

УДОСКОНАЛЕННЯ ВІДОМОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СИЛИ ТИСКУ НА КОНСОЛЬ БАЛКОВОГО ПЕРЕХОДУ

Л.М. Гайдаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 30436,
e-mail: tznng@nuing.edu.ua

Викладено удосконалення відомого методу розрахунку вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу компенсатором з коліном, зігнутим на кут $\varphi < 90^\circ$.

Ключові слова: трубопровід, балковий перехід, компенсатор, перехідна ланка, вертикальна сила тиску компенсатора.

Изложено усовершенствование известного метода расчета вертикальной силы давления на конец консоли балочного перехода компенсатором с коленом, изогнутым на угол $\varphi < 90^\circ$.

Ключевые слова: трубопровод, балочный переход, компенсатор, переходной участок, вертикальная сила давления компенсатора.

Improving the well-known method of calculating the vertical force of pressure on the end of concole transition girder with a knee, arcuated on angle $\varphi < 90^\circ$, is expounded.

Keywords: pipeline, beam transition, compensate, intermedium, vertical force of pressure of compensate.

Постановка проблеми. В місцях перетину природних і штучних перешкод магістральними газопроводами із труб великого діаметра часто застосовують надземні балкові переходи. Для компенсації їх поздовжньої деформації, викликані температурним впливом і внутрішнім тиском, використовують компенсатори з одним коліном, зігнутим на кут $\varphi < 90^\circ$. Внаслідок тривалого часу експлуатації трубопровідних систем під впливом зовнішнього середовища в місцях спирання трубопроводу балкового переходу на ложемент опори на стінці труби розвиваються корозійні процеси, що зумовлюють передчасну втрату експлуатаційної придатності. Відновити стінку труби можливо одним із способів: безпосередньо поновити товщину стінки або підсилити її додатковими елементами. Такі види роботи вимагають підймання балкового переходу на опорах. Підймання на опори, що прилягає до компенсатора, є більш відповідальним порівняно з підйманнями на інших опорах переходу, оскільки викликає підйом вузла з'єднання консолі з компенсатором (коліна) і збільшення вертикальної сили тиску на консоль. Відомий метод [1,2] дає змогу визначити вертикальну силу тиску на кінець консолі балкового переходу від дії компенсатора з коліном, зігнутим на кут 90° , що є актуальною проблемою.

Постановка задачі. Удосконалення відомого методу розрахунку вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу компенсатором з коліном, зігнутим на кут $\varphi < 90^\circ$.

Висвітлення основного матеріалу. Для розв'язання поставленої задачі використана умова, що компенсатори з колінами, зігнутими

на кут $\varphi < 90^\circ$ і на кут $\varphi = 90^\circ$, розташовані на похилій до горизонту грані двогранного кута, утвореного півплощинами N і M [3], та схема (рис.1). Схема виконана у прямокутній системі координат з осями x , y , z з центром у точці o , розміщеним на кінці консолі. Перехідна ланка od з коліном, зігнутим на кут $\varphi < 90^\circ$, нахилена до горизонту під плоским кутом α_φ , утвореним півпрямими of і cf , не перпендикулярними до ребра af двогранного кута, з'єднує балковий перехід з підземним трубопроводом і з віссю x утворює кут φ . Уявна перехідна ланка ob з коліном, зігнутим на 90° , зображена штриховою лінією, що збігається з віссю ow , і нахилена до горизонту під плоским кутом α двогранного кута, утвореного півпрямими oa і ca , перпендикулярними до ребра af двогранного кута.

