

**О.Д. Солоніченко, В.М. Поводзинський**

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені  
Гюрга Сікорського”*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ У ВИПАРНОМУ АПАРАТІ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ТРУБ У ГРІЮЧІЙ КАМЕРІ**

*У ході дослідження використовується метод комп'ютерного моделювання, яке спрямоване на створення двох моделей труб різної геометрії, по яким транспортується розчин лимонної кислоти за однакових параметрів температур та швидкості з використанням градієнта температур та векторів руху для демонстрації зміни напрямку руху потоків пари в гріючій камері. Моделювання проводилось у програмі Solidworks у пакеті Flow Simulations та Simulations за умов турбулентного режиму руху.*

*Отримано результат, який демонструє, що оребрена труба сприяє турбулізації потоків за рахунок утворення завихрень, рівномірному та більш інтенсивному нагріву поверхні труби, ніж стандартна гладка труба.*

*Ключові слова: випарний апарат, оребрені труби, процес випарювання, гріюча камера, турбулізація потоків.*

**Е.Д. Солоніченко, В.Н. Поводзинський**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ТРУБ В ГРЕЮЩЕЙ КАМЕРЕ**

*В ходе исследования используется метод компьютерного моделирования, направленный на создание двух моделей труб разной геометрии, по которым транспортируется раствор лимонной кислоты при одинаковых параметрах температур и скорости с использованием градиента температур и векторов движения для демонстрации изменения направления движения потоков пара в греющей камере. Моделирование проводилось в программе Solidworks в пакете Flow Simulations и Simulations при турбулентном режиме движения.*

*Получен результат, демонстрирующий, что оребренная труба способствует турбулизации потоков за счет образования завихрений, равномерному и более интенсивному нагреву поверхности трубы, чем стандартная гладкая труба.*

*Ключевые слова: выпарной аппарат, оребренные трубы, процесс испарения, греющая камера, турбулизация потоков.*

**O. D. Solonichenko, V. M. Povodzinskiy**

### **INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION IN THE EVAPORATORY APPARATUS DUE TO CHANGE OF PIPES GEOMETRY IN THE HEATING CHAMBER**

*A computer simulation method is used at the study. There is considered an evaporator with a remote heating chamber installed in a citric acid production line. Such heat exchangers are used in the pharmaceutical, biotechnological, food and chemical industries, as for example for the evaporation of crystallizing solutions and in the production of concentrated mixtures.*

*The aim of the graphic modeling was to create two models of pipes of different geometries, which transport a solution of citric acid at the same parameters of temperature and velocity using a temperature gradient and motion vectors to demonstrate changes in the direction of steam flow in the heating chamber. The simulation was performed in the Solidworks program in the Flow Simulations and Simulations package under conditions of turbulent motion.*

*The obtained results demonstrate that the finned pipe promotes turbulence of flows due to the formation of vortices, uniform and more intense heating of the pipe surface than a standard smooth pipe.*

*Key words: evaporator, finned pipes, evaporation process, heating chamber, turbulence of flows.*

**Постановка проблеми.** Теплообмінні установки знаходять своє призначення у фармацевтичній, біотехнологічній, харчовій та хімічній галузях, зокрема, для випарювання розчинів, що кристалізуються, та при виробництві концентрованих сумішей. Це пов'язано з необхідністю у створенні умов кипіння та можливістю нетрудомісткого очищення трубної решітки у процесі експлуатації при роботі виробничої лінії. Вище зазначене обладнання має значні енерговитрати та металоємність, через необхідність створювати та підтримувати високі температурні значення. У дослідженні запропоновано до застосування розвинену поверхню нагріву труб у гріючій камері, яка реалізується за рахунок оребрення та подальшим порівнянням зі стандартними гладкими трубами.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існує три основних напрямки удосконалення апаратів для випарювання. Перший реалізується за допомогою створювання розвинених поверхонь нагріву труб у гріючій камері. Наприклад, спіральне гофрування [1], однозахідне гофрування [2], утворення заглиблень на поверхні труби [3] або кільцевої накатки [4], оребрення [5]. Другий полягає у використанні протинакипного та антикорозійного оснащення. Як альтернативу застосовують антиадгезійне полімерне покриття. Це робиться для того, щоб уникнути зниження ефективності теплообміну через ймовірну можливість осадження солей з розчину, яке призводить до утворення накипу. Накип, як наслідок, зменшує переріз трубопроводів, збільшує гідравлічний опір та викликає

