

УДК 539.3:621.001.2

РОЗРАХУНОК БАНДАЖОВАНОГО ТРУБОПРОВОДУ**В. І. Кравцов**, д-р техн. наук, проф.; **В. В. Комаров**, **Я. В. Чкана**

Національний авіаційний університет

akvarobotec@narod.ru

Запропоновано спосіб розрахунку трубопроводів великого діаметра для транспортування нафти і газу при підвищенні міцності та надійності через бандажування. Проаналізовано і наведено коротку характеристику способу числового розрахунку. Розглянуто особливості навивання бандажу на трубу-основу. Представлено результати розрахунків бандажованого трубопроводу за допомогою запропонованої методики, одержано значення внутрішніх зусиль та моментів у безрозмірних величинах.

Ключові слова: міцність, надійність, зусилля, тиск, трубопровід, бандаж.

It is shown the method of calculation of increase of durability and reliability of underground pipelines of large-break is offered through banding at transporting of oil and gas. An analysis over is brought and short description of method is given. Considered features to the coiling bracer on pipe-basis. Presented results of calculations of the shrouded pipeline by means of the offered methods, got values of internal efforts and moments in dimensionless sizes.

Keywords: durability, reliability, effort, pressure, pipeline, bracer.

Вступ

Незважаючи на те, що способи розрахунків трубопроводів мають давню історію, на сьогодні, коли з'являються нові технології використання їх різних типів і геометричних форм у нафтовій і газовій промисловості, у літакобудуванні тощо, ще є багато проблем у засобах їх розрахунків, що змогли б значно алгоритмізувати й удосконалити визначення їх напружено-деформованого стану.

Постановка проблеми

У процесі експлуатації трубопроводу зазнають різного впливу від навантажень, що можуть бути непередбачені за експлуатаційними параметрами. До зовнішніх впливів на трубопроводу відносять можливі навантаження при виробництві різних робіт поблизу нафтопроводу, наїзди важкого транспорту, зсуви, землетруси, вибухи тощо. Результати аналізів відмов свідчать про те, що однією з основних причин пошкоджень трубопроводів є вплив зовнішніх сил, що призводить до утворення поверхневих ум'ятин, тріщин, тріщин у вм'ятиних, розривів у зварних швах і по тілу труби.

Найпоширеніші пошкодження, що виникають у результаті проведення ремонтних або будівельних робіт у безпосередній близькості від діючого трубопроводу, належать до потенційно найбільш небезпечних. Необхідно своєчасно оцінювати безпеку таких пошкоджень і можливість подальшої експлуатації пошкодженої ділянки трубопроводу.

Через зовнішні впливи на вітчизняних нафтопроводах відбувається більше 5 % аварій від загального їх числа, а за збитком вони посідають перше місце.

За наявності зовнішнього тиску, що перевищує деяку критичну величину, зона втрати стійкості може поширитися по трубопроводу на значну відстань від місця початкового пошкодження. Це явище отримало назву лавинного змінання у зв'язку з великою швидкістю поширення вм'ятини по довжині трубопроводу.

Після пуску трубопроводу в експлуатацію виникають додаткові навантаження, зумовлені внутрішнім тиском і температурою продукту, що перекачується.

Внаслідок дії цих навантажень у трубопроводі може мати місце втрата стійкості. Пружне деформування може досягати величин, сумірних з розмірами поперечного перерізу, і після зняття навантажень, що зумовили це деформування, поперечний переріз труби може набувати свою первинну форму.

Напружено-деформований стан і закритичну поведінку при такому трансформуванні форми необхідно дослідити як з точки зору оцінки її працездатності, так і для оцінки її поведінки в аварійних ситуаціях.

Одним із засобів збільшення несучої здатності та надійності трубопроводу є збільшення жорсткості його перерізу на дискретних ділянках по довжині, тобто — бандажування.

Аналіз досліджень і публікацій

Наукові праці багатьох відомих авторів присвячені в основному дослідженню тільки напружено-деформованого стану і стійкості трубопроводів у їх агрегатному або локальному стані [1; 2; 3; 4].

Однак існує й інше, не менш важливе питання — підвищення міцності та надійності трубо-

проводів завдяки бандажуванню — навиванню високоміцного профілю на поверхню труб, що випускаються промисловістю за звичайною технологією. Досліджень у цьому напрямі значно менше [5].

Основна частина

Основна ідея цієї конструкції така: за допомогою високоміцної, попередньо розтягнутої обмотки перерозподілити зусилля в конструкції таким чином, щоб розвантажити трубу-основу (зробити більш тонкою, а отже й більш рентабельною) і довести ефективність її роботи до рівня сфери за рахунок вирівнювання поздовжніх і кільцевих напружень у трубі, що підвищує міцність і надійність трубопроводу (рис. 1).

