

УДК 669

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/05>**Трубачев С.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воробйов М.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі запропоновано підхід до розрахунку на міцність трубопроводів на основі використання методу скінченних елементів та академічної (безкоштовної) версії програмного комплексу Abaqus. Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану згинів трубопроводів, побудова алгоритму чисельного моделювання трубопроводів зі згинами та визначення їх умов міцності. Об'єкт дослідження – процеси напружено-деформованого стану згинів трубопроводів. Предмет дослідження – прямокутні (колінні) згини трубопроводів різного радіуса кривизни. Постановка роботи викликана актуальністю завдання розрахунку трубопроводів та фактом того, що в літературі майже відсутні методики розрахунку трубопроводів з урахуванням гибів на основі трьохвимірних моделей або у точній постановці задачі. Під час розрахунку використовувалась модель сталеві труби з модулем Юнга  $E = 2 \times 10^{11}$  Па, коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ , густиною  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Діаметр труби дорівнював 220 мм, товщина стінки 7 мм. Згин навантажено внутрішнім тиском  $1,2 \times 10^6$  Па. Побудовані скінченно-елементарні розрахункові сітки для згину труби при різних радіусах кривизни в діапазоні  $0,5 \leq R/D \leq 3$ . Показано, що коефіцієнт концентрації напружень для згину труби має нелінійний характер із значним скачком при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби і супроводжуються втратою стійкості (руйнуванням) системи навіть при незначних навантаженнях, критичні значення яких значно зменшуються при відношенні  $R/D < 1$ . Отримана залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки в діапазоні  $8 \leq D/h \leq 55$  дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності при їх роботі. Результати, отримані в роботі, можуть бути використані як для розрахунків трубопроводів енергетичного призначення так і для магістральних, міських комунально-мережевих та технологічних трубопроводів в широкому діапазоні варіювання робочих тисків та температур роботи.

**Ключові слова:** згини труб, коефіцієнт концентрації напружень, критичний тиск, напружено-деформований стан, міцність труб, чисельне моделювання.

**Постановка проблеми.** На теплових та атомних електричних станціях і промислових підприємствах відзначається велика різноманітність трубопроводів різного призначення, а їх розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість у проектуванні з урахуванням реальних умов експлуатації є актуальною задачею. Слід підкреслити, що в теперішній час небагато наукових робіт присвячено розрахунку трубопроводів з урахуванням згинів на основі трьохвимірних моделей або у точній постановці задачі. Розрахунок трубопроводів, як розрахунок стержневих систем без урахування розподілення напружень у місцях закріплення трубопроводів або в місцях, де існують концентратори напружень, не завжди дають достовірні результати. Це пов'язано, насамперед, зі склад-

ністю математичної постановки задачі. Щоб врахувати всі ці фактори, необхідно застосовувати чисельні методи розрахунку на основі варіаційно-сіткових підходів. У даній роботі пропонується розрахунок трубопроводів з урахуванням згинів, заснований на використанні метода скінчених елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання трубопроводів пов'язано з великою кількістю особливостей їх технологічного застосування, умов та режимів роботи, а оцінка міцності та ресурсу визначає безпечну і надійну роботу обладнання. Наразі вирішенню цих питань присвячена велика кількість робіт, зокрема, розглядають питання виникнення напружень під час технологічних операцій згинання труб [1; 2],

умови міцності та надійності зварних з'єднань [3; 4], питання довготривалої втоми трубопроводів [5]. Але початкові напруження виникають вже на етапі виготовлення згинів труб, і правильна оцінка напружено-деформованого стану трубопроводу на цьому етапі визначає подальшу надійну експлуатацію трубопроводів.

На сучасному етапі розвитку інженерних підходів до розрахунку на міцність оболонкових елементів більшість чисельних процедур засновані на скінченноелементній методиці розв'язання [6–8], яка вимагає переформування скінченноелементної моделі відповідно до розв'язуваної задачі, тому для зменшення трудовитрат важливо визначити відповідні допущення та вибрати оптимальну розбивкову сітку, яка надалі буде використовуватися в розрахунках. Разом із тим для розв'язання даної задачі чисельно-аналітичних підходів доводиться стикатися із проблемою підсумовування нескінченних рядів і обчислення сингулярних інтегралів [9; 10], що вимагає відповідного задання кількості розрахункових ітерацій.

