

СТІЙКІСТЬ ТА ЗАКРИТИЧНА ПОВЕДІНКА ЕЛЕМЕНТА ТРУБОПРОВОДУ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ

О.М.Недбайло

Херсонський державний технічний університет, 73018, м. Херсон, Бериславське шосе, 14,
тел. (0552) 230923, e-mail: kstu@tlc.ks.ua

Предложен метод определения компонентов напряженно-деформированного состояния, устойчивости и критического поведения элемента трубопровода при действии гидростатической нагрузки. Для исследования принята математическая модель, основанная на подходах Лагранжа и Эйлера, реализуемая численными методами. Рассмотрены процессы деформации элемента трубопровода постоянной и переменной жесткости.

A components determination method of stressed-strained states, critical loads, forms of stability bieng lost of the element of pipe under the influence of gyrostatically load is offered. For research is adopted a mathematical model, founded on approaches Lagrange and Eller and realized by calculable methods. The problems of deformation of the element of pipe with constant and variable hard are decided.

Український сектор акваторій Чорного та Азовського морів містить значні ресурси вуглеводнів, які можуть бути видобуті з надр цієї території. Розробка нових відкладів та транспортування видобутої нафти і газу передбачає спорудження та експлуатацію морських трубопроводів. Умови експлуатації підводних трубопроводних систем визначаються багатьма чинниками, серед яких гідростатичний тиск, хвилі, течії, навантаження, що виникають внаслідок розмиву дна тощо. Навантаження статистичного характеру, спричинені складними умовами експлуатації, можуть одночасно діяти на лінійну частину трубопроводу в різноманітних комбінаціях та змінювати свої значення, напрям та інтенсивність в широкому діапазоні. Все це призводить до формування в матеріалі трубопроводу складнопрогнозованого та важкоконтрольованого напружено-деформованого стану. Деякі навантаження визначаються з точністю, достатньою для інженерних розрахунків, але безумовна більшість з них обчислюється надто наближено. Особливо складно враховувати навантаження, спричинені дією навколишнього середовища, зважаючи на те, що швидкість чи частота їх зміни на різних ділянках трубопроводу може істотно відрізнятись [1]. Аналіз порівняв промислових трубопроводів свідчить, що однією з основних причин, що викликають відмову, є також корозійний знос внутрішньої поверхні труби. Це зумовлено складним станом трубопроводу, що напружено деформується, одночасним впливом на метал обводненої нафти, газу, мінералізованих вод, впливом абразивних частинок [2]. Після пуску трубопроводу в експлуатацію виникають додаткові навантаження, зумовлені внутрішнім тиском і температурою продукту, що перекачується. Внаслідок дії цих навантажень, особливо на розмитих ділянках, 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 своєї первинної

форми. 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 при аварійних ситуаціях. Розбіжність в результатах методик, що вивчають ці питання, сягає 30%. Це свідчить про те, що наукові розробки, методики та нові технічні рішення з питань визначення напружено-деформованого стану, втрати стійкості та закритичної поведінки трубопроводів при їх укладанні, ремонті та експлуатації є актуальними.

Наукові праці багатьох авторів присвячені здебільшого дослідженню тільки напружено-деформованого стану і стійкості таких елементів, труба інтерпретується як нескінченно довга оболонка циліндричної форми. В даній статті розглядається найбільш близький до реальних умов, а отже і більш складний, випадок дослідження стійкості і закритичної поведінки ділянки труби як плоского елемента нескінченно довгої оболонки не обов'язково круглого перерізу з нерівномірною по перерізу жорсткістю, що може навантажуватися довільними за характером дії та за місцем прикладення статичними або квазістатичними навантаженнями. Розв'язання таких проблем дає змогу вдосконалити методику розрахунку трубопроводів для виявлення резервів несучої здатності труб і визначення їх надійності.

Розглянемо процес нелінійного деформування елемента пружної кругової замкненої нескінченно довгої тонкої оболонки, навантаженої рівномірно розподіленим гідростатичним навантаженням. Особливістю такого навантаження є те, що при деформуванні труби напрям його дії завжди виявляється перпендикулярним до дотичної площини для всіх точок деформованої поверхні. Причинами, що ініціюють втрату стійкості, є корозія, овальність і локальні пошкодження, наприклад, вм'ятини на тілі труби, нанесені якорем, важким інструментом, стингером тощо. Опишемо коротко математичну модель, що реалізує вказаний підхід.

