

УДК 620.92

ТРУБЧАТИЙ ТЕПЛООБМІННИК СПІРАЛЬНОГО ТИПУ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

Русанов Р.А.¹, доктор філософії, Русанов А.В.², академік НАН України, Дегтярьов К.Г.³, кандидат технічних наук, Крютченко Д.В.⁴, доктор філософії

¹старший науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2930-2574>

²директор Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, rusanov@ipmach.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9957-8974>

³науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, wollydenis@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6804-6991>

⁴старший науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, Україна, 61046, kdeg89@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4486-2468>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.6>

Робота присвячена аналізу методика розрахунку трубчастого теплообмінника, який використовується для роботи з енергоносіями при високих температурах. Теплообмінники такого типу широко застосовуються в різних галузях промисловості. У даній роботі розглядається методика розрахунку трубчастого теплообмінника, призначеного для роботи з енергоносіями при високих температурах. Такі теплообмінники широко використовуються в різних галузях промисловості, включаючи енергетику, нафтохімію, металургію та харчову промисловість. Ефективність їхньої роботи безпосередньо впливає на енергозбереження та загальну продуктивність технологічних процесів. У дослідженні наведено основні принципи теплового та гідравлічного розрахунку теплообмінника, включаючи визначення теплових потоків, коефіцієнтів теплопередачі, температурних напорів та втрат тиску в системі. Розглянуто методи оптимізації теплообмінного процесу, спрямовані на підвищення ефективності роботи обладнання за рахунок вибору матеріалів, геометричних параметрів та режимів експлуатації.

This paper examines the methodology for calculating a tubular heat exchanger designed to operate with energy carriers at high temperatures. Such heat exchangers are widely used in various industries, including energy, petrochemicals, metallurgy, and the food industry. Their efficiency directly impacts energy savings and the overall productivity of technological processes. The study presents the main principles of thermal and hydraulic calculations of the heat exchanger, including the determination of heat flows, heat transfer coefficients, temperature gradients, and pressure losses in the system. Methods for optimizing the heat exchange process are considered, aimed at improving equipment efficiency by selecting appropriate materials, geometric parameters, and operating modes.

Бібл. 9, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: трубчастий теплообмінник, тепловий розрахунок, теплопередача, температурний напір, енергоносіє, ефективність теплообміну.

Вступ. Теплообмінники — це пристрої, які використовуються для ефективного обміну теплом між двома або більше рідинами або газами. Існує кілька видів теплообмінників: пластинчасті, трубчасті, роторні, повітряно-водяні, теплообмінники з оболонкою та трубами.[1]

Трубчасті теплообмінники широко застосовуються в різних галузях промисловості як в Україні так і в усьому світі. Зокрема в енергетиці, металургії, хімічній та нафтохімічній промисловості. Їхнє дослідження та вдосконалення мають особливу актуальність через зростаючі вимоги до ефективності, надійності та безпеки роботи обладнання в умовах екстремальних

температур і агресивних середовищ. Варто зазначити стрімке розповсюдження та зростання значення високотемпературної енергетики у світі. Підвищення ефективності парових і газових турбін потребує нових, більш точних підходів та рішень у теплообмінниках, також посилення екологічних стандартів щодо зменшення викидів CO₂ стимулює розробку ефективних теплообмінних систем, які зменшують втрати тепла та енергоспоживання. [2]

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Теплообмінні апарати відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної роботи енергогенеруючих установок, сприяючи оптимальному перенесенню тепла

між робочими середовищами при мінімальних енергетичних втратах. Останні дослідження та публікації у цій сфері зосереджені на підвищенні теплової ефективності, збільшенні довговічності обладнання, а також розробці інноваційних матеріалів і конструкцій. Сучасні дослідження приділяють особливу увагу оптимізації геометрії теплообмінників, зокрема спіральних, пластинчастих і кожухотрубних конструкцій, для покращення теплопередачі. Використання методів комп'ютерного моделювання (CFD) [3] та експериментальних підходів дозволяє оцінювати коефіцієнти теплопередачі, втрати тиску та температурні градієнти, що сприяє підвищенню ефективності роботи теплообмінного обладнання в паро- та газотурбінних циклах. Останні публікації [8-9] висвітлюють розробку термостійких матеріалів, зокрема спеціальних сплавів і керамічних покриттів, що подовжують термін служби теплообмінників в екстремальних умовах. Запровадження антикорозійних покриттів і самоочисних поверхонь дозволяє зменшити забруднення та підвищити довговічність обладнання на енергетичних об'єктах.