**Постановка завдання.** Згини трубопроводів – неодмінний елемент їхніх конструкцій. Як і для всього трубопроводу, так і для згину основними параметрами системи є умовний діаметр проходу, умовний тиск, а для згину ще і відносна кривизна. Визначення відповідних умов міцності згинів трубопроводів вимагає відповідного аналізу їх застосування (транспортування різних рідких, газоподібних і сипучих речовин та ін.). Для конкретизації умов роботи трубопроводів відзначимо, що їх класифікують таким чином:

1) магістральні (газопроводи, нафтопроводи, водопроводи);

2) міські комунально-мережні (водопровід, газові мережі, теплофікаційні мережі, каналізаційні мережі);

3) технологічні (внутрізаводські, міжцехові, цехові, обв'язочні; машинні).

Магістральні трубопроводи призначені для транспортування сировини на далекі відстані. Магістральний трубопровід включає в себе споруди з підготовки транспортуючої сировини, лінійну частину, насосні або компресорні і газорозподільні станції. По робочому тиску магістральні газопроводи розподіляють на трубопроводи низького тиску – менше 1,2 МПа, середнього тиску – 1,2 – 1,5 МПа і високого тиску – більше 2,5 МПа.

Міські (сільські) комунально-мережні трубопроводи використовуються для задоволення потреб населення і невеликих промислових підприємств. Газопроводи міського газового гос-

подарства залежно від призначення поділяють на транзитні, розподільючі та розгалужуючі. Транспортування газу по міському газопроводу діючими нормами допускаються за умов робочого тиску менше ніж 1,2 МПа.

Технологічними називають трубопроводи промислових підприємств по яких транспортується сировина, пара, вода, паливо, інші матеріали, що забезпечують виконання технологічного процесу або використані в технологічному процесі. Залежно від розміщення у промисловому об'єкті технологічні трубопроводи розділяють на внутрішньо цехові, з'єднуючі агрегати і машини цеху і міжцехові, що з'єднують технологічні установки різних цехів.

Залежно від умов тиску трубопроводи поділяються на вакуумні, що працюють при абсолютному тиску менше 0,1 МПа, низького тиску – від 0,1 до 1,5 МПа, середнього тиску – від 1,5 до 10 МПа. Технологічні трубопроводи вважаються холодними, якщо вони працюють у середовищі, яке має робочу температуру менше 50 °С, та гарячими, якщо температура робочого середовища більш 50 °С.

За матеріалом виготовлення всі труби від малого до великого діаметру можна розподілити на дві основні групи – це металеві та неметалеві. Також у зв'язку з великою сферою застосування і різноманітністю діаметрів труб існує багато інших класифікацій, наприклад, за формою перерізу труби (звичайна або профільна); за способом виробництва (безшовні, литі, зварні), за кількістю використаних шарів (одношарові або багатошарові), а також за призначенням (загального і спеціального призначення).

Металеві труби можна розбити на три основні групи: сталеві, чавунні та мідні. До недоліків сталевих труб можна віднести їхній малий строк служби, досить високу теплопровідність. До недоліків чавунних труб відноситься велика маса, крихкість та невелика довжина відрізків, але вони більш стійкі до корозії, мають низьку теплопровідність та собівартість. Мідні труби мають великий набір переваг, але їх собівартість дуже велика. Неметалеві труби включають велику кількість видів матеріалу – керамічні, азбестоцементні, полімерні та інші. Полімерні труби мають дуже хороші характеристики – це невелика маса, низька собівартість.

Таким чином, необхідно враховувати велику кількість експлуатаційних режимних та конструктивних факторів, які впливають на умови роботи трубопроводів.

*Мета дослідження* – для визначення напружено-деформованого стану згинів трубопроводів передбачається розробка відповідної методики розрахунку та побудова алгоритму чисельного моделювання трубопроводів зі згинами.

*Методи, об'єкт та предмет дослідження.* Метод дослідження – чисельний аналіз, використовується академічне (некомерційне) програмне забезпечення Abaqus. Робота даної програми побудована на вирішенні завдань міцності методом скінченних елементів.

Об'єкт дослідження – процеси напружено-деформованого стану згинів трубопроводів.

Предмет дослідження – прямокутні (колінні) згини трубопроводів різного радіусу кривизни.