перерозподіл пари [6]. Третій спрямований на економію енерговитрат шляхом повторного використання вторинної пари. Це можливо тільки при випаровуванні термічно стійких розчинів, адже при цьому вторинна пара має досить великі значення температури, що дозволяє застосовувати її для обігріву власного або іншого апарату технічної лінії [7].

**Постановка завдання.** Метою є дослідження впливу оребреної поверхні труби на процес теплообміну в гріючій камері.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Галузі виробництва біотехнологічних та фармацевтичних продуктів використовують процес випарювання з метою збільшення концентрації або розділення певних розчинів, емульсій, суспензій.

Збільшення концентрації у випарному апараті здійснюється за рахунок часткового видалення розчинника, застосовуючи процес кипіння розчину. В лінії виробництва лимонної кислоти за технологією розташовуються два корпуси випарної установки з винесеною гріючою камерою для поступового підвищення рівня концентрації [8].

Вибір конкретної конструкції випарного апарату потребує наявності відповідності щодо вимог до кінцевого продукту (якість, концентрація, структура), а також раціональність щодо енергетичних та експлуатаційних затрат.

Використовуючи програму SolidWorks були побудовані дві моделі труб з гріючої камери. З метою зменшення часу на розрахунок а також для локальної демонстрації процесів вирішено розглядати частину всього габариту труби, що складає 1 метр. Діаметри залишаються стандартними (рис. 1).

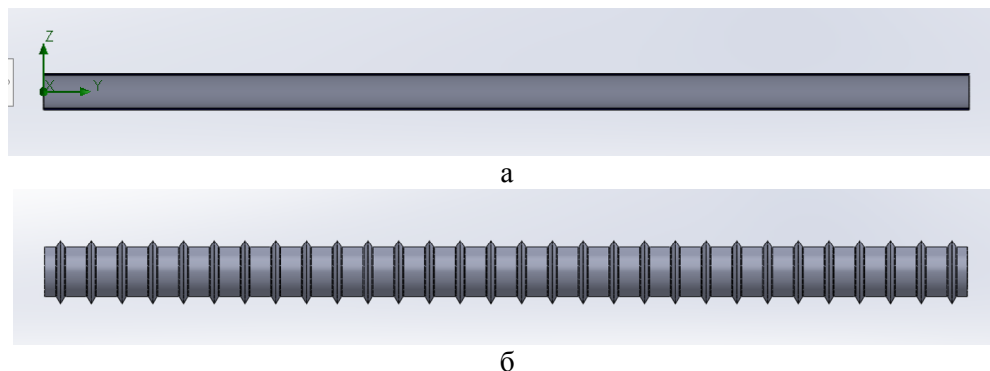


Рис. 1. Конструкція труб : а – гладка; б – оребрена

Моделювання проводилось за умов турбулентного режиму руху. Гарячий теплоносій являє собою пару з температурою 127 °С та поступає в середовище пучка труб зі швидкістю 15 м/с. Розчин лимонної кислоти всередині труб надходить з температурою 80 °С та швидкістю 2 м/с. Матеріал труби – нержавіюча сталь 12Х18Н10Т, товщина стінки – 3 мм, коефіцієнт теплопровідності становить 16 Вт/ м·°С [9]. Висота ребер відносно вісі – 5 мм, шаг – 25 мм. Задача є зовнішньою, тому детальними даними щодо розчину можна знехтувати. Час випробування – 10 с.

Для візуалізації напряму потоків пари в пакеті Flow Simulation застосовувалась функція додавання векторів, а інтенсивність теплообміну передає градієнт температур.

Одержані результати демонструють наявну інтенсифікацію процесу теплообміну. На першому етапі розглянемо гладку трубу. Максимальна температура поверхні – 121 °С, мінімальна – 116 °С. Візуально встановлюємо нерівномірність нагріву площі поверхні, що сповільнює передачу тепла до розчину (рис. 2).