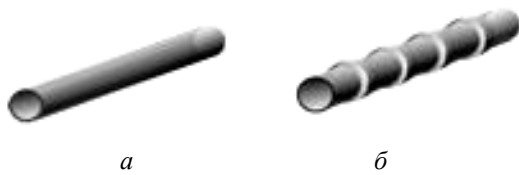


Рис. 1. Звичайна труба (а) та підсилена бандажуванням (б)

Таке зміцнення, зокрема, актуальне для магістральних підземних газо- та нафтопроводів, пропускна здатність яких прямо пропорційна робочому тиску.

Найбільш ефективним видом бандажа при цьому вважають навивання високоміцного профілю на трубу-основу або під кутом до поздовжньої осі труби, або в кільцевому напрямленні без нахилу перпендикулярно до твірної труби, тобто під кутом 90° . Відмінність похилого намотування від прямого є в тому, що воно здатне витримувати не тільки кільцеві, а й поздовжні навантаження, які виникають в трубі. З іншого боку, похиле намотування не еквівалентне ортотропному шару суцільного матеріалу, і кутом нахилу намотування можна регулювати відношення навантажень, що сприймаються від труби-основи в кільцевому і поздовжньому напрямках. При експлуатації трубопроводів можуть виникнути подовжні сили від різних зовнішніх і внутрішніх факторів. При цьому важливо знати і регулювати поздовжню складову навантаження.

У даній роботі напружено-деформований стан бандажованого трубопроводу розглядається в його агрегатному стані як гнучкий стрижень зі східчастою по довжині жорсткістю або із змінною жорсткістю (при спіралеподібному навиванні), що змінюється по довжині функціонально. Також за запропонованою методикою можна визначити напружено-деформований стан трубопроводу в кожному перерізі, включно й з бандажем.

В агрегатному стані трубопровід розглядається як стрижень зі східчастою за довжиною жорсткістю перерізів.

Розглянемо способи завдання змінної жорсткості для чисельного розрахунку.

A , B , C — жорсткості при згинанні і крученні. Для обчислення A , B , C використовуються рівності:

$$A = EI_u, \quad B = EI_v, \quad C = GI_p,$$

де E — модуль пружності матеріалу; G — модуль зсуву; I_u , I_v — моменти інерції площі поперечного перерізу відносно осей u , v рухомого тригранника; I_p — полярний момент інерції [6].

Нехай довжина трубопроводу дорівнює S . Тоді можна розглядати два варіанти завдання змінної жорсткості:

1) ступенєво змінюються жорсткості на інтервалах $0 \leq s \leq s_1$, $s_1 \leq s \leq s_2$, $s_2 \leq s \leq s_3$, $s_{n-1} \leq s \leq s_{n+1}$ (наприклад $A_1 = 2A_3$, $A_3 = 3A_4$, $A_n = kA_{n-1}$, де k — коефіцієнт зміни значення поточної жорсткості відносно до попередньої, причому, як відомо, для рівножорсткісного елемента, яким є коло $A = B = 1,2C$);

2) функціонально (безперервно або кусково) змінюються жорсткості на інтервалі $0 \leq s \leq s_1$ чи на будь-якому іншому інтервалі інтегрування (як правило це лінійна функція за технологічною доцільністю), тобто $A = f(s)$, $B = f(s)$, $C = f(s)$ (у разі, наприклад) спірального навивання).

Для першого випадку підстановка необхідних значень жорсткостей на ділянці інтегрування реалізується програмними методами і чисельний рахунок особливих труднощів не викликає. Для другого випадку необхідно у розв'язальні рівняння додатково додавати функції зміни жорсткостей, що відомі, або розраховуються за технологічними параметрами готового виробу.

Нехай труба бандажована по всій довжині таким чином, що $A_1 = 0, 1A_2$; $A_3 = A_1$; $A_4 = 0, 1A_3$ і т. д. Будемо вважати, що такі ж співвідношення притаманні й жорсткостям B і C . За результатами чисельного розрахунку значення внутрішніх силових факторів для деформованого трубопроводу без бандажа і бандажованого за таких умов практично не відрізняються. Це зумовлено тим, що основна мета бандажування — перешкоджання внутрішньому тиску в трубі, і підсумовування жорсткостей основи і бандажа при розрахунках не призводить до бажаного ефекту. Роль бандажа полягає в обмеженні пружних і пластичних деформацій труби від надмірного внутрішнього тиску. Тоді механіку спільної роботи труби-основи і бандажа можна визначати, розглядаючи локальний переріз труби як ділянки нескінченно довгої оболонки, навантаженої внутрішнім тиском [5]. І тоді кільцеві зусилля в трубі