**Виклад основного матеріалу.** Рішення прикладних задач чисельними методами будується шляхом зведення заданої континуальної задачі до скінченновимірної. Для цього нескінченномірний простір допустимих функцій замінюють скінченновимірним  $V_h \subset V$ . Для побудови скінченновимірного простору  $V_h$  приміняється спосіб, в якому як базисну функцію використовують функції з кінцевим малим носієм, такі, кожна з яких тільки в порівняно невеликій (порядку шагу сітки  $h$ ) околиці відмінна від нуля, а зовні її тотожно дорівнює нулю [11]. Для їх побудови за допомогою сітки здійснюється дискретизація області  $\Omega$ , яку займає тіло, на скінченне число підобластей  $\Omega_n$ . На об'єднанні підобластей  $\Omega_n$ , що примикають до кожного вузла сітки, будується базисна функція з кінцевим малим носієм і являє собою многочлен на кожній підобласті  $\Omega_n$ . Всі лінійно незалежні функції такого виду приймаються за базисні.

У побудові скінченновимірних просторів  $V_h$  використовуються кусковополіноміальні функції, при цьому множина  $\Omega$  представляється у вигляді неперетинаючого об'єднання багатокутників  $\Omega_n$ . Коефіцієнти полінома в кожному багатокутнику вибирають таким чином, щоб забезпечити потрібну гладкість, а також однозначне визначення полінома, з умов, забезпечуючих належність приблизного рішення простору  $V$ . Нехай  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^N$  – система базисних функцій,  $i$ -тий член якої приймає в  $i$ -том вузлі значення, що дорівнює одиниці, а в інших вузлах сітки обертається в нуль.

Тоді функція  $v_h$  може бути представлена у вигляді:

$$v_h = \sum_{i=1}^N v_i \varphi_i(x) \quad (1)$$

Лінійна комбінація (1) доповнює функцію  $v_h \subset V_h$  на всю область  $\Omega$  за її вузловими значен-

нями. Від вибору сітки та системи базисних функцій залежать вид та властивості утвореної варіаційно-сіткової схеми для розглядаємої задачі.

У побудові варіаційно-сіткових схем функціонал потенціальної енергії системи на скінченновимірному просторі допустимих функцій  $V_h$  має вигляд:

$$F(\vec{v}) = \frac{1}{2}(K\vec{v}, \vec{v}) - (\vec{f}, \vec{v}), \quad (2)$$

де  $K$  – матриця жорсткості,  $\vec{f}$  – вектор вузлових навантажень, і варіаційна задача замінюється наближеною. Найбільш часто використовується підхід, який заснован на використанні необхідної умови мінімуму функціонала (2). Тоді виникає задача розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь високого порядку:

$$K\vec{v} = \vec{f} \quad (3)$$

Тобто ми приходимо до звичайного застосування метода скінченних елементів [6]. У даній роботі пропонується розрахунок трубопроводів з урахуванням згинів, заснований на використанні метода скінчених елементів.

Розглянемо згин трубопроводу, який навантажено внутрішнім тиском (рис. 1). Основними параметрами згину є радіус  $R$ , діаметр труби  $D$ , товщина стінки  $h$ . Під час розрахунку використовувалась модель сталеві труби з модулем Юнга  $E = 2 \times 10^{11}$  Па, коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ , густиною  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Діаметр труби дорівнює 220 мм, товщина стінки 7 мм. Згин навантажено внутрішнім тиском  $1,2 \times 10^6$  Па.

Як видно з рис. 2, розподіл полів напружень має суттєво неоднорідний характер. Концентрація напружень відбувається на внутрішній частині поверхні труби в місці її найбільшої кривизни.

Для опису напружено-деформованого стану системи у класичній літературі використовують коефіцієнт концентрації напружень  $K$ , який у більшості випадків визначається експериментально:

$$K = \sigma_{max} / \sigma \quad (4)$$

де  $\sigma_{max}$  – максимальні локальні напруження, а  $\sigma$  – номінальні напруження в ділянці трубопроводу, віддаленого від місця концентрації.

Використання представленого чисельного експерименту для визначення коефіцієнта концентрації напружень полегшує задачу. На рис. 3 зображено залежність коефіцієнта концентрації напружень від відношення радіуса згину до зовнішнього діаметра труби. Як видно з графіка, ця залежність має нелінійний характер зі значним скачком концентрації напружень при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби.