При збільшенні зображення перерізу профілю труби, відмічаємо різницю температур зовнішньої та внутрішньої поверхні, яка становить 4 °С (рис. 3).

Окремо відзначаємо вектори руху гарячого теплоносія, які оминають поверхню труби не створюючи завихрень, тому на обігрів поверхні буде відводитися значно більше часу, що, в свою чергу є економічно невігідним (рис. 4).

На другому етапі розглядаємо інтенсифікацію теплопередачі оребреної труби (рис. 5). Візуально можна відмітити, що по всій поверхні перерізу відносно сталий показник, який становить 127 °С ( рис. 6 ). Можна зробити твердження про рівномірний розподіл теплоти на зовнішній поверхні. Так як перепад температур зовнішньої та внутрішньої стінки буде менше 4 °С, час на загальний нагрів розчину відповідно зменшується, в порівнянні з гладкою трубою.

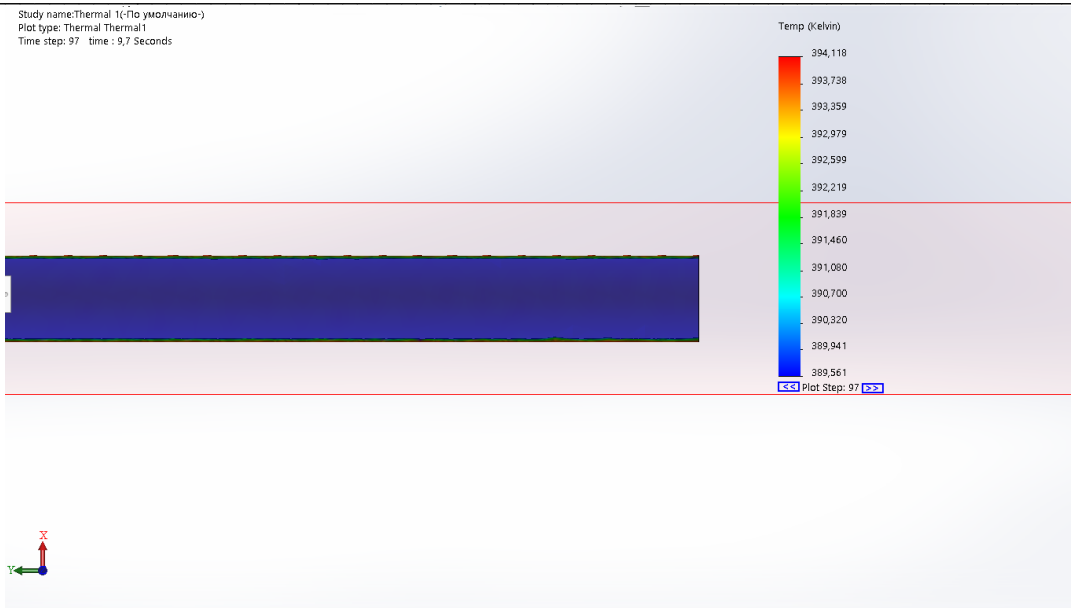


Рис. 2. Градієнт температур гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

