

УДК 536.24:533.6.011

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ В УМОВАХ НЕІЗОТЕРМІЧНОСТІ ВНУТРІШЬОЇ ТЕЧІЇ

Баранюк О.В., к.т.н.,

Рачинський А.Ю., к.т.н.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна)

Стаття присвячена аналізу характеристик міцності гвинтоподібної труби, при течії потоку всередині її в неізотермічних умовах. Такі труби планується використовувати в якості поверхонь нагріву для конденсаторів, парових калориферів, повітря підігрівачів промислових котлів, наприклад Е-50-4-440Г.

Актуальність матеріалу статті нерозривно пов'язана з проблемою модернізації існуючого теплообмінного обладнання. Найбільш металомістка частина в згаданому обладнанні це теплообмінна секція, яка складається, зазвичай, з традиційних круглих або круглорєбристих труб. Зменшити металоемність, можливо застосовуючи методи інтенсифікації теплообміну як з боку потоку, що рухається в середині труб, так і з боку потоку, омиває ці труби ззовні. Саме цим вимогам відповідають розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського гвинтові труби з так званою рівнорозвиненою поверхнею.

В представлений роботі проведено дослідження міцності латунної гвинтоподібної труби з рівнорозвиненою поверхнею при внутрішній течії повітряного потоку засобами CFD-моделювання.

Метою роботи є визначення напружень і деформацій гвинтових труб під впливом внутрішнього тиску неізотермічного потоку. Геометричні характеристики гвинтових труб, при яких спостерігається баланс між теплогідравлічними характеристиками вибрано на основі попередніх робіт авторів. Верифікації даних CFD-моделювання здійснювалася за допомогою зіставлення з тестовою задачею відомою з літератури.

Ключові слова: теплообмін, гвинтоподібна труба, рівнорозвинена поверхня, вимушена конвекція, міцність, технологія трьохроликового обкочування.

Постановка проблеми. Метою роботи є розробка CFD-моделі для визначення теплообміну і аеродинамічного опору, а також характеристик міцності гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею. Ця модель може бути використана при створенні методики розрахунку теплообмінних апаратів, теплообмінна секція яких виготовлена з таких труб, а також дозволить забезпечити швидке виконання інженерних розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гвинтові теплообмінні труби з рівнорозвиненою поверхнею досліджувалися в роботах [1-2]. Ці роботи свідчать, що труби згаданої геометрії, порівняно з гладкими циліндричними трубами, мають одночасно суттєво (в 1,15-1,4 рази) збільшену як зовнішню, так і внутрішню поверхню теплообміну. Завдяки гвинтоподібним виступам-западин, які послідовно чергуються із заданою висотою-глибиною і кроком, вони викликають додаткову турбулізацію примежового шару [2]. За рахунок закрутки внутрішнього і зовнішнього потоків, а також різкої зміни швидкості потоку при омиванні поверхні, відбувається одночасне збільшення інтенсивності внутрішнього і зовнішнього теплообміну. В залежності від геометричних характеристик труб і кроків між ними спостерігається зростання інтенсивності внутрішнього теплообміну в 1,5-2,5, а зовнішнього в 1,1-1,3 рази. За рахунок цього коефіцієнт теплопередачі збільшується на 25-70% в порівнянні з трубами круглого перерізу.

Технологія отримання гвинтових профілів на трубках, розроблена на механіко-машинобудівному інституті КПІ ім. Ігоря Сікорського [3]. Ця технологія дозволяє отримати латунні трубки діаметром 16 мм з однозаходний гвинтоподібним профілем. Основні геометричні параметри дослідних гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею приведені на рис. 1.