і намотці (бандажі) беруться як сума зусиль від внутрішнього тиску P і натягу бандажа і розподіляються по перетину практично рівномірно:

$$F_v = -\frac{1}{2} k_1 R_0 P_b \frac{a}{b},$$

де P_b — тиск у бандажі;

$$P_b = \pi h^2 E_n b \frac{(2-\mu)R_0^2 P + 2t_0 E_t \Delta}{R_0^2 k_1 E_n \pi h_0^2 \alpha + 8t_0 E_t b},$$

Δ -натяг; $\Delta = R_0 - R_H$, E_n , E_t — модулі пружності для матеріалів; R_0 , t_0 , h_0 — початкові значення геометричних параметрів; h_0 визначається за початковим діаметром дроту d_0 і кількості його шарів n у намотці за формулою:

$$h_0 = 0,5 d_0 \sqrt{\pi n}.$$

Коефіцієнти a і b обчислюються за формулами

$$a = sh k_1 h_0 + \sin k_1 h_0;$$

$$b = sh k_1 h_0 - \sin k_1 h_0;$$

$$k_1 = \frac{\sqrt[4]{3} \sqrt{1-\mu^2}}{\sqrt{t_0 R_0}}.$$

Деформування трубопроводу, бандажованого прямим або спіральним навиванням високоміцного дроту або стрічки досить докладно вивчено й описано в праці [4]. Проте здебільшого розрахунки наводяться за умови, що трубопровід в агрегатному стані знаходиться в плоскому напруженому стані. У рамках пропонованих авторами цієї статті методів цей випадок не викликає ускладнень, результат чисельного розрахунку при такому навантаженні подано на рис. 2.

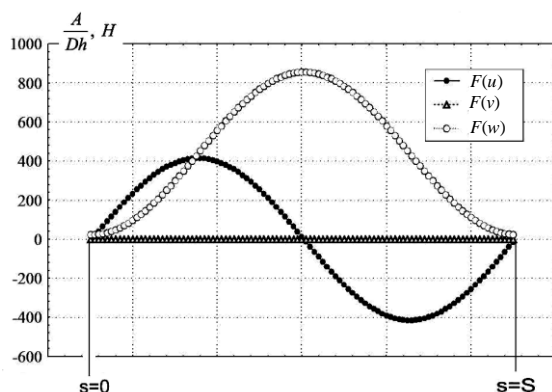


Рис. 2. Внутрішні зусилля в бандажі при кільцевому бандажуванні

Тут зображено внутрішні зусилля F_v , F_u , F_w відносно осей рухомого тригранника u, v, w у довільно обраному перерізі трубопроводу в безрозмірних величинах.

Очевидна відсутність поздовжніх (уздовж труби) складових внутрішніх зусиль F_v . Якщо ж з якихось технологічних причин, зокрема при просторовому деформуванні, при розташуванні труби на нерівному рельєфі тощо, в робочому стані поздовжня вісь трубопроводу деформується, то натяг від бандажа перерозподіляється по перетину і не буде рівномірним.

При просторовому деформуванні трубопроводу в агрегатному стані локальні внутрішні зусилля не підпорядковуються прийнятим зазвичай допущенням і потребують окремого розгляду.

Враховуючи, що випадки з навиванням бандажа перпендикулярно трубі-основі можна розглядати відомими методами будівельної механіки, зупинимось на найбільш складному і загальному варіанті деформування.

Нехай навивання бандажа здійснено навколо труби у вигляді циліндричної спіралі з постійним кутом навивання. При цьому жорсткість матеріалу, що навивається вздовж труби, значно (не більше десяти разів) перевищує жорсткість поперек труби (випадок навивання високоміцною стрічкою).

Для постановки граничних умов та прикладення діючих навантажень розглянемо геометрію такої конструкції.

Нехай осьова лінія формується навиванням прямої з кутом підйому α на циліндричну поверхню; $2a$ — діаметр поверхні обертання, на яку навивається крива; h — її висота.

Рівняння такої кривої можна навести у вигляді:

$$x = a \cos\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right), \quad y = a \sin\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right), \quad (1)$$

$$z = s \sin \alpha$$

Довжина кривої визначається за формулою:

$$S = \frac{2N\pi a}{\cos \alpha}. \quad (2)$$

Маючи співвідношення (1), (2), можна розрахувати параметри кривизни криволінійного елемента в недеформованому стані.

