскільки перевірка трубопроводу на міцність під час виконання ІУР проводиться за максимальним моментом, то проведемо порівняння значень згинальних моментів в точках опирання на гак трубоукладача та в точках екстремумів x_1 та x_2 (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняння значень згинальних моментів

Переріз	Значення згинальних моментів					
	За базовим розрахунком			За розрахунком методом трьох моментів		
	M_B	M_Γ	M_C	M_B	M_Γ	M_C
Екстремум в точці x_1	7,928	0	7,928	4,592	0	4,6
Трубоукладач 1	-1,836	0	1,836	-9,012	0	9,01
Трубоукладач 2	-1,836	1,498	2,369578	0,99	-2,517	2,71
Трубоукладач 3	-1,836	1,498	2,369578	-1,686	3,739	4,1
Трубоукладач 4	-1,836	-0,59	1,92847	-1,002	-2,194	2,41
Трубоукладач 5	-1,836	-0,59	1,92847	-5,933	0,571	5,98
Екстремум в точці x_2	3,27	-0,59	3,3228	3,014	0,751	3,12

Висновки. Аналізуючи приведені розрахунки та побудовані епюри за двома способами розрахунку напруженого стану можна зробити висновок про те, що характер епюр згинальних моментів є дещо подібним, проте значення моментів відрізняються. Згідно табл. 2 максимальний момент розрахований за базовим методом буде в перерізі, де спостерігався екстремум в точці x_1 , і складає 7,928 МН·м, а максимальний момент розрахований за методом трьох моментів буде на першому трубоукладачі і дорівнюватиме 9,01 МН·м. Це може свідчити про те, що базовий спосіб дещо занижує значення згинальних моментів.

В загальному згинаючі моменти у горизонтальній площині при проведенні ІУР найбільші під трубоукладачами №2, №3 та №4. У вертикальній площині при проведенні ІУР згинаючі моменти найбільші під трубоукладачами №1 та №5.

При виконанні розрахунку методом трьох моментів було встановлено, що відношення відстані між трубоукладачами та відстані від точки опирання трубопроводу на дно траншеї до першого трубоукладача повинно бути в межах 0,45-0,5, оскільки при зменшенні цього значення не виконується умова міцності, а при його збільшенні величина максимального моменту зменшується незначно, проте зростає загальна дов-

жина піднятого трубопроводу, що ускладнює синхронність руху трубоукладачів та механізмів в ізоляційно-укладальній колоні.

Література

1. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз : [учеб. для вузов] / Р.А. Алиев, И.В. Березина, Л.Г. Телегин, Е.И. Яковлев. – М.: Недра, 1987. – 271 с.
2. Дорошенко Я.В. Спорудження магістральних трубопроводів: підручник / Я.В. Дорошенко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 563с.
3. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: Учеб. пособие / Л.И. Быков, Ф.М. Мустафин, С.К. Рафиков [и др.] – Санкт-Петербург: Недра, 2006. – 824 с.
4. Бородавкин П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
5. Сопrotивление материалов / [Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квйтка и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 665 с.
6. Тимошенко С.П. Сопrotивление материалов, т.1. Элементарная теория и задачи / С.П. Тимошенко. – М.:Наука, 1965. – 364с

*Стаття надійшла до редакційної колегії 25.12.2014 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.,
к.т.н. Костівим В.В. (м. Івано-Франківськ)*

AN ANALYSIS OF CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINE DURING PROVIDING ISOLATION AND LAYING WORKS OF PIPELINE CONSTRUCTION PROCESS

V. B. Zapukhlyak

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpathians str., 15;
e-mail: srgg@nung.edu.ua*

It is proposed to apply the method of three moments at the calculation of the stress-strain state of pipeline during providing isolation and laying works of pipeline construction process by the combined method. The analysis of existent methods of calculation of the stress-strain state is provided. Comparison of results of calculation using base methods and method of three moments and done, corresponding conclusions are acquired.

Key words: *pipeline, isolation and laying works, stress-strain state, pipe layer*