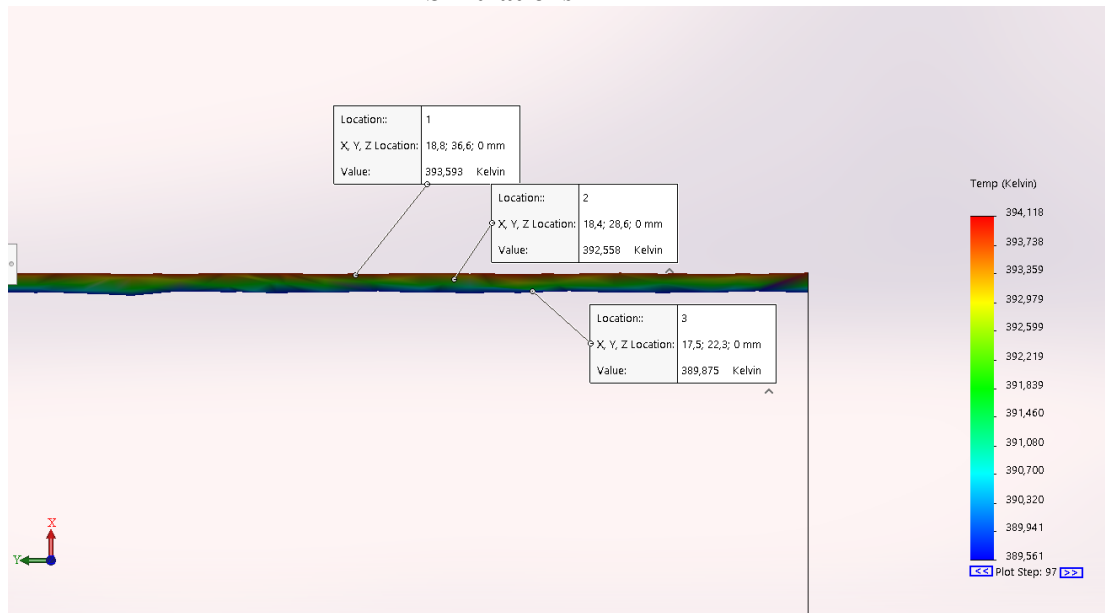


Рис. 3. Градієнт температур гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

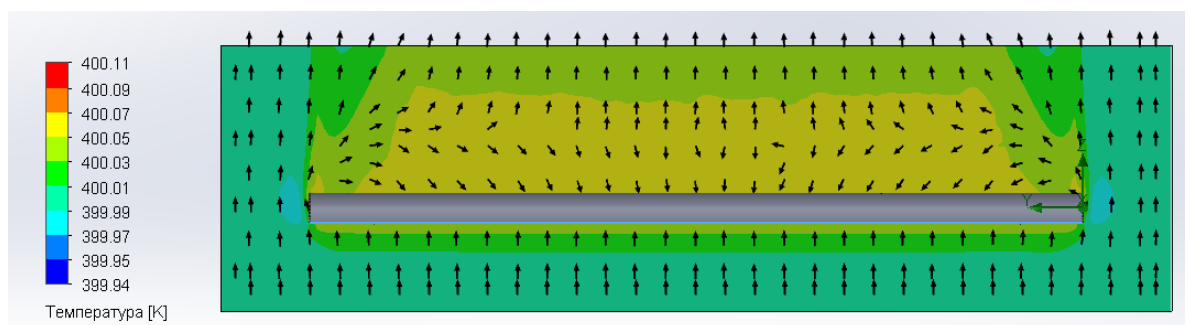


Рис. 4. Вектори руху гарячого теплоносія зовні поверхні гладкої труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Flow Simulations