Дослідження трубчастих теплообмінників для роботи в екстремальних умовах є важливим як для світової промисловості, так і для України. Вдосконалення конструкцій, застосування нових матеріалів та підвищення ефективності теплообміну сприятиме розвитку енергетики, промисловості та оборонного сектору, забезпечуючи економічну вигоду та екологічну безпеку.

Вибір типу теплообмінника залежить від умов експлуатації, необхідної продуктивності, вартості та інших факторів. Трубчасті теплообмінники ідеально підходять для використання в умовах високого тиску і

високої температури. Також їх легко встановлювати, демонтувати, відносно легко виготовляти та обслуговувати, тому в розрахунку вирішено використовувати саме цей тип теплообмінника. Також обрана конструкція теплообмінника має довгий експлуатаційний період, що дозволяє його використання у механізмах, які не потребують регулярного технічного обслуговування.

Постановка проблеми. Підбір теплообмінника для ефективного теплообміну в промислових установках значною мірою залежить від конструкції та розрахунку теплообмінного обладнання. Трубчасті теплообмінники широко використовуються в енергетиці, хімічній та нафтохімічній промисловості, оскільки забезпечують високу ефективність теплопередачі та довговічність.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Метою даної роботи є розробка методики розрахунку трубчастого теплообмінника, що працює при високих температурах (1000 °C та 700 °C), для забезпечення ефективного теплообміну та довговічності обладнання.

Методика проведення досліджень.

Дослідження трубчастого теплообмінника, що працює при високих температурах, включає комплексний підхід.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів.

В роботі було створено геометричні моделі та розраховано 2 типи теплообмінників трубного типу.

Спочатку використано наступну теплову схему.

Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів, яка представлена на рис. 1 працює за циклом Брайтона, зараз ми розглядаємо тепло- обмінний апарат у наданому циклі.

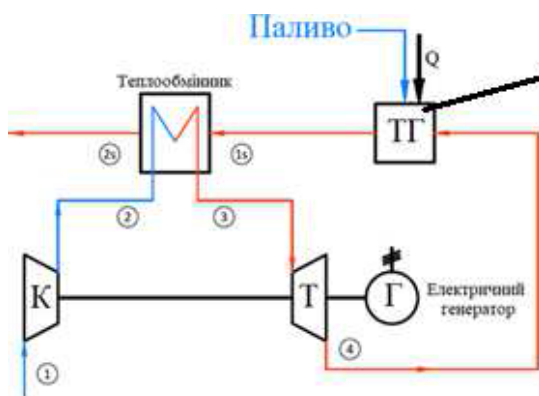


Рис. 1. Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів

Fig. 1. Highly efficient electricity generating plant based on the use of uncertified biofuel from agricultural waste

Таблиця 1. Параметри повітря

Table 1. Air parameters

Вихід газу	Вихід повітря
1134 К	587 К

Граничні умови задачі виглядають наступним чином:

Внутрішній діаметр зовнішньої труби – 0.55 м (адіабатний процес);

Діаметр внутрішньої труби – 0.272 м;

Довжина 16.39 м зовнішньої труби – граничні умови 3го роду зовні ($a = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, 273 К).

Щоб розрахувати необхідну довжину труби для нагрівання холодного повітря від 116°C до 600°C, використовуючи гаряче повітря з температурою 1000°C на вході і 200°C на виході, масова витрата повітря $35/5=0.7 \text{ кг}/\text{с}$, використаємо закон теплопередачі і врахуємо геометрію теплообмінника.

Вхідні дані:

температура холодного повітря на вході: 116 С;

температура холодного повітря на виході: 600 С;

температура гарячого повітря на вході: 1000 С;

температура гарячого повітря на виході: 200 С;

масова витрата холодного повітря: 0.7 кг/с;

коефіцієнт теплопередачі $U=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

діаметр труби з холодним повітрям: $D=0.272 \text{ м}$.

