

# ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 621.643.001.24

## БАНДАЖУВАННЯ ТРУБОПРОВОДІВ ЯК ОДИН ІЗ ШЛЯХІВ ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬЦЕВИХ НАПРУЖЕНЬ

<sup>1</sup>Л.С. Шлапак, <sup>2</sup>М.П. Лінчевський, <sup>2</sup>В.О. Саркісов

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342) 506612,  
e-mail: ztk@iifn.org.ua

<sup>2</sup> АТ “Газтранзит”, 04053, м. Київ-53, вул. Артема, 26-В, тел. (044) 4902525

Ефективність трубопровідного транспорту значною мірою залежить від технічного стану. Основним видом навантаження, що визначає технічний стан лінійної частини магістральних та технологічних трубопроводів є внутрішній тиск продукту. Наявність дефектів у металі труб (корозійні каверни, вм'ятини, тріщини), які є концентраторами напружень, у поєднанні з напруженнями від внутрішнього тиску, суттєво знижують надійність експлуатації трубопровідних систем, а в окремих випадках, можуть призводити до виникнення аварійних ситуацій. Найбільш перспективним напрямком у підтриманні трубопроводів у працездатному стані є бандажування, тобто підсилення стінки труби силовими елементами (стрічками, дротом, кільцями). За рахунок бандажування можна значно знизити рівень кільцевих напружень у трубопроводі, перевівши таким чином критичні дефекти у докритичні та подовжити міжремонтний термін експлуатації трубопровідних систем.

Наведено методику розрахунку товщини композитного бандажу для підсилення несучої здатності та ремонту дефектних ділянок газонафтопроводів. Показано, що при визначенні товщини композитного бандажу необхідно враховувати внутрішній тиск у трубопроводі, за якого встановлюються композитні бандажі, що суттєво впливає на їх геометричні параметри.

Ключові слова: бандаж, деформації, напружений стан, кільцеві напруження

Эффективность трубопроводного транспорта в большей степени зависит от технического его состояния. Основной нагрузкой, определяющей техническое состояние линейной части как магистральных, так и технологических трубопроводов является внутреннее давление продукта. Наличие дефектов в металле труб (коррозионные каверны, непровары, вмятины, трещины), являющиеся концентраторами напряжений, в сочетании с напряжениями от внутреннего давления, существенно снижает надежность эксплуатации и, в отдельных случаях, может приводить к возникновению аварийных ситуаций. Наиболее перспективным направлением поддержания трубопроводов в работоспособном состоянии является бандажирование, то есть усиление стенки труб силовыми элементами (лентами, проволокой, кольцами). За счет бандажирования можно существенно снизить уровень кольцевых напряжений в трубопроводе, переведя, таким образом, критические дефекты в состояние докритических, и продлить тем самым межремонтный период эксплуатации трубопроводных систем.

Приведена методика расчета толщины композитного бандажа для повышения несущей способности и ремонта дефектных участков магистральных и технологических газонефтепроводов. Показано, что при определении толщины композитного бандажа необходимо учитывать внутреннее давление в трубопроводе, при котором устанавливаются композитные бандажи, что существенно влияет на их геометрические параметры.

Ключевые слова: бандаж, деформации, напряженное состояние, кольцевые напряжения

The efficiency of pipeline transport depends to some degree on the technical condition. The main type of loading which defines the technical condition of linear part of main and technological pipelines is the internal pressure of the product. The defects availability in pipes metal (corrosion cavities lack of penetration, dents, cracks) which are the concentrators of stresses auf with the combination of stresses causes by internal pressure they substantially decrease the safely of pipeline systems operation, and some cases they can lead to appearance of situations of emergency. The most prospective trend in maintaining pipelines in their operational condition is binding, that is wall pipe reinforcement by strengthening elements (belts, wires, collars). Pie to binding the level of

*circular stresses can be easily reduced in the pipeline by transferring critical defects into pre-critical and to continue inter repair period of pipeline systems operation.*