Надземні частини oa з коліном, зігнутим на кут 90° , і of з коліном, зігнутим на кут $\varphi < 90^\circ$, відповідно перехідних ланок ob і od є температурними компенсаторами. Плоский кут α_φ функціонально залежний від плоского кута α двогранного кута, який змінювався під час дослідження в діапазоні від 0° до 90° . Глибина траншеї $h_{tr} = 2.42$ м обумовлена діаметром трубопроводу 1,42 м та його заглибленням на 1 м згідно з нормами [1]. Довжина компенсатора oa з коліном, зігнутим на кут 90° , отримана із розрахунку на температурний вплив згідно норм [1] і дорівнює 30 м. Величина h_o дорівнює різниці позначок низу труби торця консолі і місця, що прилягає до виходу перехідної ланки на поверхню землі. Точки виходу перехідних ланок od і ob на поверхню землі лежать на ребрі af двогранного кута. Ребро af паралельне осі ox . Відрізки oa , of і ребро af утворюють

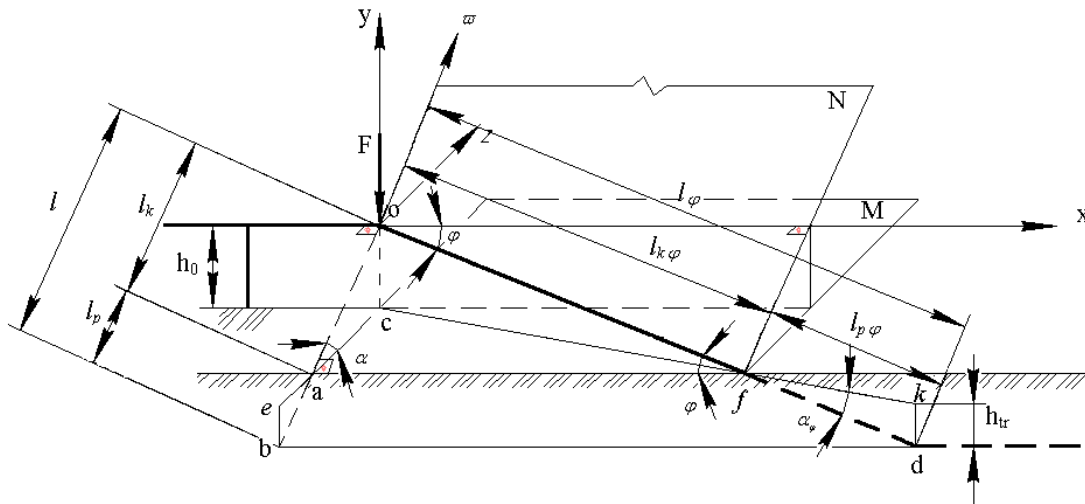


Рисунок 1 – Схема консолі з двома компенсаторами

прямокутний трикутник з прямим кутом oaf . Довжина oa дорівнює довжині компенсатора l_k з коліном, зігнутим на 90° . Надземна частина $l_{k\phi}$ перехідної ланки od дорівнює довжині компенсатора з коліном, зігнутим на кут ϕ . Кут ofa дорівнює кутові ϕ , величина якого, виходячи із практики проектування балкових переходів, відповідає одному із значень $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ або 90° . Отриманий прямокутний трикутник oaf дає змогу установити довжину компенсатора з коліном, зігнутим на кут ϕ залежно від довжини компенсатора з коліном, зігнутим на кут 90° , яка взята за базову довжину, оскільки метод її розрахунку відомий [1, 2].

Гіпотенуза of , що дорівнює довжині компенсатора $l_{k\phi}$ з коліном, зігнутим на кут ϕ , визначається із прямокутного трикутника oaf

$$l_{k\phi} = \frac{l_k}{\sin \phi} \quad (1)$$

За тригонометричною залежністю (1) можна визначити довжини компенсаторів $l_{k\phi}$ з колінами, зігнутими на кут ϕ , залежно від базової довжини компенсатора з коліном, зігнутим на кут 90° .