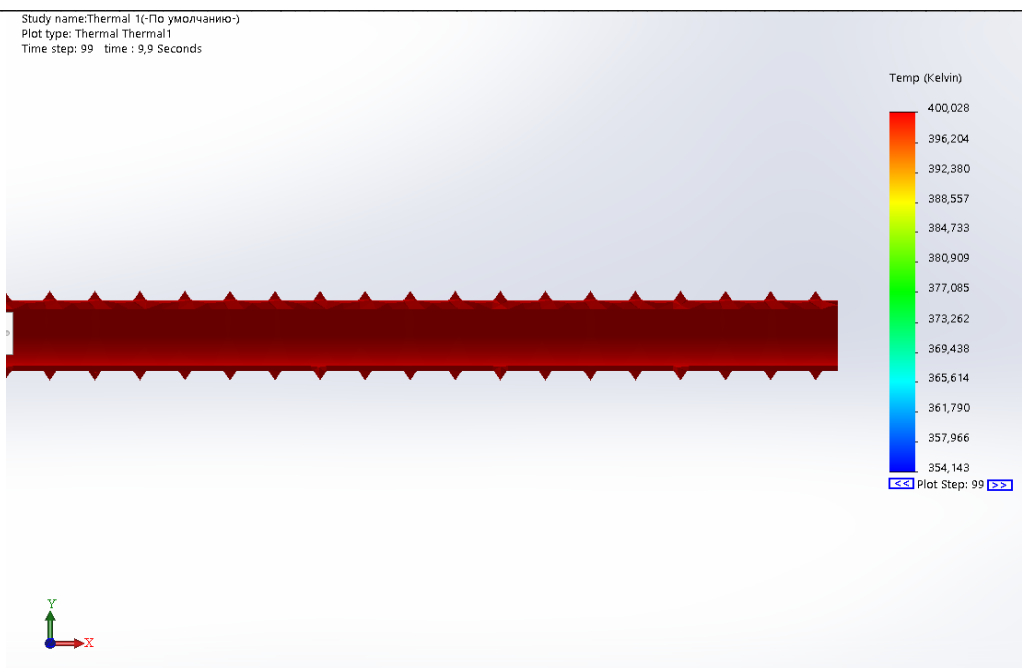


Рис. 5. Градієнт температур оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

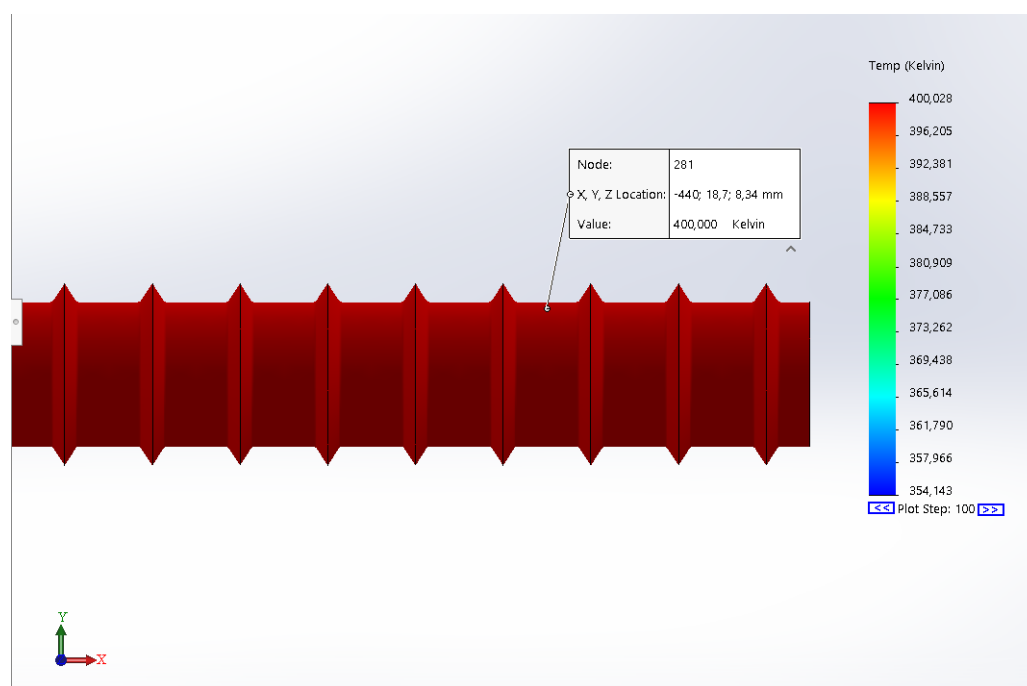
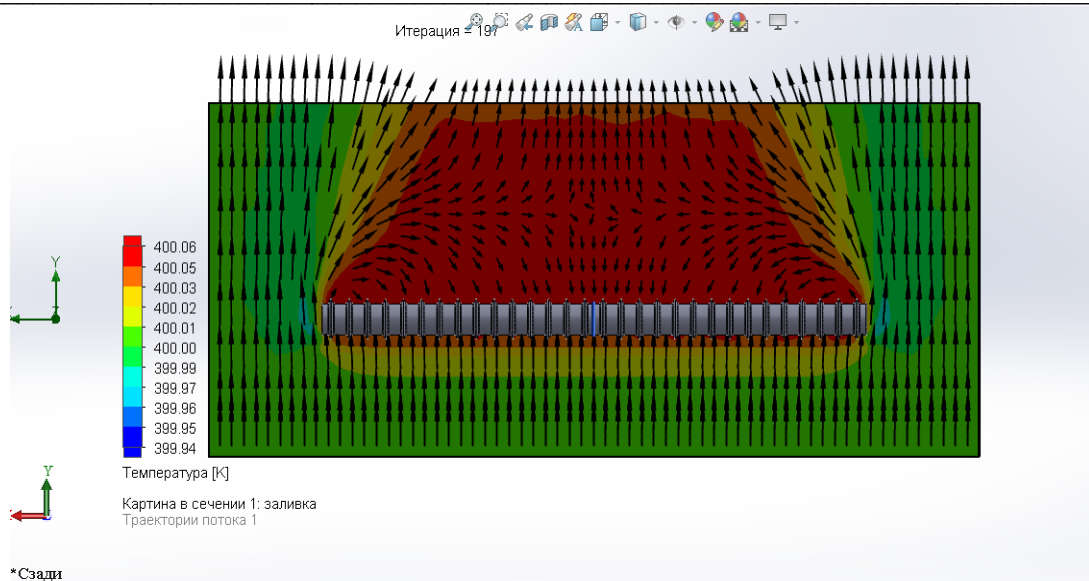