Як базова модель пропонується методика дослідження деформування гнучких морських конструкцій [3]. Диференціальні рівняння, що описують рівновагу і деформування, засновані на використанні підходів Лагранжа і Ейлера, мають високий порядок і містять нелінійності складного вигляду. Внутрішня геометрія, яка внаслідок незмінності довжини залишається постійною, задається координатою s , що вимірюється відстанню вздовж осьової лінії від початкової точки до поточної, і пересувної, жорстко пов'язаної з поперечним перерізом системою координат. Зовнішня геометрія визначає положення кожної точки і всієї пружної лінії в нерухомій системі координат $Oxyz$. Для повної постановки двоточкової крайової задачі про вигин криволінійного елемента необхідно задати дванадцять незалежних граничних рівнянь; вони виходять з відповідних статичних або кінематичних умов опирання країв.

Для розв'язання нелінійної крайової задачі, що описується системою звичайних диференціальних рівнянь, використовується метод продовження розв'язку за параметром. Запишемо систему розв'язуваних рівнянь у вигляді

$$\vec{x}' = \vec{f}(\vec{x}, s, \lambda), \quad (1)$$

де: $\vec{x}' = \vec{f}(\vec{x}, s, \lambda)$ – вектор стану розмірністю $m = 12$;

$\vec{x}' = \vec{f}(\vec{x}, s, \lambda)$ – вектор-функція правих частин;

s – незалежна змінна;

λ – параметр, що визначає інтенсивність навантаження; штрихом позначена похідна за s . На краю $s = 0$ інтервалу $0 \leq s \leq S$ зміни змінної s задані шість незалежних крайових умов

$$[\vec{x}(0)] = 0. \quad (2)$$

Для замикання системи розв'язуваних рівнянь достатньо на краю $s = S$ задати шість крайових умов, що залежать від параметра λ

$$\vec{\psi}[\vec{x}(s)] = 0. \quad (3)$$

У цих рівняннях $\vec{\varphi}, \vec{\theta}, \vec{\psi}$ означають шестимірні вектори-функції. Якщо при деякому значенні параметра $\lambda = \lambda^{(n)}$ відомий розв'язок поставленої задачі, то при малому прирості $\delta\lambda^{(n)}$ параметра λ відповідну до нього варіацію $\delta\vec{x}^{(n)}(S)$ розв'язку $x^{(n)}(S)$ можна знайти з лінійного рівняння

$$\frac{d\delta\vec{x}^{(n)}}{ds} = \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}} \delta\vec{x}^{(n)} + \frac{\partial \vec{f}}{\partial \lambda} \delta\lambda^{(n)}, \quad (4)$$

отриманого лінеаризацією виразу (3). Крайові рівняння для функції $\delta(x)^{(n)}$ формуються лінеаризацією рівнянь (3)-(4)

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \vec{x}} \delta\vec{x}^{(n)}(0) = 0, \quad \frac{\partial \vec{\theta}}{\partial \vec{x}} \delta\vec{x}^{(n)}(0) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{x}} \delta\vec{x}^{(n)}(S) = 0.$$

Для побудови $\delta\vec{x}^{(n)}(S)$ виберемо серед складових $\delta\vec{x}_i^{(n)}(S)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$) такі шість компонент $\delta\vec{x}^{(n)}(S)$, будь-які значення яких $\delta f_j^{(n)}(0)$ не порушують перші два векторні рівняння системи (5). Перенумерувавши невідомі $\delta\vec{x}_i^{(n)}(s)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$) так, щоб індекс j набував значення $j = 1, 2, \dots, 6$, розв'язок задачі (4), (5) представимо у вигляді

$$\delta\vec{x}^{(n)}(s) = y_\lambda \delta\lambda^{(n)} + Y(s) \delta\vec{c}^{(n)}, \quad (6)$$