Теплову потужність, необхідну для нагріву холодного потоку, можна визначити за формулою:

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_x c \Delta T \quad (1)$$

де:

$\dot{m}_x = 0.7 \text{ кг}/\text{с}$ — масова витрата холодного повітря,

$c = 1005 \text{ Дж}/(\text{кгК})$ — питома теплоємність повітря,

$$\Delta T = 600 \text{ С} - 116 \text{ С} = 484 \text{ К}. \quad (2)$$

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_x c \Delta T = 0.7 \cdot 1005 \cdot 484 = 340,3 \text{ Дж} / \text{с};$$

Для теплообміну в умовах протитечії (зустрічних потоків) середня логарифмічна різниця температур визначається за формулою [5]:

$$\Delta T_{сер. лог.} = \frac{(T_{г. вх.} - T_{х. вих.}) - (T_{г. вих.} - T_{х. вх.})}{\ln \left(\frac{(T_{г. вх.} - T_{х. вих.})}{(T_{г. вих.} - T_{х. вх.})} \right)}; \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{(1000 - 600) - (200 - 116)}{\ln \left(\frac{(1000 - 600)}{(200 - 116)} \right)} = \frac{400 - 84}{\ln \left(\frac{400}{84} \right)} = 242.9 \text{ К};$$

Формула для теплопередачі:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{сер. лог.}; \quad (4)$$

де:

$$\dot{Q} = 340,3 \text{ Дж}/\text{с};$$

$$U = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К});$$

$$\Delta T = 242.9 \text{ К}.$$

Знайдемо необхідну площу поверхні теплообміну А:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{сер. лог.}} = \frac{340.3}{50 \cdot 242.9} = 28 \text{ м}^2$$

Для теплообмінника типу "труба в трубі" площа поверхні теплообміну визначається як [6]:

$$A = \pi \cdot D_{сер.} \cdot L; \quad (5)$$

де:

$$D_{сер.} = 0.272 \text{ м},$$

L — довжина труби.

Знайдемо довжину труби L :

$$L = \frac{A}{\pi D_{сер.}} = \frac{28}{\pi \cdot 0.272} = 32.77 \text{ м}; \quad (6)$$

Результати попереднього розрахунку свідчать, що для 5 труб з діаметром 0.272 метри, необхідна довжина складає 32.77 метри.

Збільшення кількості трубчастих елементів прямо пропорційне зменшенню їх довжини [4], наприклад, при використанні десяти труб загальна довжина теплообмінника складе:

$$L = \frac{32.77}{2} = 16.39 \text{ м};$$

На рисунку 2, 3 зображено розподілення температури та швидкості повітря по теплообміннику.

На рисунку 4 зображена загальна геометрія трубчастого теплообмінника.

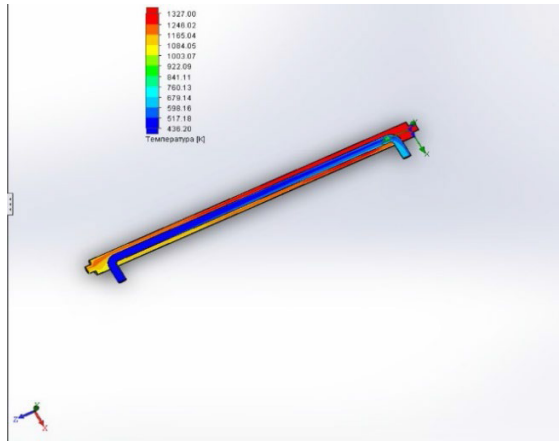


Рис. 2. Розподілення температур, К
Fig. 2. Temperature distribution, K

Далі оптимізовано параметри спіральної труби:

Довжина труби: розраховано, що для прямої труби необхідна довжина становить 16.39 метрів для кожної труби. Крок спіралі (h): це відстань між сусідніми витками спіралі по вертикалі. Радіус спіралі (R): це відстань від центру спіралі до осі труби. Кількість витків (N): залежить від загальної довжини труби і радіуса спіралі. Розрахунок довжини спіральної труби

Довжина спіральної труби визначається за формулою

$$L = N \cdot \sqrt{(2\pi R)^2 + h^2}; \quad (7)$$

де:

L — загальна довжина труби (в метрах),

N — кількість витків,

R — радіус спіралі (в метрах),

h — крок спіралі (в метрах).

Визначимо кількість витків і крок спіралі.

Вибір радіуса спіралі та кроку залежить від конструктивних обмежень.