Перехідна ланка od довжиною l_ϕ нахилена до горизонту під плоским кутом α_ϕ і складається з надземної частини $l_{k\phi}$ і підземної $l_{p\phi}$. Довжина надземної частини of довжиною $l_{k\phi}$, що виконує роль компенсатора, визначається за формулою (1). Довжина підземної частини $l_{p\phi}$ визначається із прямокутного трикутника fdk :

$$l_{p\phi} = \frac{h_{tr}}{\sin \alpha_\phi} \quad (2)$$

Функція плоского кута $\sin \alpha_\phi$ визначається за відомим катетом h_0 і гіпотенузою $l_{k\phi}$ із прямокутного трикутника ocf

$$\frac{h_0}{l_{k\phi}} = \sin \alpha_\phi \quad (3)$$

Функцію плоского кута $\sin \alpha_\phi$ можна визначити за формулою (4) [4], коли відомий плоский кут α двогранного кута, що відповідає куту нахилу до горизонту компенсатора з коліном, зігнутим на 90° :

$$\sin \alpha_\phi = \frac{l_k}{l_{k\phi}} \sin \alpha \quad (4)$$

Після закінчення монтажних робіт і за відсутності засипки і насипу перехідна ланка одним коліном спирається на кінець консолі балкового переходу, а іншим – на ґрунт дна траншеї. Технічний стан перехідної ланки як температурного компенсатора характеризується частковим відхиленням від проектних вимог і чинних норм до компенсаторів з одним коліном, але без порушень у даних конкретних умовах вимог експлуатації, і не заважає нормальному функціонуванню системи.

Згідно з відомим методом розрахунку [2] вертикальна сила тиску на кінець консолі балкового переходу компенсатором з коліном, зігнутим на 90° , дорівнює вазі половини його довжини. Отже, вертикальна сила тиску на кінець консолі балкового переходу від перехідної ланки з коліном, зігнутим на кут $\phi < 90^\circ$, також дорівнюватиме вазі половини її довжини

$$F_{l_\phi} = \frac{q_l l_\phi}{2} \quad (5)$$

Для зручності використання формули (5) довжину перехідної ланки l_ϕ замінили сумою довжин компенсатора та підземної частини $(l_{k\phi} + l_{p\phi})$ і представили її у двох варіантах. У першому варіанті за дужки винесли $l_{k\phi}$ (6), а в другому - $l_{p\phi}$ (7):