де: $\vec{y}_\lambda(s)$ – розв'язок задачі Коші для системи

$$\frac{d\vec{y}_\lambda}{ds} = \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}} \vec{y}_\lambda + \frac{\partial \vec{f}}{\partial \lambda} \quad (7)$$

при нульових початкових умовах;

$Y(s)$ – матриця розміру 12×6 розв'язків системи

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\partial f}{\partial x} y \quad (8)$$

з початковими умовами

$$y_j(0) = (\delta_1^j, \delta_2^j, \dots, \delta_6^j), \quad j = 1, 2, \dots, 6$$

для незалежних змінних. Вектор постійних $\delta\vec{c}^{(n)} = \{\delta c_1^{(n)}, \delta c_2^{(n)}, \dots, \delta c_6^{(n)}\}$ підбираємо так, щоб задовольнити рівняння

$$\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{x}} Y(S) \delta\vec{c}^{(n)} = -\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{x}} \vec{y}_\lambda(S) \delta\lambda^{(n)}. \quad (9)$$

Якщо матриця $\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{x}} Y(s)$ не вироджена, то

при даному значенні $\lambda = \lambda^{(n)}$ можна знайти вектор $\delta\vec{c}^{(n)}$, відповідний вибраному значенню $\delta\lambda^{(n)}$, а відтак варіацію початкових умов $\delta x_i^{(n)}(0), i = 1, 2, \dots, 12$, початкові умови $x_i^{(n+1)}(0) = x_i^{(n)}(0) + \delta x_i^{(n)}(0)$ при $\lambda^{(n+1)} = \lambda^{(n)} + \delta\lambda^{(n)}$ і відповідне їм розв'язання. Стани, в яких визначник матриці $\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial \vec{x}} Y(s)$ обертається в нуль,

є біфуркаційними. У них система втрачає стійкість, визначається геометричне місце точок критичних станів системи, що деформується. При практичній реалізації розв'язку побудова матриць $Y(s)$ на кожному кроці варіювання параметра навантаження λ здійснюється методом Рунге-Кутта четвертого порядку. Кількість точок дискретизації залежить від складності геометрії елемента та від ступеня нелінійності процесу деформування і складає від 100 до 400. Кількість кроків інтегрування залежить, крім цього, й від глибини досліджування процесу, тобто від величини деформування, наявності втрати стійкості, дослідження закритичної поведінки і може бути від 10 до 1000.

Виділимо елемент оболонки одиничної довжини у вигляді кільця, що знаходиться в умо-

вах плоскої деформації і що спирається на основу при деякому заглибленні в ґрунт. При цьому приймаємо, що радіус кільця – R , згинальна жорсткість вздовж радіуса – A . Згинальна жорсткість B і крутильна жорсткість C задаються на порядок більші, оскільки деформування відбувається в одній площині, а також з метою виключення втрати стійкості і виникнення деформування з площини, що за умовою задачі неможливо.

Вибираючи в одній з точок затиснення початок відліку змінної s , виписуємо крайові умови:

при $s=0$

$$x = -R \cos \frac{\alpha}{2}, \quad y = R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad z = 0, \quad (10)$$

$$\tau_x = \sin \frac{\alpha}{2}, \quad \tau_y = \cos \frac{\alpha}{2}, \quad \tau_z = 0;$$

при $s=S$

$$x = -R \cos \frac{\alpha}{2}, \quad y = R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad z = 0, \quad (11)$$

$$\tau_x = \sin \frac{\alpha}{2}, \quad \tau_z = 0, \quad n_z = 0.$$

При розв'язуванні задачі вважалося, що зовнішні навантаження дорівнюють $f_u = \lambda$, $f_y = \lambda/100$, $f_v = 0$, $f_w = 0$. Значення параметра λ , при якому змінювався знак визначника матриці крайових умов двоточної крайової задачі, приймалося як біфуркаційне.