Рис. 6. Градієнт температур оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Simulations

Аналізуючі отримане зображення руху теплоносія ззовні поверхні труби, можна підтвердити, що за рахунок оребрення потоки пара утворюють завихрення в зоні поблизу поверхні труби, що, в свою чергу, приводить до покращення передачі тепла (рис. 7) [10]. Як наслідок, маємо значно менший затрачений на загальний обігрів площі поверхні, а отже, економію ресурсів на обігрів.

В порівнянні з гладкою трубою, де температура всередині досягала  $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в оребреній фіксується стає значення  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Різниця складає  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що підтверджує ефективність останньої.



**Рис. 7. Вектори руху горячого теплоносія зовні поверхні оребреної труби, отриманий у пакеті доповнення SolidWorks Flow Simulations**

**Висновки.** Отримано результат, який демонструє, що оребрена труба сприяє турбулізації потоків за рахунок утворення завихрень, рівномірному та більш інтенсивному нагріву поверхні труби, ніж стандартна гладка труба. Методика, що використовувалась в дослідженні, може бути застосована при розробці подальших конструкцій випарних апаратів.

#### Список використаних джерел

1. Zaid S., Mohd Jaafar M. N., Tholudin M. Lazim, Shahrir A., Ammar F. Abdul Wahid Heat transfer enhancement in two-start spirally corrugated tube. Олександрійський інженерний журнал, 2015. Вип. 54, 415-422 с.
2. Vicente P. G., Garc A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. Vol. 47, 671-681 p.
3. Rainieri S., Bozzoli F., Cattani L. Passive techniques for the enhancement of convective heat transfer in single phase duct flow. Journal of Physics: Conference Series Italia, 2014. 1-10 p.
4. Махди Я. Ю., Бокарев Е. И., Бараков А. В. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления в криволинейном канале с кольцевыми турбулизаторами. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2013. Том 1, №9, 138-140 с.
5. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование омывания поверхности труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оречением. Международный научно-исследовательский журнал, 2014. №2 (21), 76 – 80 с.
6. Перцев Л. П., Ковалев Е. М., Фокин В. С. Трубчатые испарительные аппараты для кристаллизующих растворов, Пособие по проектированию М., 1982. – 70 с.
7. Плановський А. Н., Ніколаєв П. Н. Процеси і апарати хімічної і нафтохімічної технології: Навч. для вузів. - 3-йє изд., перераб. я доп. – М.: хімія, 1987. - 496 с.
8. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
9. ГОСТ 5632-2014. Сталі висококолігвані і сплави корозійностійкі, жаростійкі і жаропрочні // Маркі.
10. Константинов С. М. Теплообмін [Текст] : підруч. для студентів вищ. техн. навч. закл. / Під ред. С. М. Константинов. – Політехніка : Інрес, 2005. 303 с.

**Рецензент** Шибецький Владислав Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехніки та інженерії НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”.