Нехай радіус спіралі становить 0.5 метра. Тоді кожен виток по горизонталі матиме довжину:

$$L = 2\pi R = 2\pi \cdot 0.5 = 3.14\text{ м}; \quad (8)$$

Якщо загальна довжина труби L повинна бути 16.39 метрів, кількість витків без урахування вертикального підйому буде:

$$N = \frac{L}{L_{\text{один виток}}} = \frac{16.39}{3.14} \approx 5.22 \text{ витків};$$

Крок спіралі h становить $h=0.5\text{ м}$ (50 см між витками по вертикалі).

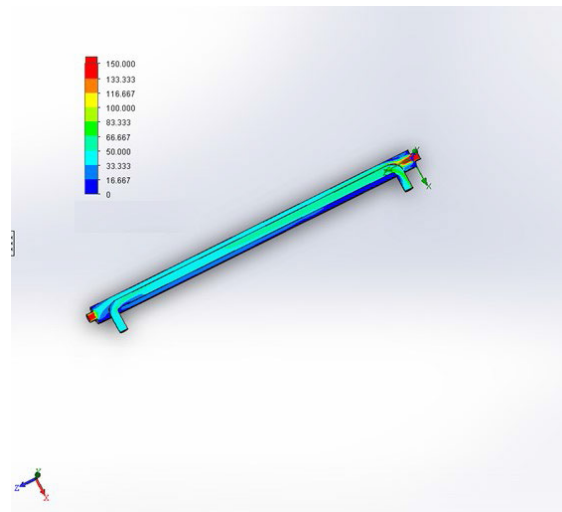


Рис. 3. Швидкість повітря у теплообміннику, м/с
Fig. 3. Air speed in the heat exchanger, m/s



Рис. 4. Загальна геометрія теплообмінника.
Теплообмінник спірального типу
Fig. 4. General geometry of the heat exchanger
Spiral type heat exchanger

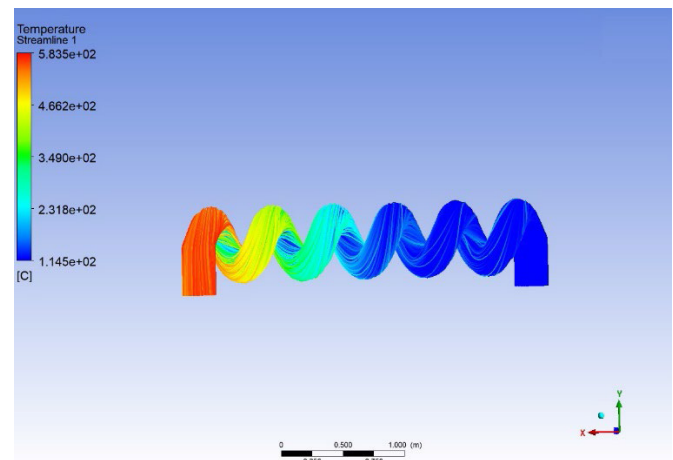


Рис. 5. Розподілення температури вздовж спіральної труби, С

Fig. 5. Temperature distribution along the spiral pipe, C

$$L = N \cdot \sqrt{(2\pi R)^2 + h^2} = 16.2\text{ м};$$

На рисунку 5, 6 зображено розподілення температур та швидкості енергоносія у спіральній трубі.

На рисунку (7) представлено розподілення швидкості у спіральній камері/трубі.

Проміжні результати комп'ютерного аналізу свідчать, що розраховані швидкість та тиск знаходяться у діапазоні шуканих параметрів у спіральній трубі діаметром 0.272м, тому для труби з більш великим діаметром ці параметри будуть ще кращі.

Далі перейдемо до дослідження зовнішньої труби діаметром 0.8м.

На рис. 8, 9 зображено розподілення температур та швидкостей у трубі.

На рисунку 10 зображено входи та виходи гарячого повітря температурою 1000 С та холодного повітря температурою 240 С.

Теплообмінник включає наступні основні конструктивні елементи: корпус, трубний спіраль, вхідні та вихідні патрубки для енергоносіїв.

