

УДК 536.24:533.6.011

## **ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГНУТИХ ТРУБ**

Трубачов С.І., к.т.н.,

Баранюк О.В., к.т.н.,

Мірошніченко І.В.

*Національний технічний університет України “Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Україна)*

*В роботі запропонований підхід до розрахунку на міцність трубопроводів, оснований на застосуванні метода скінченних елементів реалізованого за допомогою ANSYS Student Edition. Це дозволяє зробити аналіз напружено-деформованого стану та стійкості трубопроводів з урахуванням гибів та реальних умов експлуатації, що в свою чергу є необхідним на етапі проектування для забезпечення міцності та надійності конструкцій.*

*Ключові слова: гнуті труби, трубопровід, концентратор напружень, варіаційно-сітковий підхід, напружено-деформований стан.*

**Постановка проблеми.** Запорукою ефективної роботи опалення є правильний підбір діаметра труб, величина якого впливає на гідродинаміку системи [1]. За матеріалом виготовлення всі труби від малого до великого діаметру можна розподілити на дві основні групи: 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 багатшарові) 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 їх 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 оптимальні характеристики – це невелика маса, низька собівартість. Такі труби можна випускати великими відсіками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку із великою різноманітністю трубопроводів їх розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість при проектуванні з урахуванням реальних умов експлуатації є актуальною проблемою. В котлобудуванні використовуються стандартизовані гини труб, геометричні параметри яких приводяться в відповідних офіційних документах, наприклад [2]. Слід підкреслити, що у теперішній час небагато наукових робіт присвячено розрахунку трубопроводів з урахуванням гибів на основі тримірних моделей або у точній постановці задачі. Розрахунок трубопроводів, як розрахунок стержневих систем або без урахування розподілення напружень в місцях закріплення трубопроводів, або в місцях, де існують концентратори напружень, не завжди дають достовірні результати. Це пов'язано, насамперед, із складністю математичної постановки задачі. Щоб врахувати усі ці фактори необхідно застосувати чисельні методи розрахунку на основі варіаційно-сіткових підходів. В даній роботі пропонується розрахунок трубопроводів з урахуванням гибів, заснований на використанні метода скінчених елементів.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є підготовка рекомендацій щодо розрахунку трубопроводів систем опалення за допомогою методу скінчених елементів, реалізованого в програмі ANSYS Student Edition.

**Основна частина.** Розв'язок прикладних задач чисельними методами будується шляхом зведення заданої континуальної задачі до скінченновимірної. Для цього нескінченновимірний простір допустимих функцій замінюють скінченновимірним  $V_b \subset V$ . Для побудови скінченновимірного простору  $V_b$  застосовується спосіб, в якому за базисні функції приймають функції з кінцевим малим носієм, кожна з яких тільки в порівняно невеликій (порядку кроку сітки  $b$ ) околиці відмінна від нуля, а зовні тотожно дорівнює нулю [1]. Для їх побудови за допомогою сітки здійснюється дискретизація області  $\Omega$ , що займається тілом, 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, яка являє собою многочлен на кожній підобласті  $\Omega_n$ . Всі лінійно незалежні функції такого виду приймаються за базисні.

При побудові скінченновимірних просторів  $V_b$  використовуються кусочнополіноміальні функції, при цьому множина  $\Omega$  представляється у вигляді об'єднання багатокутників  $\Omega_n$ , що не перетинаються. Коефіцієнти полінома в кожному багатокутнику вибирають таким чином, щоб забезпечити потрібну гладкість, а також однозначне визначення полінома з умов, що забезпечують належність наближеного рішення до простору  $V$ . Нехай  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^N$  – система

базисних функцій,  $i$ -й член якої приймає в  $i$ -му вузлі значення, що дорівнює одиниці, а в інших вузлах сітки обертається в нуль.