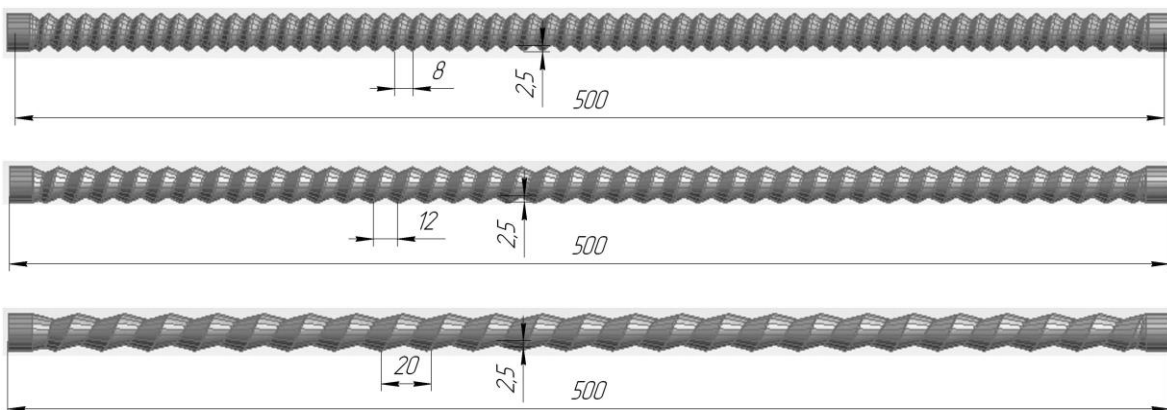


Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідних гвинтоподібних труб

Слід зазначити, що такі труби є перспективними для використання в теплообмінних апаратах, безперервно зростає кількість публікацій з даної тематики, проте дослідження міцності гвинтоподібних труб проведені не були.

Формулювання цілей статті. Мета дослідження – визначити оптимальні геометричні характеристики гвинтових труб, які планується використовувати для створення теплообмінного апарату.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити CFD-модель гвинтоподібної труби з рівнорозвиненою поверхнею;
- провести тестові розрахунки та обчислення теплоаеродинамічних характеристик дослідних гвинтових труб;
- проаналізувати за допомогою CFD-моделі міцність таких труб.

Основна частина. Наведений нижче аналіз виконувався за допомогою розроблених скінчено-елементних CFD-моделей гвинтових труб в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent. Поставлена задача вирішувалася в стаціонарній постановці з дотриманням вимоги досягнення незалежності рішення від щільності розрахункової сітки.

При моделюванні, для всіх досліджених типів труб, розрахунки проводилися при температурі потоку на вході в гвинтоподібну трубу $t_{\text{вх}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$. На зовнішній стінці труби задавалася постійна температура стінки ($t_{\text{ст}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$). Витрата повітря через трубу, складала $1 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$, $9 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$, $9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ та $3 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$. Теплофізичні властивості повітря задавалися у вигляді поліноміальних функцій температури.

Зовнішній вигляд фрагмента скінчено-елементних сіток досліджених типорозмірів труб наведено на рис. 2.

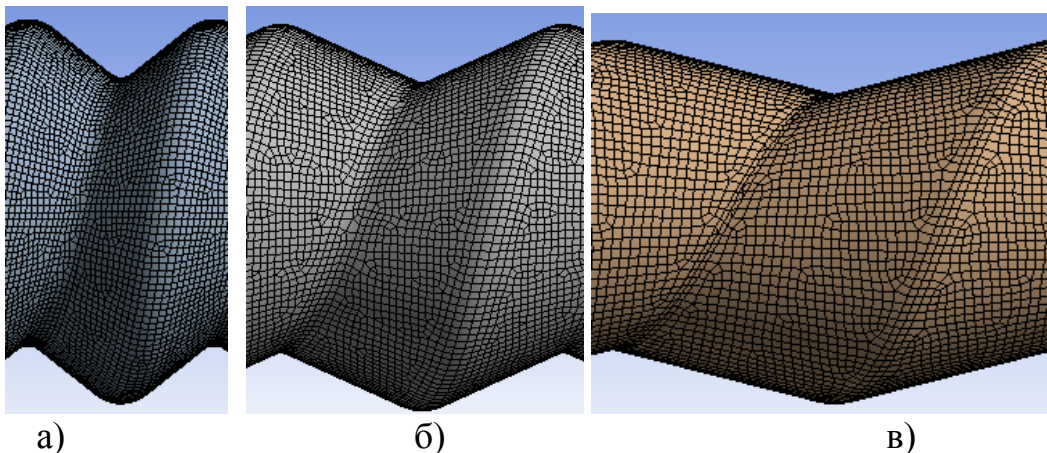


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка моделі гвинтоподібної труби з кроком гвинтової лінії: *a* – 8 мм, *б* – 12 мм, *в* – 20 мм