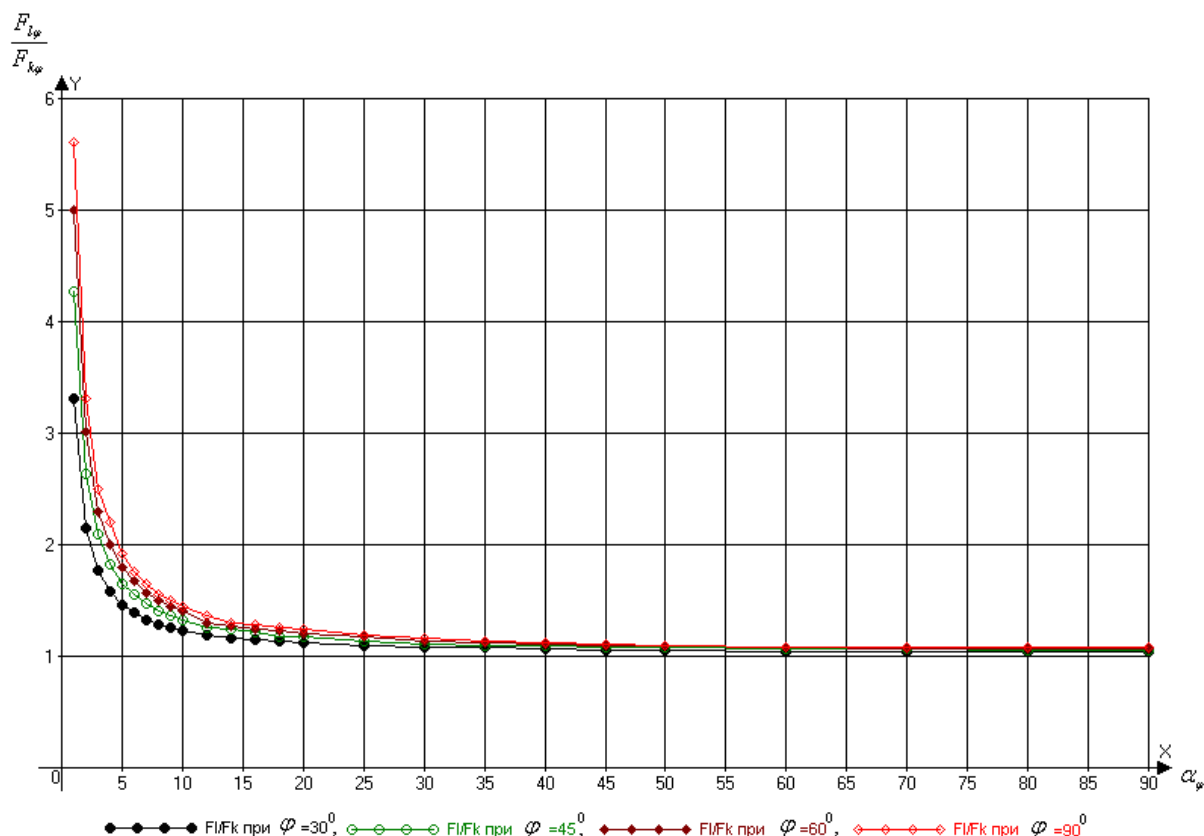


Рисунок 2 – Залежність співвідношення $F_{l\varphi} / F_{k\varphi}$ від плоского кута α_φ

$$F_{li} = \frac{q_t \left(1 + \frac{l_{p\varphi}}{l_{k\varphi}}\right) l_{k\varphi}}{2}, \quad (6)$$

$$F_{li} = \frac{q_t \left(1 + \frac{l_{k\varphi}}{l_{p\varphi}}\right) l_{p\varphi}}{2}. \quad (7)$$

Вертикальна сила тиску на кінець консолі компенсатором довжиною $l_{k\varphi}$ з коліном, зігнутих на кут φ , буде дорівнювати вазі половини його довжини

$$F_{k\varphi} = \frac{q_t l_{k\varphi}}{2}. \quad (8)$$

Поділивши формулу (6) на (8) і виконавши математичні спрощення отримали співвідношення вертикальної сили тиску на консоль від перехідної ланки до вертикальної сили тиску компенсатора

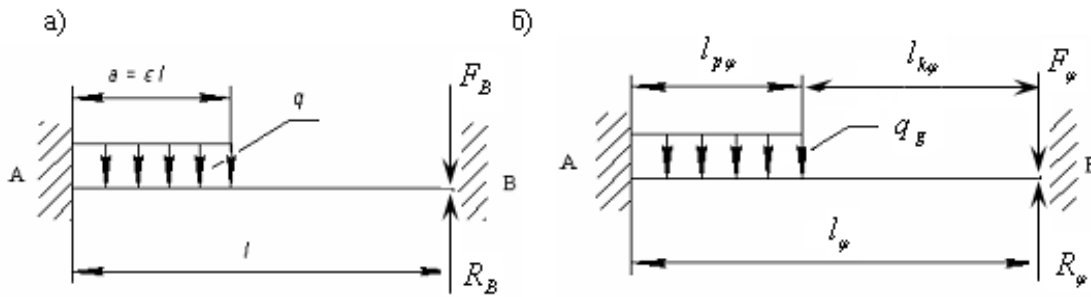
$$\frac{F_{l\varphi}}{F_{k\varphi}} = 1 + \frac{l_{p\varphi}}{l_{k\varphi}}. \quad (9)$$

Графіки (рис. 2) свідчать, що вертикальна сила тиску перехідної ланки з коліном, зігнутими на кут φ , більша вертикальної сили тиску компенсатора з таким же коліном впродовж усього діапазону зміни плоского кута α_φ . Зі зростанням плоского кута α_φ співвідношення

$F_{l\varphi} / F_{k\varphi}$ зменшується, але не досягає одиниці навіть за кута $\alpha_\varphi = 90^\circ$. Це обумовлено тим, що довжина перехідної ланки за плоского кута $\alpha_\varphi = 90^\circ$ довша її надземної частини (компенсатора) на величину глибини траншеї.