Кривина q_0 визначається за відомим співвідношенням

$$q_0 = \sqrt{\left(\frac{d^2 x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 z}{ds^2}\right)^2}. \quad (3)$$

Кручення r_0 розраховується за формулою

$$r_0 = \frac{1}{(q_0)^2} \begin{vmatrix} x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \\ x''' & y''' & z''' \end{vmatrix}, \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{dx}{ds} = -\cos \alpha \sin\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 x'' &= \frac{d^2 x}{ds^2} = -\frac{\cos^2 \alpha}{a} \cos\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 x''' &= \frac{d^3 x}{ds^3} = \frac{\cos^2 \alpha}{a^2} \sin\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 y' &= \frac{dy}{ds} = \cos \alpha \cos\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 y'' &= \frac{d^2 y}{ds^2} = -\frac{\cos^2 \alpha}{a} \sin\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 y''' &= \frac{d^3 y}{ds^3} = -\frac{\cos^2 \alpha}{a^2} \cos\left(\frac{\cos \alpha}{a} s\right); \\
 z' &= \frac{dz}{dx} = \sin \alpha, \quad z'' = \frac{d^2 z}{ds^2} = 0, \quad z''' = \frac{d^3 z}{ds^3} = 0.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Вважатимемо, що бандаж сприймає зусилля від внутрішнього тиску труби. У цьому випадку параметром навантаження може бути розподілене навантаження f_u уздовж осі u рухомого тригранника (u, v, w) [5]. Ураховуючи, що в загальному випадку вісь u не завжди спрямована точно вздовж радіуса кривизни, при задаванні навантаження в чисельних розрахунках значення f_u на кожному кроці дискретизації ділянки інтегрування програмно множиться на косинус кута між ними.

На рис. 3 показано внутрішні зусилля у безрозмірних величинах у бандажі при деформуванні, одержані при чисельному розрахунку.

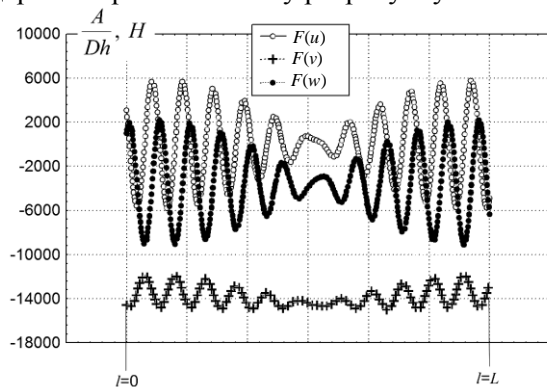


Рис. 3. Внутрішні зусилля за довжиною трубопроводу у бандажі

Висновки

Отримані за результатами чисельного розрахунку дані дають змогу виявити зусилля і моменти в будь-якому перетині бандажа, що належить будь-якому перетину трубопроводу.

За отриманими результатами чисельного розрахунку можна зробити висновок, що за допомогою запропонованої методики можна визначати напружено-деформований стан бандажованого трубопроводу за будь-якими фізико-геометричними характеристиками.

Чисельний розрахунок виконувався в програмному середовищі Microsoft Fortran Power Station 4.0.

Час розрахунку для однієї поставленої задачі становив біля 5–10 хв за умовами такої конфігурації комп'ютера: тактова частота процесора — 3,8 Гц, оперативна пам'ять — 8 Гб. При цьому на розрахунковій ділянці інтегрування вибиралася кількість точок дискретизації рівна чотирьом тисячам.

Вихідні дані за бажанням можуть надаватися у вигляді комп'ютерної графіки в реальному режимі часу або у числовому вигляді.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е. П. Попов. — М. : Наука, 1986. — 294 с.
2. Баженов В.А. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости оболочек подземных трубопроводов // Строительная механика и расчет сооружений / В. А. Баженов, А. И. Оглобля. — 1984. — № 4. — С. 30–33.
3. Блажко В. А. Свободные колебания кругового кольца на дискретном упругом основании // Несущая способность и долговечность конструкций / В. А. Блажко. — К. : Наук. думка, 1990. — С. 7–13.
4. Мухин О. Н. Устойчивость трубопровода и некоторые методы в неконсервативных задачах // Вестник МГУ / О. Н. Мухин. — 1965. — № 2. — С. 76–87.
5. Кравцов В. И. Механика гибких глубоководных систем / В. И. Кравцов. — К. : Наук. думка, 1997. — 256 с.
6. Кравцов В. И. Метод численного расчета пространственно искривленных гибких элементов // Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету / В. И. Кравцов. № 2(350), 1998. — С. 30–36.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2012.