Система рівнянь, що описують процеси перенесення імпульсу та теплоти всередині дослідних труб, включаючи рівняння нерозривності, руху і енергії в формі Рейнольдса приведені в [4]. Припускаючи складний характер течії в такій трубі, що поєднує особливості, характерні як для пристінних, так і для вільних зсувних течій, з метою замикання базової системи рівнянь використовувалася RSM модель рейнольдсових напружень. Турбулентне число Прандтля для розглянутих умов приймалося 0,9. Згадані рівняння не наводяться також у зв'язку з тим, що вони приведені в User's Guide of Fluent.

Крім теплових характеристик розроблена CFD-модель здатна визначити характеристики міцності. Як цих характеристик вибрано розподіл напружень і переміщень матеріалу стінок труби внаслідок дії температур потоку і тиску на стінку. В роботі [5] авторами було доведено, що розрахунок напружено-деформованого стану циліндричних оболонок і труб з урахуванням всіх конструктивних особливостей є дуже актуальною проблемою. Результати обчислення розподілу напружень і переміщень моделі гвинтоподібної труби з кроком гвинтової лінії 12 мм представлені на рис. 3.

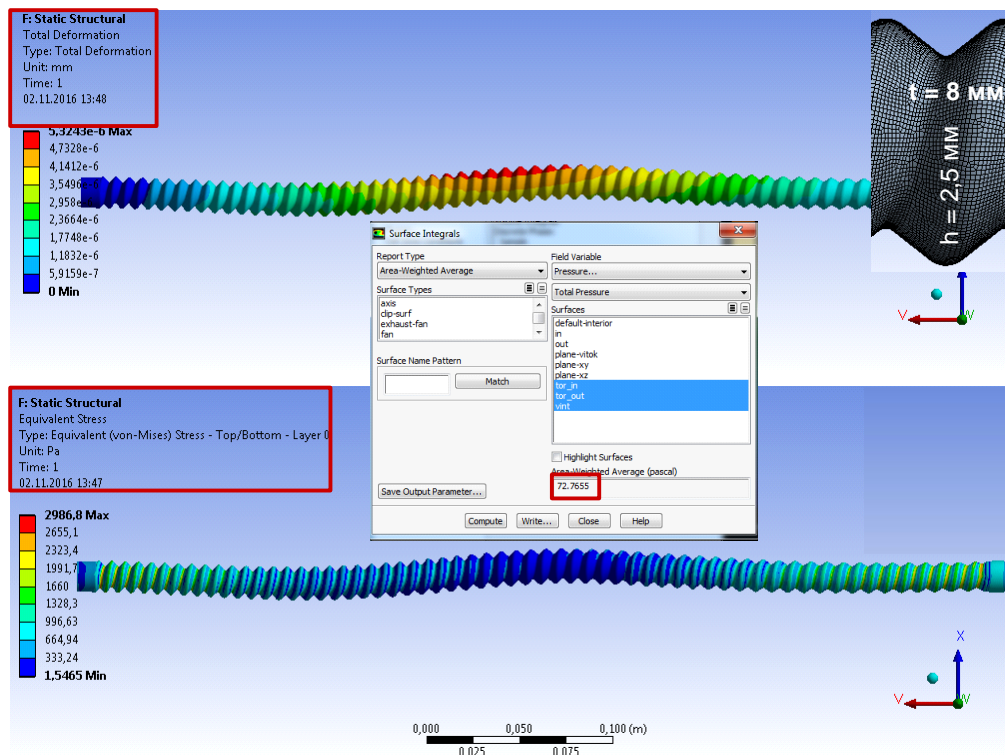


Рис. 3. Розподіл напружень і переміщень матеріалу стінок CFD-моделі гвинтоподібної труби з кроком гвинтової лінії $t = 12 \text{ mm}$

Для всіх інших досліджених форм поверхні гвинтовий труб (кроки гвинтової лінії яких складають 8 та 20 мм) рівень напружень і переміщень майже не відрізняється, тому з метою запобігання перевантаження тексту вони не наводяться. Аналіз напруг (рис. 3) свідчить про те, що для значення перепаду тиску 74 Па, при середній температурі стінки 48 °С спостерігається найбільше переміщення матеріалу стінок моделі в $5 \cdot 10^{-6}$ мм. Це відповідає напрузі 1300 Па. Для порівняння, в гладкою циліндричній трубі (рис. 4), напруги, що виникають в результаті дії надмірного внутрішнього тиску, становить 480 Па.