Щоб нагріти холодне повітря з 116°C до 600°C, використовуючи гаряче повітря з 1000°C на вході і 200°C

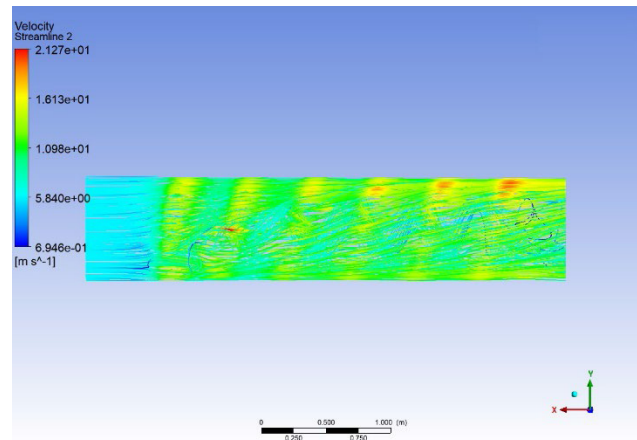


Рис. 8. Розподілення швидкості вздовж труби, м/с

Fig. 8. Velocity distribution along the pipe, m/s

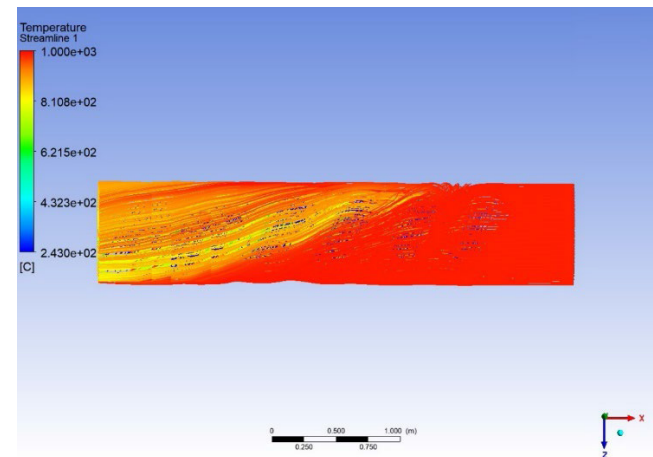


Рис. 9. Температура на вздовж труби, С

Fig. 9. Temperature along the pipe, C

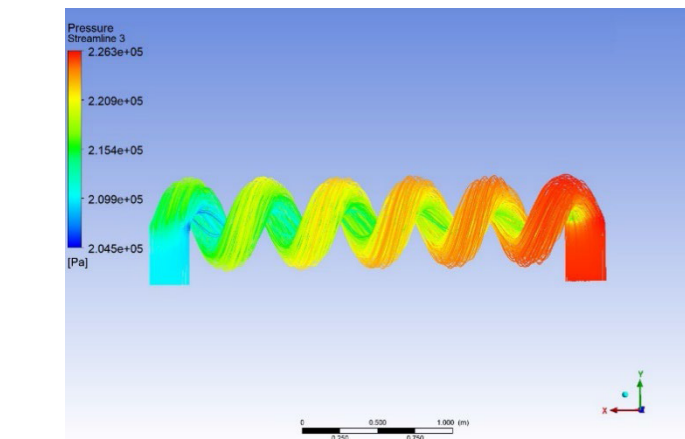


Рис. 6. Розподілення тиску вздовж спіральної труби,

Pa

Fig. 6. Pressure distribution along the spiral pipe, Pa

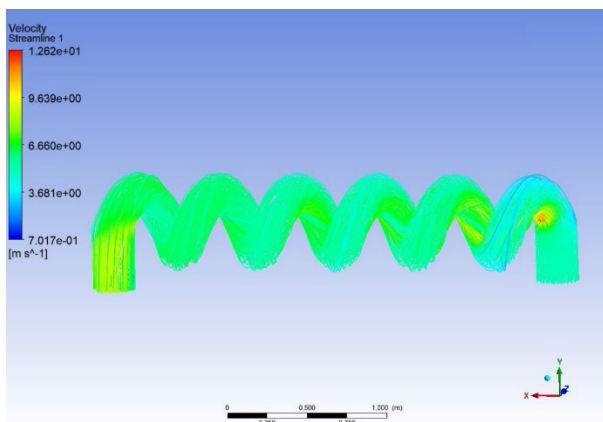


Рис. 7. Розподілення швидкості вздовж спіральної

труби, м/с

Fig. 7. Velocity distribution along the spiral pipe, m/s

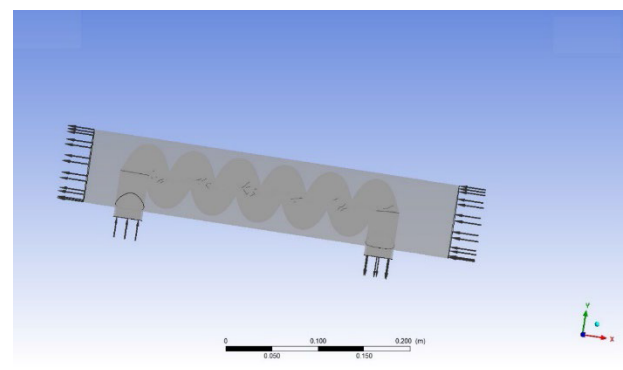


Рис. 10. Входи та виходи повітря у теплообміннику

Fig. 10. Air inlets and outlets in the heat exchanger

на виході, при діаметрі труби 0.272 м з масовою витратою 0.7 кг/с потрібно використовувати 5 труб, необхідна довжина кожної труби з холодним повітрям складе приблизно 32.77 метра. Тобто, з метою підвищення компактності конструкції, можна використовувати не 5 труб з діаметром 0.272 метри і довжиною 32.77 метри, а 10 труб довжиною 16.39 метри з масовою витратою 0.35 кг/с і діаметром 0.272 метри.

Висновки.

Розроблено, засновану на методі скінченних елементів, методику комп'ютерного розрахунку трубчастого теплообмінника, який працює при високих температурах.

Запропоновано конструкцію принципово нового трубчастого теплообмінника для роботи в екстремальних умовах.

Проведено розрахунки параметрів трубчастого теплообмінника, призначеного для роботи з енергоносіями при високих температурах.

Наведено основні принципи теплового та гідравлічного розрахунку теплообмінника, його температурних напорів, тиску.

Подяка.

Робота виконана за підтримки грантів НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2024-2025 рр. "Високоєфективна електрогенеруюча установка на основі використання несертифікованого біопалива з сільськогосподарських відходів."

ЛІТЕРАТУРА

1. Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Vyshnievskiy V.M., Hrakov D.P., Hrakov O.P. Sushinnya bilokachannoyi kapusty na konvektyvniy sushartsi [Drying white cabbage on a convective drying stand]. Thermophysics and thermal power engineering, 2021; 43 (3), 24-29. (in Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.3>
