

УДК 697

асист. Дар'я Вакуленко,
vakulenko_di@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2960-9659,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОГО ДІАМЕТРА ІЗОЛЯЦІЇ ТОНКОЇ ТРУБКИ

Застосування децентралізованих систем вентиляції з утилізацією теплоти витяжного повітря є енергоефективним рішенням формування і підтримання комфортних параметрів мікроклімату у приміщеннях квартир та індивідуальних житлових будинків. Такі припливно-витяжні системи не потребують додаткового простору для розташування мережі повітроводів та суттєвого втручання в інтер'єр приміщень, що обслуговуються. Одним із таких пристроїв є регенеративна установка Вентс ТвінФреш, що монтується у конструкції зовнішньої стіни. Завданням дослідження є підвищення ефективності її роботи. Проводяться дослідження процесів теплообміну у тонких каналах регенератора теплоти припливно-витяжної установки. Досліджуються канали з різними теплофізичними властивостями. Експериментальна невизначеність зменшується з кращою тепловою ізоляцією експериментального стенду. Це підтверджується зменшенням перегріву та зниженням коефіцієнту тепловіддачі зовнішньої поверхні теплової ізоляції при збільшенні її товщини. Подолання критичного діаметра утеплювача дослідної установки дозволяє мінімізувати похибку вимірювань, що враховує вплив процесів теплообміну зовнішньої поверхні ізоляції з навколишнім середовищем. Необхідно визначати не критичний, а доцільний діаметр ізоляції. При використанні доцільної товщини теплової ізоляції, температури на внутрішній та зовнішній поверхнях труби мають практично однакове значення. Це дає змогу з однаковою точністю знімати покази значень температур тонких трубок ззовні, а не зсередини. Відповідно, спрощується конструкція дослідних стендів експериментальних досліджень. Сфера застосування доцільного діаметра теплової ізоляції не обмежується лише дослідженнями теплообіну. Це поняття можна використовувати у будь-яких системах, обладнанні та техніці, які потребують використання ізоляційних матеріалів.

Ключові слова: критичний діаметр ізоляції; коефіцієнт теплопередачі; число Нуссельта; енергоефективність; доцільний діаметр теплоізоляції.

Постановка проблеми. Вимоги щодо енергоефективності будівель закріплені у Законі України «Про енергетичну ефективність будівель», Державних Стандартах України про енергетичну ефективність будівель та відповідних розділах державних будівельних норм. Клас енергоефективності

житлової будівлі має бути не нижче ніж «С» [1]. Для досягнення такого показника необхідно застосовувати ефективні рішення використання теплової енергії [2-5] для підтримання комфортних параметрів мікроклімату у робочій зоні приміщень будівель. У квартирах або приватних житлових будинках варто застосовувати системи вентиляції з повторним використанням теплоти витяжного повітря і відповідним класом енергоефективності обладнання. Централізовані системи вентиляції з рекуперацією теплоти, що обслуговують декілька приміщень, потребують спеціального простору для улаштування мережі повітроводів для розподілення повітряних потоків по всім приміщенням. Децентралізовані системи вентиляції дозволяють підтримувати оптимальні умови мікроклімату без суттєвого втручання в інтер'єр приміщення. Прикладом таких вентиляційних систем є системи ТвінФреш (Вентс Україна), що мають «А» клас енергетичної ефективності [6]. Визначення фактичного значення коефіцієнта ефективності утилізації теплоти яких є задачею дослідження автора.

Останні дослідження та публікації. У попередніх роботах [7-8] проводилися дослідження щодо визначення коефіцієнта ефективності регенеративного теплоутилізатора децентралізованої системи вентиляції ТвінФреш. Було застосовано різні методи і підходи його дослідження. У підсумку [8] отримано значення з великим відхиленням – від 33,1 % до 97,4 %.

Для визначення фактичного значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні каналів теплоутилізатора до повітря, розробляється лабораторний стенд. У ході підготовки експериментального дослідження трубок, характеристики яких відповідають каналам утилізаторів теплоти різних моделей, постало питання визначення доцільної товщини теплової ізоляції задля мінімізації впливу процесів теплообміну із середовищем навколо стенду. Було проведено дослідження і спростовано теорію критичного діаметра теплової ізоляції [9]. Використання доцільного діаметра теплоізоляції призводить до зменшення експериментальної невизначеності установки.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є визначення доцільного діаметра ізоляції дослідної труби для мінімізації впливу оточуючого середовища на теплообмінні процеси всередині неї.

Актуальність дослідження. Отримані результати дослідження стануть у нагоді дослідникам-практикам на етапі підготовки експерименту для мінімізації похибки натурних вимірювань величин теорії теплообмінних процесів. Поняття доцільного діаметра теплової ізоляції має широке застосування – в техніці, обладнанні та конструкціях, що потребують ізоляції.

Основна частина. Проводяться теоретичні дослідження у програмі CFD-моделювання для доведення наявності мінімального відхилення між температурами на внутрішній та зовнішній поверхнях труби при використанні

оптимального діаметра теплової ізоляції.

Дослідна модель на рис. 1 складається з мідної труби (1), що лежить на дерев'яній підставці (2). На вході та виході передбачені ділянки стабілізації, вирізані з дерева (3). Вся конструкція утеплена ізоляцією з полістиролу (4). Проміжки між тепловою ізоляцією та поверхнею труби заповнені скловатою (5). На кінцях конструкції передбачено заглушки з ізоляційного матеріалу (6).