З метою верифікації отриманих результатів розглянемо дію сил тиску на внутрішню поверхню циліндричної труби. На рис. 5 [6] показана половина циліндра, внутрішній діаметр якого позначимо через D , довжину циліндра через L , і товщину стінки через δ .

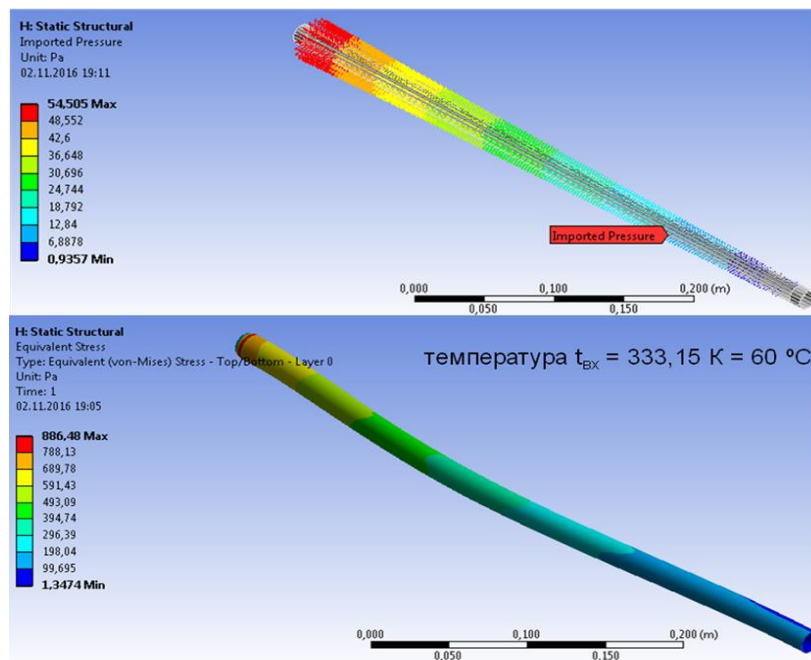


Рис. 4. Розподіл напружень і переміщень матеріалу стінок CFD-моделі гладкою циліндричній труби

За умовами міцності напруги розтягнення не повинні перевищувати допустимих напружень $[\sigma]_p$ або

$$\sigma = \frac{pD}{2\delta} \leq [\sigma]_p, \quad (1)$$

За цією формулою можна визначати фактичні напруги розтягнення σ в стінці труби і, порівнюючи їх з допустимими $[\sigma]_p$, перевіряти міцність стінок циліндричних судин, труб тощо.

При порівнянні результатів розрахунку за формулою (1) і з численними результатами, отриманими за допомогою програмного комплексу ANSYS, максимальна похибка не перевищила 3,5%.

Висновки. Основні висновки по проведеній роботі наступні:

- рішення тестової задачі у вигляді прогнозування течії в гладкій циліндричній трубі свідчить, що перепад тиску визначений за відомим емпіричним залежностям, повністю збігається з даними CFD-моделювання;
- найбільше переміщення матеріалу стінок моделі становить $5 \cdot 10^{-6}$ мм. В гвинтових трубах це відповідає напрузі 1300 Па, тоді як для циліндричної труби 394 Па.

Оцінюючи проведену роботу, можна стверджувати, що результати є попередніми, тобто не враховують тепловіддачу з зовнішньої поверхні і не розкривають всі можливості рівнорозвиненої гвинтоподібної поверхні. Тому для отримання висновку про професійну придатність гвинтових труб з рівнорозвиненою поверхнею потрібні додаткові дослідження.