Для малих значень величин плоских кутів α_φ співвідношення $F_{l\varphi} / F_{k\varphi}$ дорівнює різним числовим значенням (рис. 2). Наприклад, при $\varphi = 90^\circ$, $\alpha_\varphi = 1^\circ$, $F_{l\varphi} / F_{k\varphi} = 5,61$; при $\varphi = 45^\circ$, $\alpha_\varphi = 1^\circ$, $F_{l\varphi} / F_{k\varphi} = 4,27$ і т. п.). Це пояснюється тим, що довжина надземної частини перехідної ланки $l_{k\varphi}$ залежить від кута згину коліна. За формулою (1), чим менший кут згину коліна, тим довша надземна частина $l_{k\varphi}$ і навпаки, чим більший кут згину коліна, тим коротша надземна частина, що підтверджує розташування графіків на рис.2. Із формули (1) випливає, що коли кут $\varphi = 90^\circ$ надземна частина перехідної ланки $l_{k\varphi}$ дорівнює довжині компенсатора l_k з коліном 90° .

Вертикальна сила тиску на консоль балкового переходу від перехідної ланки $F_{l\varphi}$, коли кут нахилу до горизонту $\alpha_\varphi = 90^\circ$ більша на вагу половини глибини траншеї h_{tr} , від сили тиску компенсатора $F_{k\varphi}$, що обумовлює вели-



а – балка [6]; б – перехідна ланка у вертикальній площині

Рисунок 3 – Розрахункові схеми

чину співвідношень $F_{l\varphi}/F_{k\varphi}$ 1,04; 1,057; 1,0 7 і 1,08 відповідно кутам згину колін $\varphi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і 90° . Це ще раз свідчить про те, що вертикальна сила тиску перехідної ланки більша за вертикальну силу тиску компенсатора.

Після закінчення монтажних робіт перехідна ланка під власною вагою прогинається у вертикальній площині. Значення прогину залежить від розрахункової схеми перехідної ланки. Якщо знехтувати гнучкістю коліна із площини згину, то найбільш правдоподібно відтворює величину прогину перехідної ланки у вертикальній площині розрахункова схема балки із жорстко закріпленими кінцями на опорах.

Зворотне засипання траншеї, як правило, виконується механізованим способом, приблизно на всю глибину траншеї, з одного проходу машини. Застосування трамбувальних плит для ущільнення засипки неможливе, оскільки це може призвести до пошкодження трубопроводу. У такому випадку відбувається природне ущільнення засипки під дією власної ваги. Природне осідання засипки складає: для дрібних пісків і супіску 5-6%, для суглинків - 6-8% і для глин -10% від висоти засипки і насипу [5].

У процесі засипання траншеї об'єм пазух і проміжок між дном траншеї і трубопроводом заповнюється поступово сипкою засипкою, яка за рахунок приросту прогину перехідної ланки легко ущільнюється і обумовлює величину осідання. Ущільнена сипка засипка створює опір прогину перехідної ланки значно менший, ніж опір ґрунту дна траншеї з не порушеною структурою. Можна припустити, що ущільнена сипка засипка траншеї не створить належного опору, який зміг би вплинути на результат розрахунку вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу.

Технічний стан надземної частини після засипання траншеї і створення насипу на підземній частині перехідної ланки відповідає проектним вимогам і чинним нормам до компенсатора з одним коліном.

Для визначення вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу, від дії ваги насипу на підземній частині перехідної ланки, використали відоме рівняння для балки [6], розрахункова схема якої зображена на рис. 4,а.

Балка опирається на опору В кінцем відрізка, вільного від навантаження q , так як і пере-

хідна ланка спирається на консоль балкового переходу кінцем надземної частини, що є температурним компенсатором. Розрахункові схеми балки (рис. 4,а) і перехідної ланки (рис. 4,б) у вертикальній площині є аналогічними.