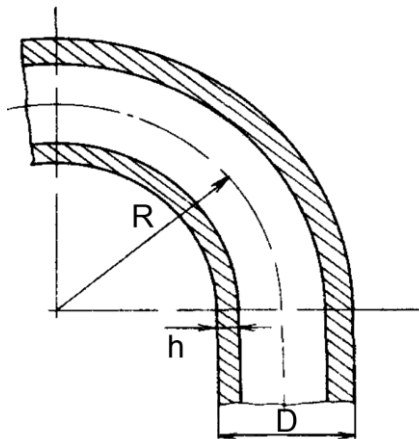


Рис. 1. Схема згину труби

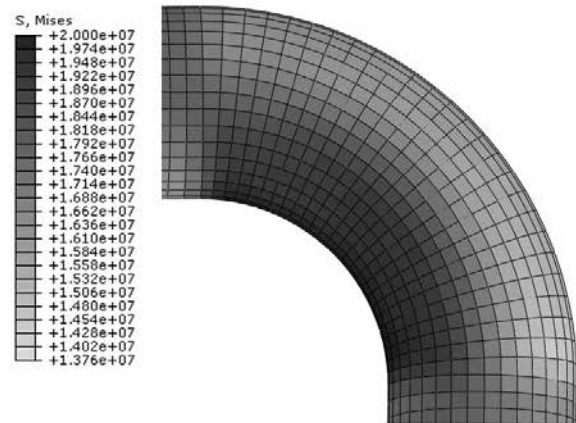


Рис. 2. Розподіл напружень в згині

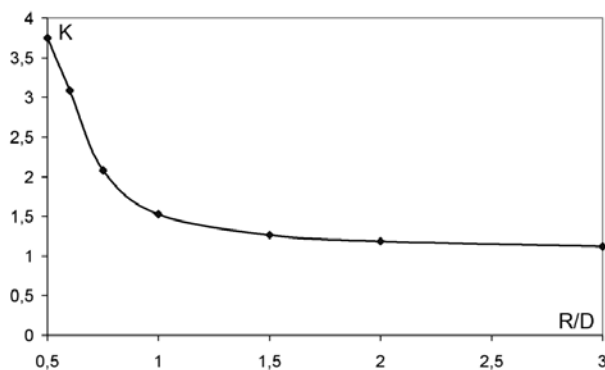


Рис. 3. Залежність коефіцієнта концентрації напружень від відношення радіуса згину до зовнішнього діаметра труби

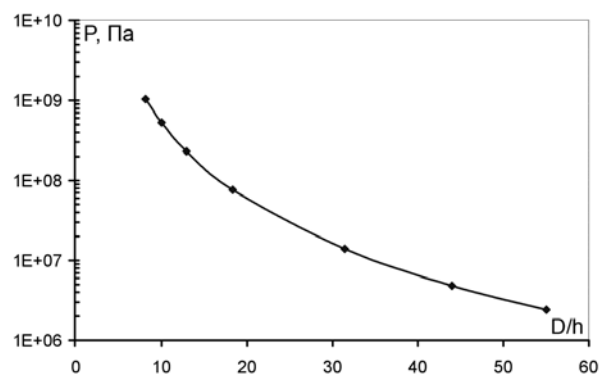


Рис. 4. Залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки

Конструктивні елементи під дією зовнішнього навантаження повинні знаходитись у стані рівноваги. Це означає, що система, яка втратила рівновагу під впливом зовнішніх факторів, повинна вертатись у стан рівноваги під час зникнення дії цих факторів.

Вихід системи із початкового стану рівноваги називається втратою стійкості, а навантаження, яке відповідає цій втраті, називається критичним навантаженням. Оскільки конструкція спочатку втрачає стійкість, а потім втрачає міцність, то визначення абсолютного значення критичного навантаження є важливою проблемою під час проектування трубопроводів.

Усі елементи гідротехнічних споруд та трубопроводів, які навантажені зовнішнім тиском або в яких внутрішній тиск значно менше зовнішнього, потребують перевірного розрахунку на втрату стійкості.

У результаті чисельного експерименту для прямолинійної сталеві труби умовно нескінченної довжини була отримана залежність критичного зовнішнього тиску (під дією якого конструкція втрачає стійкість) від товщини стінки, яка представлена на рис. 4.