Литература

1. Письменный Є.М., Рогачов В.А., Терех О.М., Коньшин В.І., Омельчук Д.С. Теплообмін пучків труб з рівнорозвиненою поверхнею. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. №1/8 (61). С. 29-33.
2. Рева С.А., Рогачов В.А., Терех О.М., Алфьорова О.В. Теплообмін малорядних пучків гвинтоподібних труб. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. №3/8 (63). С. 54-56.
3. Маковой В.О., Проценко П. Ю. Особливості профілювання одно- та трьохзахідних гвинтоподібних труб. *Вестник Национального технического университета "ХПИ"*. 2013. №43(1016). С.153-162.
4. Быстров, Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. С-Пб.: Судостроение, 2005. 392 с.
5. Трубочев С.И., Яхно Б.О. Напряжено-деформированное состояние цилиндрических толстостенных перфорированных оболочек. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*, серія Машинобудування, 2015. №67 С.126-130.

6. Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики. М.: Высшая школа, 1974. – 286 с.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ПОТОКА

Баранюк О.В., Рачинський А.Ю.

Статья посвящена анализу характеристик прочности винтообразной трубы, при течении потока внутри ее в неизотермических условиях. Такие трубы планируется использовать в качестве поверхностей нагрева для конденсаторов, паровых калориферов, воздух подогревателей промышленных котлов, например Е-50-4-440Г.

Актуальность материала статьи неразрывно связана с проблемой модернизации существующего теплообменного оборудования. Наиболее металлоемкая часть в упомянутом оборудовании это теплообменная секция, которая состоит, обычно, из традиционных круглых или круглоребристых труб. Уменьшить металлоемкость, возможно применяя методы интенсификации теплообмена как со стороны потока, движущегося в середине труб, так и со стороны потока, что омывает эти трубы извне. Именно этим требованиям отвечают разработанные в КПИ им. Игора Сикорского винтообразные трубы с так называемой равноразвитой поверхностью.

Проведено исследование прочности латунной винтообразной трубы с равноразвитой поверхностью при внутренней течения воздушного потока средствами CFD-моделирования. Целью работы является определение напряжений и деформаций винтовых труб под воздействием внутреннего давления неизотермического потока.

Геометрические характеристики винтовых труб, при которых наблюдается баланс между теплогидравлическими характеристиками выбраны на основе предыдущих работ авторов. Верификации данных CFD-моделирования осуществлялась с помощью сопоставления с тестовой задачей известной из литературы.

Ключевые слова: теплообмен, винтообразная труба, равноразвитая поверхность, вынужденная конвекция, прочность, технология трехроликового обкатывания.

CFD SIMULATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF HELICAL TUBES UNDER NON-ISOTHERMAL CONDITIONS OF THE INTERNAL FLOW

Baraniuk A., Rachinskiy A.

The article is devoted to the analysis of the strength characteristics of a helical tube, with the flow inside it in non-isothermal conditions. Such tubes are planned to be used as heating surfaces for condensers, steam heaters, air heaters of industrial boilers, for example E-50-4-440G.

The relevance of the article material is inextricably linked with the problem of upgrading existing heat exchange equipment. The most metal-intensive part in the mentioned equipment is the heat exchange section, which usually consists of traditional round or round-finned tubes. It is possible to reduce metal consumption, possibly using methods of intensification of heat exchange both from the side of the flow moving in the middle of the tubes and from the side of the flow, washing these tubes from the outside. These requirements are met by those developed at KPI. Igor Sikorsky spiral tubes with a so-called equally developed surface.

A study was made of the strength of a brass helical tube with an equally developed surface during internal flow of air by means of CFD modeling. The aim of the work is to determine the stresses and deformations of the helical tubes under the influence of the internal pressure of the non-isothermal flow.

Geometric characteristics of helical tubes, under which the balance between the thermal-hydraulic characteristics is observed, is selected on the basis of the previous works of the authors. The verification of CFD-modeling data was carried out using a comparison with a test task known from the literature.

Key words: heat exchange, spiral pipe, equally developed surface, forced convection, strength, three-roller rolling technology.