Тоді функція  $v_b$  може бути представлена у вигляді

$$v_b = \sum_{i=1}^N v_i \varphi(x). \quad (1)$$

Лінійна комбінація (1) визначає функцію  $v_b \in V$  на всю область  $\Omega$  за її вузловими значеннями. Від вибору сітки та системи базисних функцій залежать вид та властивості утвореної варіаційно-сіткової схеми для даної задачі.

При побудові варіаційно-сіткових схем функціонал потенціальної енергії системи на скінченновимірному просторі допустимих функцій  $V_b$  має вигляд

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

де  $C$  – матриця жорсткості,  $f$  – вектор вузлових навантажень.

Варіаційна задача вирішується наближено. Найбільш часто використовується підхід, який оснований на використанні необхідної умови мінімуму функціоналу (2). Тоді виникає задача розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь високого порядку:

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

Тобто ми приходимо до звичайного застосування метода скінченних елементів [2].

Розглянемо вигиб трубопроводу, який застосовується в якості елемента трубопроводу пари та гарячої води теплових станцій (рис. 1). Основними параметрами гибу є: радіус гибу  $R$ , діаметр труби  $D$ , товщина стінки  $h$ . Під час розрахунку використовувалась модель сталеві труби з модулем Юнга  $E = 2 \cdot 10^6$  Па, коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ , густиною  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Діаметр труби дорівнює 220 мм, товщина стінки – 7 мм. Розрахунок проводився з використанням комплексу ANSYS Student Edition.

Розрахунки проводились для гинів, які виготовлялись з найбільш поширених в котлобудуванні марок сталі: 15ГС, Сталь 20 і 12Х1МФ. Всі досліджені елементи знаходились при надлишковому внутрішньому тиску 4,31 МПа і температурі 340 °С, як того потребує стандарт випробувань [2].

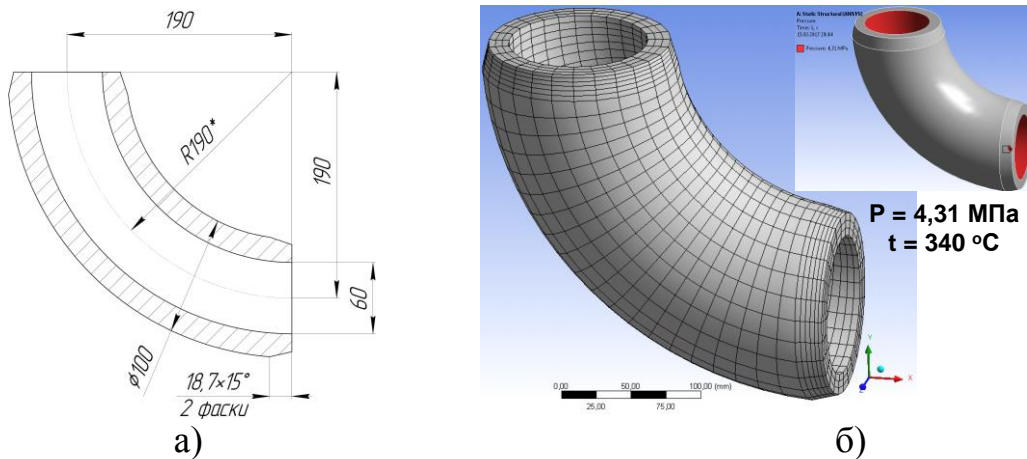


Рис. 1. Кресленик (а) і скінченно-елементна сітка розрахункової моделі (б)

Результат моделювання представлений на рис. 2. Як видно із рис. 2, розподіл полів напружень має суттєво неоднорідний характер. Концентрація напружень відбувається на внутрішній частині поверхні труби в місці її найбільшої кривизни. Рівень напруг, що виникають в навантаженому елементі, знаходиться в межах 10...14 МПа, що значно нижче допустимої, при заданій температурі, напруги.