Розглянемо розв'язок такої задачі для двох випадків: при постійній жорсткості перерізу труби; при змінній жорсткості перерізу труби. У першому випадку задача зводиться до неперервного числового інтегрування за s з параметром навантаження λ , що є еквівалентом гідростатичного навантаження та навантаження через течію, які задаються через кожний крок параметра за напрямом функції навантаження f_u та f_y відповідно. Перехід від нерухомих осей x, y, z до рухомих u, v, w , що спостерігають за деформованим перерізом, здійснюється за формулами

$$f_u = f_x n_x \cos \chi + f_y n_y \cos \chi + f_z n_z \cos \chi + f_x b_x \sin \chi + f_y b_y \sin \chi + f_z b_z \sin \chi; \quad (12)$$

$$f_w = f_x \tau_x + f_y \tau_y + f_z \tau_z,$$

де: n, b, τ – осі природнього тригранника, χ – кут між тригранниками u, v, w та n, b, τ .

Результати дослідження процесу навантаження послідовно в докритичному і в закритичному стані за таких умов наведені на рис. 1.

Тут відображена залежність нормального до осьової лінії внутрішнього зусилля F_u на всьому інтервалі інтегрування дискретністю через 10 кроків від параметра інтенсивності зовнішнього гідростатичного тиску f_u . Крива навантаження виходить з початку координат і не змінює деякий час свого значення. Оскільки осьова лінія в прийнятій постановці задачі вважалася нерозтяжною, то аж до втрати стійкості

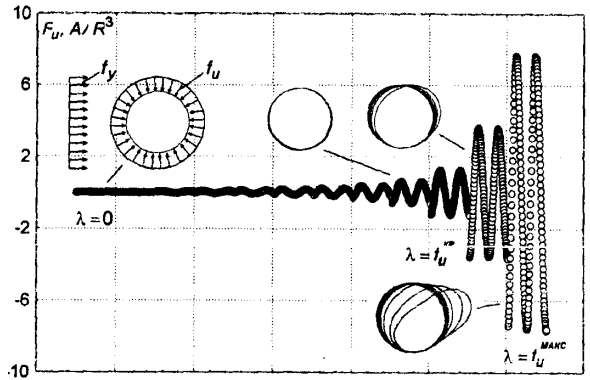


Рисунок 1 — Залежність нормального до осьової лінії внутрішнього зусилля від параметра інтенсивності зовнішнього тиску та форми осьової лінії при цьому

форма перерізу оболонки залишалася кільцевою, а переміщення — рівними нулю ($f_u < f_u^{kp}$). Після втрати стійкості оболонка почала прогинатися всередину, а відтак випинатися назовні. При цьому, однак, пружне деформування оболонки супроводжувалося збереженням її несучої здатності зі збільшенням тиску, в той час як початкова гілка рівноваги виявилася нестійкою. На початковому етапі деформування оболонки в закритичному стані тиск, що сприймається нею, залишається практично незмінним, а прогини збільшуються швидко. Тому при побудові розв'язку як ведучий параметр при відгалуженні приймався прогин (залежна змінна x) в точці $s = S/2$. Після виходу на ділянки закритичних кривих з швидким зростанням деформування було здійснено повернення до первинного ведучого параметра за допомогою інтегрування із змінним кроком, а також способом продовження розв'язання з довільного кроку інтегрування. Характер зміни величини F_u підкреслює значну нелінійність процесу деформації.

Таким чином було досліджено характер деформування оболонки від початкового (недеформованого) стану до деякого закритичного стану. На всьому етапі деформування обчислювалися координати точок, зусилля і моменти в перерізах, а також візуалізація на екрані комп'ютера форм осьової лінії. На рис. 1 зображені закритичні форми при ідеально круглій формі поперечного перерізу та ідеально рівномірному навантаженні. Однак в реальних умовах такого досягнути важко (овальність труби, анізотропність матеріалу, різниця гідростатичного тиску в різних точках поперечного перерізу, наявність течій, температурні впливи тощо). У випадку послаблення жорсткості перерізу розв'язано задачу деформування зі змінною по довжині осьової лінії жорсткістю. Величина заглиблення в ґрунт характеризується кутом α (рис. 1). Кільце розташоване у площині xu . Для реалізації такого підходу інтервал інтегрування розподіляється на ділянки з різними значеннями жорсткості, програмними методами залежно від значення незалежної змінної s приймається не-

обхідне значення жорсткості. Враховуючи, що інтегрування не може відбуватися за умовами стрибкоподібності, на межах змінювання жорсткості відбувається поступовий перехід від однієї жорсткості до іншої через згладжувальну функцію. На рис. 2 зображено внутрішні зусилля від гідростатичного тиску у суцільному перерізі та у послабленому на одній ділянці.