Реакція опори R_B , яку визначаємо для балки з рівняння (10), дорівнює вертикальній силі тиску F_B балки на опору, тобто

$$F_B = R_B = \frac{qa^2}{2l} - ql(k_1 - k_2). \quad (10)$$

Для визначення вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу перехідною ланкою провели заміну вихідних даних і у формулі (10) (рис. 3,б). Так, вертикальну силу тиску на опору F_B прирівняли до сили тиску на кінець консолі $F_{g\varphi}$. Ділянку балки a з рівномірно розподіленим навантаженням q замінили довжиною підземної частини перехідної ланки $l_{p\varphi}$ з навантаженням q_g , що створює шар насипу, рівний заглибленню трубопроводу за нормативними вимогами [1] та за методом, рекомендованим у [5, 7, 8]. Прогін балки l прирівняли довжині перехідної ланки l_φ , яку замінили сумою довжин компенсатора і підземної її частини $(l_{k\varphi} + l_{p\varphi})$. У результаті отримали формулу :

$$F_g = \frac{q_g l_{p\varphi}^2}{2(l_{k\varphi} + l_{p\varphi})} - q_g (l_{k\varphi} + l_{p\varphi})(k_{1\varphi} - k_{2\varphi}), \quad (11)$$

де $k_{1\varphi}, k_{2\varphi}$ – коефіцієнти, обчислені за формулами, взятими із [6].

$$k_{1\varphi} = \varepsilon_\varphi^2 \frac{3 - 4\varepsilon_\varphi + 1,5\varepsilon_\varphi^2}{6}; \quad (12)$$

$$k_{2\varphi} = \varepsilon_\varphi^2 \frac{\varepsilon_\varphi - 0,75\varepsilon_\varphi^2}{3}, \quad (13)$$

де:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\varphi &= \frac{l_{p\varphi}}{l_\varphi} = \frac{l_{p\varphi}}{l_{p\varphi} + l_{k\varphi}} = \\ &= \frac{l_{p\varphi}}{(1 + \frac{l_{k\varphi}}{l_{p\varphi}})l_{p\varphi}} = \frac{1}{1 + \frac{l_{k\varphi}}{l_{p\varphi}}} = \frac{1}{\beta_\varphi}. \end{aligned} \quad (14)$$