Використання даних представлених на рис. 4 дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності під час їх роботи.

**Висновки.** На основі використання методу скінчених елементів та програмного комплексу Abaqus запропоновано підхід розрахунку на міцність трубопроводів. Цей підхід дозволяє зробити аналіз напружено-деформованого стану трубопроводів з урахуванням гибів та реальних умов експлуатації, що є необхідним на етапі проектування для забезпечення міцності та надійності конструкцій. Показано, що коефіцієнт концентрації напружень для згину труби має нелінійний характер зі значним скачком при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби і супроводжуються втратою стійкості (руйнуванням) системи навіть при незначних навантаженнях, критичні значення яких значно зменшуються при відношенні  $R / D < 1$ . Отримана залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки, яка дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності під час їх роботи.

## Список літератури:

1. Li H.Z., Fagerson R., Stelson K.A., A Method of Adaptive Control of Rotary-Draw Thin Walled Tube Bending With Spring Back Compensation. *Transactions of the North American Manufacturing Research*. Vol. 22, 1994. P. 25–28.
2. Pan K., Stelson K.A. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending. *Journal of Engineering for Industry*. Vol. 117, 1995. P. 494–500.
3. Kim R.-H., Choi G.-D., Kim C.-H., Cho D.-W., Na S.-J. Arc characteristics in pulse-GMA welding with acute groove angles. *Welding journal*. Vol. 91, 2012. P. 101–105.
4. Anxin H.; Su X.; Huafeng S. Current situation of automatic welding of domestic long distance pipelines. *Natural Gas Oil*. Vol. 24 (2), 2006. P. 12–14.
5. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Mettus G.S., Nikonenko D.I. A new approach to the evaluation of danger of short fatigue cracks. *Strength of Materials*. Vol. 32 (3), 2000. P. 286–291.
6. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Москва, 1975. 542 с.
7. FKM–Guideline. Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering / Frankfurt/Main, 2003. 268 p.
8. Норри Д., Фрид Ж. Введение в метод конечных элементов. Москва, 1981. 304 с.
9. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оболочки. Москва, 1970. 556 с.
10. Чемерис О.М., Колодежний В.А., Трубачев С.І. Будівельна механіка машин. Київ, 2017. 258 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18961>.
11. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. Москва : Наука, 1981. 416 с.

**Trubachev S.I., Vorobiov M.V. DETERMINATION OF CONDITIONS OF STRENGTH OF PIPELINES OF ENERGY AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT BY METHODS OF COMPUTER MODELING**

*In the paper an approach to the calculation of the strength of pipelines based on the use of the finite element method and the academic (free) version of the Abaqus software package have been developed. The aim of the work is to determine the stress-strain state of pipe bends, to build an algorithm for numerical modeling of pipeline bends and to determine their strength conditions. The object of research is the processes of stress-strain state of pipe bends. The subject of research – rectangular (knee) bends of pipelines of different radius of curvature. The formulation of the work is caused by the urgency of the task of calculating pipelines and the fact that in the literature there are almost no methods of calculating pipelines taking into account the bends based on three-dimensional models or in the exact formulation of the problem. During the calculation, a model of a steel pipe with a Young's modulus was used  $E = 2 \times 10^{11}$  Pa, Poisson's ratio  $\mu = 0.3$ , density  $\rho = 7800$  kg / m<sup>3</sup>. The diameter of the pipe was 220 mm, the wall thickness was 7 mm. The bend is loaded with an internal pressure of  $1.2 \times 10^6$  Pa. Finite-elementary calculated grids for pipe bending at different radii of curvature in the range of  $0.5 \leq R / D \leq 3$  are constructed. loss of stability (destruction) of the system even at low loads, the critical values of which are significantly reduced at ratio of  $R / D < 1$ . The obtained dependence of the critical external pressure on the wall thickness in the range  $8 \leq D / h \leq 55$  allows the design engineer during design works to select the appropriate range of pipes and assess the strength conditions during their operation. The results obtained in this work can be used for calculations of energy pipelines and for main, municipal utility and process pipelines in a wide range of variations of operating pressures and operating temperatures.*

**Key words:** critical pressure, pipe bends, pipe strength, numerical simulation, stress concentration factor, stress-strain state.