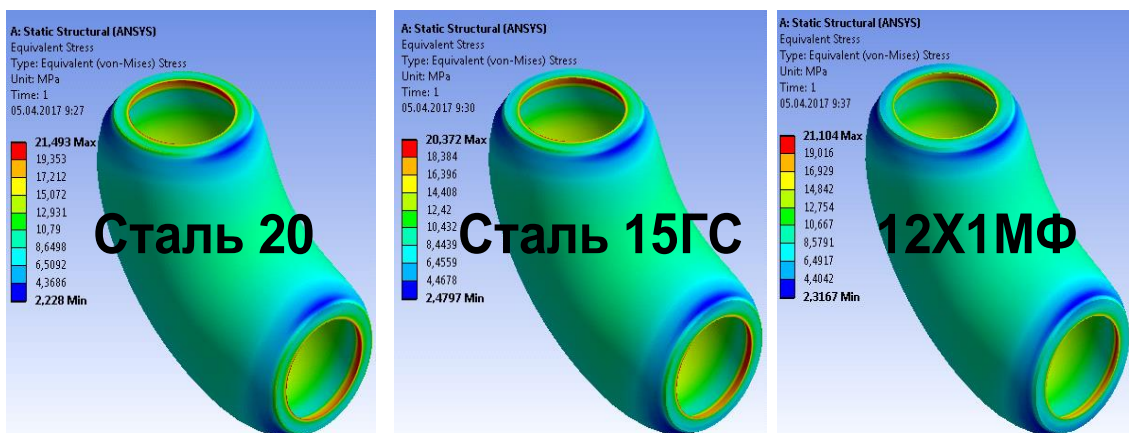


Рис. 2 Розподіл напружень в товщині гину

**Висновки.** В роботі виконано аналіз напружено-деформованого стану та стійкості трубопроводів з урахуванням гибів та реальних умов експлуатації, вибраний з діючого стандарту [2]. Як свідчить проведений аналіз, при дотриманні зазначених в стандарті геометричних параметрів гибів і конструкційних елементів з яких вони виготовлені, діючі на гин навантаження (тиск і температура внутрішнього теплоносія) не призводять до деформації і руйнування гину. Таким чином можна констатувати, що застосування приведеної в статті методики розрахунку є доцільним на етапі проектування для забезпечення міцності та надійності конструкцій.

### *Література*

1. Значення діаметра труб опалення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://remontu.com.ua/znachennya-diametra-trub-opalennya>.
2. СТО ЦКТИ 10.003-2007 Трубопроводы пара и горячей воды тепловых станций. Общие технические требования к изготовлению [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://znaytovar.ru/gost/2/STO\\_CKTI\\_100032007\\_Truboprovod.html](https://znaytovar.ru/gost/2/STO_CKTI_100032007_Truboprovod.html).
3. Марчук Г. И. Введение в проекционно-сеточные методы / Г. И. Марчук, В. И. Агошков. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. FKM - Guideline, Analytical Strength Assesment of Components in Mechanical Engineering [5th, revised edition, English Version]. – Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM). – Frankfurt/Main, 2003. – 268 с.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГНУТЫХ ТРУБ**

Трубачёв С.И., Баранюк О.В., Мирошниченко И.В.

*В работе предложен подход к расчету на прочность трубопроводов, основанный на применении метода конечных элементов реализованного с помощью ANSYS Student Edition. Это позволяет сделать анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов с учетом гибов и реальных условий эксплуатации, что в свою очередь необходимо на этапе проектирования для обеспечения прочности и надежности конструкций.*

*Ключевые слова: гнутые трубы, трубопровод, концентратор напряжений, вариационно-сетевой подход, напряженно-деформированное состояние.*

### **CREATING OPTIMAL PERFORMANCE OF STRESS- STRAIN STATE BENT TRUBES**

Trubachev S., Baranyuk O., Miroshnichenko I.

*The approach to calculating the strength of tubelines based on the use of finite element method implemented using ANSYS Student Edition. This allows the analysis of stress-strain state and stability of tubelines based hybiv and actual operating conditions, which in turn is required at the design stage to ensure the safety and reliability of structures.*

*Keywords: bent tube, tubelines, hub stress variation-net approach, stress-strain state.*