*Then is the technique of calculation composite binding for reinforcement of carrier ability and repair of defected parts of oil and gas pipelines. Alt has teen shown that in determining the thickness of composite binding it is necessary to takes into account the internal pressure in the pipeline under which composite binding is installed which significantly influences on their geometric parameters.*

Keywords: stressed condition, binding, deformation (strain), circular stresses

Україна володіє розвиненою трубопровідною мережею для транспортування нафти і газу, якою на даний час транспортується близько 80% нафти, газу, конденсату. Основною перевагою даного виду транспорту є відносно невисока вартість переміщення транспортуемого продукту, можливість транспортування його на великі відстані (декілька тисяч кілометрів), висока продуктивність, чітка ритмічність процесу транспортування і повна автоматизація всіх процесів. Однак необхідно відмітити, що ефективність трубопровідного транспорту значно знижується внаслідок відмов з технічних причин, що обумовлені рядом факторів, найважливішими з яких є низька якість матеріалу, недосконала технологія виготовлення труб, недосконала технологія транспортування труб до місця спорудження, низька якість будівельно-монтажних робіт, порушення режимів експлуатації, помилка при проектуванні, відпрацювання ресурсу.

Відмова на трубопроводі, як правило, носять суттєвий збиток народному господарству через те, що простояє дороговартісне обладнання, споживач не отримує сировину, внаслідок чого порушується його ритм роботи. Експлуатуючі організації несуть збитки через зривання плану поставок, через незворотну втрату частини продукту при вибоках, а також через необхідність проведення ремонту. Особливо необхідно відмітити відмови, пов'язані з порушенням герметичності трубопроводів. Витоки вуглеводнів в атмосферу часто супроводжується потужними вибухами і пожежами, які призводять до обширного забруднення довкілля, знищення рослинного і тваринного світу, а також людським жертвам.

Таким чином, треба визнати, що сучасні потужні нафтогазопроводи є об'єктами підвищеної небезпеки і, при недостатній їх надійності, можуть бути причиною екологічних катастроф. Тому проблемі оцінки поточного технічного стану трубопровідних систем та забезпечення високої їх надійності експлуатації потрібно приділяти постійну увагу.

Найбільш перспективним напрямком у підтриманні трубопроводів у працездатному стані є бандажування [1], зокрема для магістральних нафтогазопроводів, пропускна здатність яких прямо пропорційна робочому внутрішньому тиску. Ефективним видом бандажа при цьому вважається навивання високоміцного профілю (дріт, стрічка, склопластик). Бандажування доцільно застосовувати при відновленні несучої здатності ослаблених ділянок, підвищенні несучої здатності всього трубопроводу або його відповідальних ділянок, а також при ліквідації свищів та ремонті дефектів.

Бандажовані труби знаходять широке застосування при спорудженні трубопроводів за кордоном [2, 3]. Бандажування вигідно відрізняється від відомих конструкцій, оскільки дозволяє суттєво підвищити продуктивність діючих трубопроводів. Ефективним є також використання бандажів для підсилення несучої здатності технологічних трубопроводів об'язки компресорних (КС) і насосних (НС) станцій, а також можуть бути застосовані для зменшення рівня вібрацій за рахунок збільшення моменту опору поперечного перерізу трубопроводу, підсиленого бандажем.

Зміцнюючі бандажні-оболонки зазвичай виготовляють з металів або композитів. Найбільш поширеним представником композитних матеріалів є склопластик, який володіє комплексом фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей [4]. Завдяки високій міцності, добрій хімічній стійкості і ізоляційним властивостям бандажі із склопластиків виконують одночасно функції як зміщення так і ізоляції.

Основним критерієм вибору матеріалу бандажа є його модуль пружності та межа плинності. Модуль пружності бандажа повинен бути не нижче модуля пружності матеріалу труб, границя плинності також повинна бути не нижчою, а у випадку забезпечення попередньо-напруженого стану, повинна бути значно більшою.