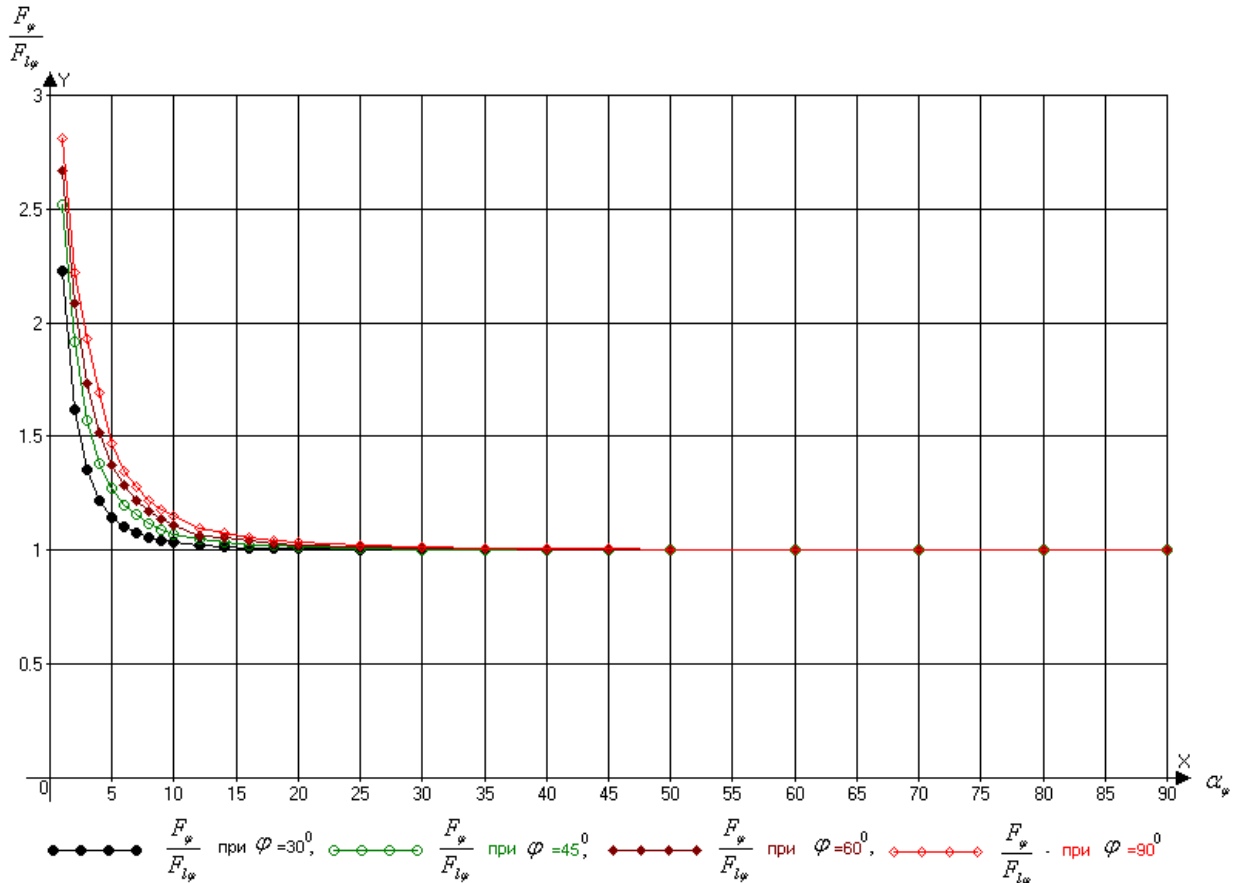


Рисунок 4 – Залежність співвідношення $F_\varphi / F_{l\varphi}$ від плоского кута α_φ

У формули (12) і (13) підставили (14) і після спрощень отримали

$$k_{1\varphi} = \frac{1}{2\beta_\varphi^2} - \frac{2}{3\beta_\varphi^3} + \frac{0,25}{\beta_\varphi^4}, \quad (15)$$

$$k_{2\varphi} = \frac{1}{3\beta_\varphi^3} - \frac{0,25}{\beta_\varphi^4}. \quad (16)$$

Різниця коефіцієнтів

$$k_{1\varphi} - k_{2\varphi} = \frac{1}{2\beta_\varphi^2} - \frac{1}{\beta_\varphi^3} + \frac{1}{2\beta_\varphi^4}. \quad (17)$$

Підставивши (14) і (17) у формулу (11), одержали формулу (18) для визначення вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу від ваги насипу на підземній частині перехідної ланки

$$F_{g\varphi} = \left(\frac{1}{\beta_\varphi^2} - \frac{1}{2\beta_\varphi^3} \right) q_g l_{p\varphi}, \quad (18)$$

де: $F_{g\varphi}$ – сила тиску на кінець консолі від ваги насипу;

q_g – розподілене навантаження від ваги насипу.

Сумарна вертикальна сила тиску на кінець консолі балкового переходу дорівнює сумі сил тиску, визначених за формулами (7) і (18):

$$F_\varphi = F_{l\varphi} + F_{g\varphi} =$$

$$q_t \left(1 + \frac{l_{k\varphi}}{l_{p\varphi}} \right) l_{p\varphi} = \frac{q_t \left(1 + \frac{l_{k\varphi}}{l_{p\varphi}} \right) l_{p\varphi}}{2} + \left(\frac{1}{\beta_\varphi^2} - \frac{1}{2\beta_\varphi^3} \right) q_g l_{p\varphi}. \quad (19)$$