2. Rusanov, A., Chugay, M., Rusanov, R. Advanced Computer Technologies in the New Flow Part Development for Reactive Type HPC Steam Turbine of T-100 Series. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 55–63, https://doi.org/10.15407/10.1007/978-3-031-18487-1_6

3. A Rusanov, A. V., Shvetsov, V. L., Kosianova A. I., Bykov Yu. A., Pashchenko, N. V., Chugay M. A., Rusanov, R. A. The gas-dynamic efficiency increase of the K-300 series steam turbine control compartment. J. of Mech. Eng., 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.006>

4. E Strelnikova, N Choudhary, K Degtyariv, D Kriutchenko, I Vierushkin, Boundary element method for hypersingular integral equations: Implementation and applications in potential theory. Engineering Analysis with Boundary Elements 169. 2024. 105999. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

5. Denys Kriutchenko, Elena Strelnikova, Yuriy Naumenko, Olga Zaydenvarg. Boundary Element Methods for Hypersingular Integral Equations Over Circular Domains. The Fundamentals of Boundary Element Methods. 2024.Pp-73-77. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

6. Avramenko, A.M., Shevchenko, A.A., Chorna, N.A., Kotenko, A.L. Application of highly efficient hydrogen generation and storage systems for autonomous energy supply. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2021, 2021(3), pp 69–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/069>

7. O. Sierikova, E. Strelnikova, K. Degtyariv. Numerical Simulation of Strength and Aerodynamic Characteristics of Small Wind Turbine Blades (2023) Lecture Notes in Networks and Systems, 657 LNNS, pp. 357 - 370. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-36201-9_31

8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modelling. Open Engineering (formerly Central European Journal of Engineering) 2015, Vol. 5, pp. 399-410 <https://doi.org/10.1515/eng-2015-0047>

9. Rusanov, A., Subotin, V., Rusanov, R. et al. Development of the flow part of reactive type hpc of k-325-23.5 series steam turbine based on the use of modern computer technologies, Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 24. No. 4. P. 6-16 . <https://doi.org/10.15407/pmach2021.04.006>

SPIRAL-TYPE TUBULAR HEAT EXCHANGER FOR HIGH-EFFICIENCY POWER GENERATION UNIT

R.A. Rusanov¹, A.V. Rusanov², D.V. Kriutchenko³,
K.G. Degtyarev⁴.