Модуль пружності склопластиків на порядок нижчий за модуль пружності сталі, як і значно нижча границя довготривалої міцності від границі плинності сталі. Іншою особливістю сумісної роботи сталі і склопластику є те, що ефективна робота склопластика характеризується деформаціями від 1,5% до 2,5%, а сталь деформується пружно тільки на 0,2% ... 0,3%.

Навантаження композитного матеріалу до низького рівня зменшує ефективність бандажування, а композити на основі вуглецевих і борних волокон з модулем пружності у 3 ... 5 разів вищим, ніж у склопластиків, що володіють підвищеною повзучістю [5].

Тому задача розроблення ефективного способу бандажування трубопроводів в трасових умовах без зупинки перекачування продукту, тобто трубопроводів, що знаходяться в напруженому стані, є надзвичайно актуальною.

Беручи до уваги, що пропускна здатність магістральних нафтогазопроводів прямо пропорційна внутрішньому тиску, як основному внутрішньому навантаженню, що формує напружено-деформований стан трубопроводу, розглянемо задачу визначення товщини бандажу з умови формування заданого напружено-деформованого стану.

Нехай на трубопровід з товщиною стінки  $\delta_T$  нанесений без попереднього натягу композитний бандаж товщиною  $h$ . Трубопровід навантажений внутрішнім тиском  $p$ , що створює у стінках труби та бандажу напруження, які становлять відповідно  $\sigma_1^P$  та  $\sigma_1^c$ . Запишемо умову рівноваги сил, що діють у поперечному перерізі труби

$$pR = \sigma_1^P t + \sigma_1^c h, \quad (1)$$

де  $R$  – внутрішній радіус труби.

На практиці найчастіше виникає задача про визначення товщини бандажу, який би забезпечив у трубопроводі напруження  $\sigma_1^P$  заданої величини, а напруження у бандажі  $\sigma_1^c$  не перевищували певної межі  $[\sigma_{1adm}^c]$  (як правило, такою межею є границя плинності матеріалу бандажу  $\sigma_{1T}^c$ ). Визначити обидва параметри бандажу ( $\sigma_1^c$  і  $h$ ) з рівняння (1) можна, коли відома залежність одного параметру, (наприклад  $\sigma_1^c$ ), від всіх інших.

Знайдемо цю залежність. Для спрощення розрахунків вважатимемо, що матеріал труби та бандажу працює в пружній області, для якої справджується закон Гука:

$$\sigma_1^P = \varepsilon_1^P E_1^P, \quad (2)$$

де:  $\varepsilon_1^P$  – відносна кільцева деформація матеріалу труби;

$E_1^P$  – модуль пружності матеріалу труби (для сталі  $E_1^P = 2,06 \cdot 10^5$  МПа). Аналогічно, для бандажу закон Гука запишеться у вигляді:

$$\sigma_1^c = \varepsilon_1^c E_1^c. \quad (3)$$

Оскільки бандаж намотується на трубу без зазорів, то відносна кільцева деформація труби і бандажу будуть рівні, тобто:

$$\varepsilon_1^c = \varepsilon_1^P. \quad (4)$$

На основі рівнянь (2), (3) і (4) можна записати наступну залежність, яка пов'язує напруження у трубі з напруженнями у бандажі:

$$\sigma_1^c = \sigma_1^P \frac{E_1^c}{E_1^P}. \quad (5)$$

Підставивши (5) у рівняння (1), отримаємо формулу для визначення товщини бандажу при заданому рівні напружень у трубі:

$$h = \frac{pR - \sigma_1^P t}{\sigma_1^P} \cdot \frac{E_1^P}{E_1^c}. \quad (6)$$

Слід зауважити, що за допомогою бандажів, напруження у трубі можна зменшити лише до певної величини, яка залежить від властивостей бандажу.

Бандажування труби, не навантаженої внутрішнім тиском дає змогу суттєво зменшити товщину стінки бандажу, а також збільшити використання несучої здатності бандажу.