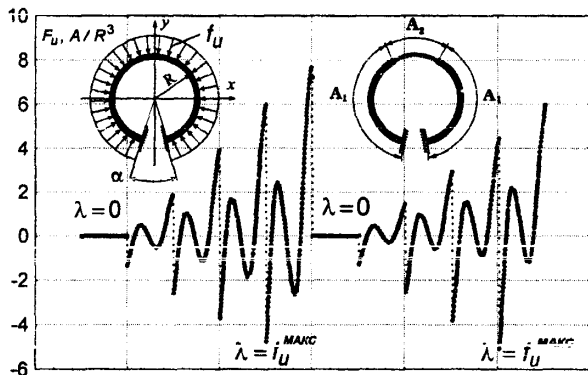


Рис. 2. Внутрішні зусилля у трубі суцільного та змінного перерізу

За необхідності як вихідні дані при числовому дослідженні можна одержувати і напруження за формулою

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{W}, \quad (13)$$

де: N і M – поздовжня сила і згинальний момент відповідно;

F і W – площа перерізу труби і момент опору перерізу.

Достовірність методики випробувана на тестових задачах з відомими розв'язками [4]. Запропонована методика розрахунку дає змогу розв'язувати цілу низку подібних задач, в яких відстежується, зокрема, як форми елемента трубопроводу, так і повний спектр внутрішніх силових факторів. Залежно від поставлених умов є можливість зміни прикладених навантажень як за напрямом, так і за величиною та характером. Результати розв'язку відображаються на екрані монітора, що дає змогу спостерігати за проходженням процесу деформування у реальному часі.

Література

1. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газ. пром-сть. – 2002. – №5. – С. 33-37
2. Султанмагомедов С.М., Быков Л.И. Обоснование способа профилактического ремонта нефтепроводов, подверженных коррозии // НТЖ. Защита от коррозии и охрана окружающей среды. – М.: ВНИИОЭНГ, 1995. – №4. – С. 10-12.
3. Кравцов В.І. Механіка гнучких морських конструкцій. – К.: Наукова думка, 1999. – 132 с.
4. Ванько В.И. Краевой эффект в задаче о сплющивании цилиндрической оболочки внешним давлением // Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики и их приложения: Сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т математики. – К., 1997. – С.40-43.

VI Міжнародна науково-практична конференція-конкурс молодих вчених і спеціалістів ГЕОФІЗИКА-2003

м. Санкт-Петербург
(1-4 жовтня 2003 р.)

Оргкомітет конференції

СПО ЕАГО

192019, м. Санкт-Петербург,
вул. Фаянсова, 20

Тел./факс: (812) 567-8946

E-mail: geofizika2003@virg.ru

Жукова Наталія Олександрівна

Тел./факс: (812) 567-7648

E-mail: eago@newmail.ru

[http:// geo.phys.spbu.ru/geoph2003](http://geo.phys.spbu.ru/geoph2003)

Кудрявцева Тетяна Олексіївна

Основні завдання конференції:

- Визначити коло проблем і завдань геофізики XXI століття в області геології та фізики Землі, які підлягають вирішенню;
- Оцінити кадровий потенціал галузі і запропонувати шляхи підвищення професіоналізму молоді;
- Виявити перспективні напрямки розробок молодих вчених і спеціалістів для розвитку науково-технічного потенціалу галузі в третьому тисячолітті та сприяти державній підтримці цих робіт;
- Обговорити проблеми працевлаштування молодих спеціалістів в сучасних економічних умовах та намітити шляхи їх вирішення;
- Обговорити пропозиції щодо підвищення кваліфікації спеціалістів геологів-геофізиків, геохіміків та ін. з метою підвищення їх професіоналізму на основі інтеграції освіти, науки і практики.