Поділивши формулу (19) на (7), отримали співвідношення сил $F_\varphi / F_{l\varphi}$:

$$\frac{F_\varphi}{F_{l\varphi}} = 1 + \left(\frac{2}{\beta_\varphi^3} - \frac{1}{\beta_\varphi^4} \right) \frac{q_g}{q_t}. \quad (20)$$

На рис. 4 зображено ряд графіків, кожен з яких показує залежність сумарної вертикальної сили тиску на консоль балкового переходу від плоского кута α_φ та кута згину коліна φ . Аналіз свідчить, що кожна перехідна ланка з коліном, зігнутим на кут $\varphi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і 90° , має на графіку свою точку, в якій приріст вертикальної сили тиску на консоль від ваги насипу не перевищує 1%. Цим точкам відповідають плоскі кути $\alpha_\varphi = 18^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ і 35° , за якими можна встановити діапазони $0 - 18^\circ; 0 - 25^\circ; 0 - 30^\circ$ і $0 - 35^\circ$ впливу ваги насипу на сумарну вертикальну силу тиску на консоль. Водночас вони є умовою використання формули (19), тому максимальне значення величини плоского кута α_φ у кожному діапазоні можна назвати граничним

α_{gr} . Величини граничних кутів α_{gr} мають розбіжність, обумовлену різними значеннями довжин перехідних ланок l_{φ} з колінами, зігнутими на кут φ , внаслідок сталої довжини підземної частини $l_{p\varphi}$ та за одного і того ж значення величини плоского кута α_{φ} . За умови $\alpha_{\varphi} > \alpha_{gr}$ у формулі (19) залишається лише один член справа, що відповідає формулі (7) для розрахунку вертикальної сили тиску на консоль балкового переходу. Довжина перехідної ланки скорочується за рахунок підземної частини до глибини траншеї. Тому, співвідношення $F_{\varphi}/F_{l\varphi}$ за своєю величиною дорівнює одиниці, про що свідчать графіки, крива яких збігається з прямою.

Висновки. У результаті дослідження удосконалено відомий метод розрахунку вертикальної сили тиску на консоль балкового переходу перехідної ланки з коліном, зігнутим на будь-який кут φ , з врахуванням ваги насипу на її підземній частині.

Визначено діапазони кута α_{φ} нахилу до горизонту перехідної ланки з коліном, зігнутим на кут $\varphi = 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$ і 90° , у межах якого необхідно враховувати приріст вертикальної сили тиску на консоль балкового переходу від ваги насипу.

Отримана залежність довжини підземної частини перехідної ланки від плоского кута α_{φ} і глибини траншеї, що зумовлює визначення сили тиску на консоль від ваги насипу на ній.

Отримані результати мають практичне і теоретичне значення для газотранспортної галузі, оскільки науково уточнюють чинники, що впливають на проектні рішення під час розрахунку трубопровідних систем та на розробку технології відновлювальних робіт балкових переходів, прокладених через перешкоди.

Література

- 1 СНиП 2.05.06 – 85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТР Госстрой СРСР, 1985. – 51 с.
- 2 Петров П.П. Надземная прокладка трубопроводов / П.П. Петров, В.В. Спиридонов. – М.: Недра, 1965. – 443 с.
- 3 Погорелов А.В. Элементарная геометрия / А.В. Погорелов. – М.: Наука, 1974. – 207 с.
- 4 Гайдаш Н.Л. Связь двугранных и линейных углов в надземных переходах трубопроводов / Н.Л. Гайдаш, Л.С. Шлапак // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1981. – № 18. – С.148.
- 5 Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов / Г.К. Клейн. – М.: Изд. лит. по стр. 1969. – 240 с.
- 6 Справочник проектировщика: под ред. Уманского А.А. – М.: Стройиздат.1972. – 599 с. – Т.1. Расчетно-теоретический.
- 7 Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1979. – 270 с.
- 8 Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1986. – 224 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
22.03.10

Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.