Проте часто на практиці виникає необхідність бандажування діючого трубопроводу, який неможливо зупинити в силу певних обставин. В таких випадках бандажування необхідно проводити без зупинки перекачування транспортуемого продукту, проте можливо знизити тиск транспортування до величини  $p_0 < p$ .

У цьому випадку при нанесенні композитного бандажу необхідно врахувати початкові напруження в трубі, які створені внутрішнім тиском  $p_0$ , отже вираз (3) тоді набуде такого вигляду:

$$\sigma_1^P = \varepsilon_1^P E_1^P + \sigma_{10}^c, \quad (7)$$

де  $\sigma_{10}^c$  – напруження в трубі, створені тиском  $p_0$ ;

$$\sigma_{10}^c = \frac{p_0 R}{t}. \quad (8)$$

Відповідно, формула для визначення товщини бандажу прийме вигляд:

$$h = \frac{pR - \sigma_1^P t}{\sigma_1^P - p_0 R} \cdot \frac{E_1^P}{E_1^c}. \quad (9)$$

Як приклад наведемо розрахунки, що ілюструють даний підхід, що має за мету зменшити рівень кільцевих напружень у трубопроводах при експлуатації.

Для трубопроводу  $D_3 \times \delta = 820 \times 10$  мм, що працює під тиском  $p = 6,5$  МПа номінальні кільцеві напруження складають 260 МПа. Для того, щоб знизити рівень кільцевих напружень до значення 240 МПа, необхідно використати бандаж товщиною  $h = 5,8$  мм (характеристики бандажу:  $[\sigma_{1adm}^c] = 80$  МПа,  $E_1^c = 0,3 \cdot 10^5$  МПа). При цьому, напруження у бандажі складуть 34 МПа, що становить 43% від допустимого.

Якщо цей же трубопровід  $D_3 \times \delta = 820 \times 10$  мм, що працює під тиском  $p = 6,5$  МПа (номінальні кільцеві напруження складають 260 МПа), для зниження рівня кільцевих напружень до 240 МПа бандажувати при залишковому тиску у трубопроводі  $p_0 = 3,5$  МПа, то необхідно використати бандаж товщиною  $h = 14$  мм (характеристики бандажу:  $[\sigma_{1adm}^c] = 80$  МПа,

$E_1^c = 0,3 \cdot 10^5$  МПа). При цьому, напруження у бандажі складуть 14,3 МПа, що становить 17,8% від допустимого.

Отже розрахунки свідчать, що бандажування трубопроводів за високих робочих тисків у трубопроводі є нерациональним, оскільки збільшується товщина бандажу, а використання несучої здатності бандажу зменшується. Ефективним стає бандажування трубопроводу попередньо натягнутим бандажем, чого можна досягти шляхом зниження робочого тиску у трубопроводі при встановленні бандажів або використанням у конструкції бандажів попередньо навантажених елементів, зокрема армування бандажу металевими стрічками.

*Література*

- 1 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем [Текст] / И.И. Мазур, О.М. Иванов. – М: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1004 с.
- 2 «Pipe Line Ind.», 1975. 1, vol. 42. N1.
- 3 Определение предельного давления для бандажированных труб [Текст] / Ю.И. Матвеев, А.Н. Моношков, В.А. Лужин, В.А. Пустин // Строительство трубопроводов. – 1970. – №12. – С. 18-20
- 4 Смирнов А.И. Об эффективности бандажирования труб и цилиндрических сосудов [Текст] / Ф.И.Смирнов // Проблемы прочности. – 1993. – №12. – С. 77-79 .
- 5 Заварухин Ю.Ю. К расчету предельного состояния бандажированных труб [Текст] / Ю.Ю. Заварухин, А.А. Остсемин. // Проблемы прочности. – 1990. – №1. – С. 76-81 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
03.03.11  
Рекомендована до друку професором  
В.Я. Грудзом*