¹senior researcher, *Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua, https://orcid.org/0000-0003-2930-2574*

²director of *Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, rusanov@ipmach.kharkov.ua, https://orcid.org/0000-0002-9957-8974*

³researcher, *Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, wollydenis@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6804-6991*

⁴senior researcher, *Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv st., 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046, kdeg89@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4486-2468*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.6>

This paper examines the methodology for calculating a tubular heat exchanger designed to operate with energy carriers at high temperatures. Such heat exchangers are widely used in various industries, including energy, petrochemicals, metallurgy, and the food industry. Their efficiency directly impacts energy savings and the overall productivity of technological processes.

The study presents the main principles of thermal and hydraulic calculations of the heat exchanger, including the determination of heat flows, heat transfer coefficients, temperature gradients, and pressure losses in the system. Methods for optimizing the heat exchange process are considered, aimed at improving equipment efficiency by selecting appropriate materials, geometric parameters, and operating modes.

Special attention is given to the selection of structural parameters of the heat exchanger that ensure an optimal balance between heat transfer efficiency, energy consumption, and equipment durability. Factors affecting

corrosion resistance and mechanical reliability of the structure are analyzed, along with methods to prevent contamination and fouling of the heat exchange surface.

The results obtained can be used for the development of new heat exchangers or the modernization of existing ones to enhance their performance and reduce energy costs.

References 9, tables 1, figures 10.

Keywords: tubular heat exchanger, thermal calculation, heat transfer, temperature head, energy carrier, heat transfer efficiency.

1. Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Vyshnievskiy V.M., Hrakov D.P., Hrakov, O.P. Sushinnya bilokachannoyi kapusty na konvektyvniy susharts [Drying white cabbage on a convective drying stand]. *Thermophysics and thermal power engineering*, 2021; 43 (3), 24-29. (in Ukr.)

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.3>

2. Rusanov, A., Chugay, M., Rusanov, R. Advanced Computer Technologies in the New Flow Part Development for Reactive Type HPC Steam Turbine of T-100 Series. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. Pp. 55–63, https://doi.org/10.15407/10.1007/978-3-031-18487-1_6

3. A Rusanov, A. V., Shvetsov, V. L., Kosianova A. I., Bykov Yu. A., Pashchenko, N. V., Chugay M. A., Rusanov, R. A. The gas-dynamic efficiency increase of the K-300 series steam turbine control compartment. *J. of Mech. Eng.*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.006>

4. E Strelnikova, N Choudhary, K Degtyariov, D Kriutchenko, I Vierushkin, Boundary element method for hypersingular integral equations: Implementation and applications in potential theory. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 169. 2024. 105999. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

5. Denys Kriutchenko, Elena Strelnikova, Yuriy Naumenko, Olga Zaydenvarg. Boundary Element Methods for Hypersingular Integral Equations Over Circular Domains. *The Fundamentals of Boundary Element Methods*. 2024.Pp-73-77. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105999>

6. Avramenko, A.M., Shevchenko, A.A., Chorna, N.A., Kotenko, A.L. Application of highly efficient hydrogen generation and storage systems for autonomous energy supply. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, 2021(3), pp 69–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/069>

7. O. Sierikova, E. Strelnikova, K. Degtyariov. Numerical Simulation of Strength and Aerodynamic Characteristics of Small Wind Turbine Blades (2023) *Lecture Notes in Networks and Systems*, 657 LNNS, pp. 357 - 370. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-36201-9_31

8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modelling. Open Engineering (formerly Central European Journal of Engineering) 2015, Vol. 5, pp. 399-410
<https://doi.org/10.1515/eng-2015-0047>

9. Rusanov, A., Subotin, V., Rusanov, R. et al. Development of the flow part of reactive type hpc of k-325-23.5 series steam turbine based on the use of modern computer technologies, Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 24. No. 4. P. 6-16 .
<https://doi.org/10.15407/pmach2021.04.006>

Отримано 30.01.2025
Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025