У даній моделі сама мідна труба є об'ємним джерелом теплоти з визначеною тепловою потужністю. У дослідженні задається масова витрата повітряного потоку, що проходить крізь трубу. Таким чином, впливом змінної густини потоку вздовж грюючої поверхні стінок труби можна знехтувати.

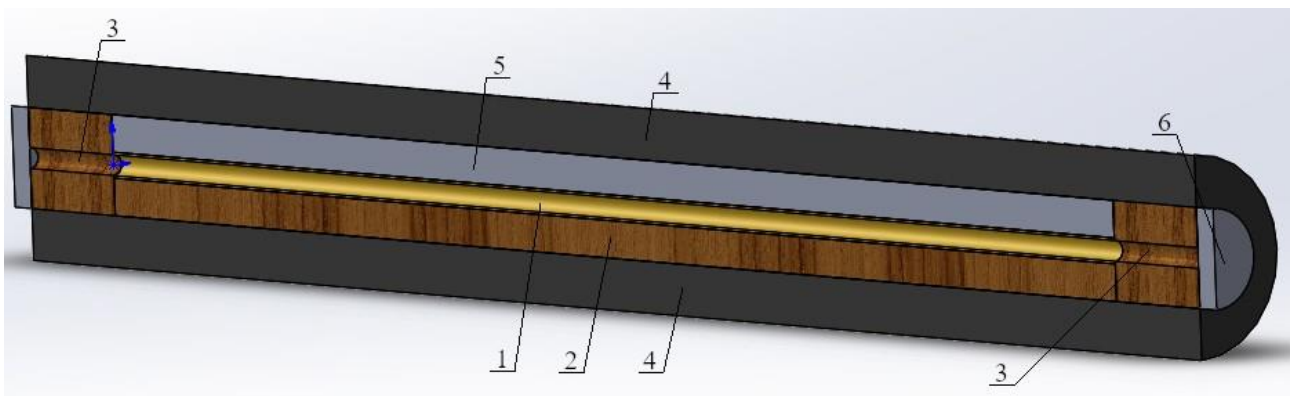


Рис. 1. Дослідна модель

Вихідні данні моделювання:

- Мідна труба $\text{Ø}10 \times 1$ мм;
- Довжина труби $l = 0,6$ м;
- Об'ємне джерело потужністю $Q = 4,69$ Вт;
- Масова витрата повітря, що проходить крізь трубу, $G = 0,583$ кг/год;
- Температура оточуючого середовища $t_{\text{ext}} = 20$ °С;
- Теплопровідність теплоізоляції $\lambda = 0,14$ Вт/(м·К)
- Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні ізоляції $\alpha = 100\,000$ Вт/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

З теорії критичного діаметра [10] оптимальна товщина теплової ізоляції (1) за даних вихідних умов складає $0,28 \cdot 10^{-5}$ м.

$$d_{\text{кр}} = 2 \cdot \lambda / \alpha \quad (1)$$

Дослідження виконується у програмі CFD – моделювання із застосуванням рівняння Нав'є-Стокса для ламінарного потоку та k-ε моделі Б. Е. Лаундера та Д. Б. Спелдінга [11-15]. У гідродинаміці Ейлерові моделі передбачають зафіксовану

систему координат і розрахункову сітку в просторі. Рух рідини або газу описується системою рівнянь нерозривності та руху Нав'є-Стокса [16].

Рівняння Нав'є-Стокса для ламінарного руху нестисливої ньютонівської рідини, якою є повітря, з урахуванням незначного відхилення абсолютного тиску набуває наступного вигляду з урахуванням компоненти тензора зсувних напружень та умови $i \neq j$:

$$\frac{\partial \rho \cdot u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot u_j \cdot u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(p + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

де ρ – густина, кг/м³; u – швидкість, м/с; t – час, с; p – тиск, Па; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; x_i – i -та координата, м.

Модель Б. Е. Лаундера та Д. Б. Спелдінга (k-ε) містить рівняння кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації енергії турбулентності та лежить в основі обчислювальної динаміки рідин і газів.

$$k = 0,5 \cdot \overline{u'_k \cdot u'_j}, \text{ м}^2/\text{с}^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \nu \cdot \left(\overline{\partial u'_k / \partial x_j + \partial u'_j / \partial x_k} \right)^2, \text{ м}^2/\text{с}^3 \quad (4)$$

Після приведення до кінематичної в'язкості ν , м²/с формули (3) та (4) набувають вигляду:

$$\nu_T = f_\mu \cdot C_\mu k^2 / \varepsilon, \text{ м}^2/\text{с} \quad (5)$$

де C_μ – константа [17-19].

Зміна режиму руху течії моделюється при $\nu_T = 0$ та $k = 0$ із застосування емпіричної функції [14]:

$$f_\mu = (1 - e^{-0,025 \cdot R_y})^2 \cdot (1 + 20,5/R_T) \quad (6)$$

де R_y , R_T – емпіричні функції:

$$R_y = \sqrt{k} \cdot y / \nu \quad (6)$$

$$R_T = k^2 / (\varepsilon \cdot \nu) \quad (6)$$

де y – відстань до стінки.

Програма CFD – моделювання проводить аналіз вхідних граничних умов та розвиток течії у процесі автоматичного розрахунку і сама обирає яку

математичну модель застосовувати.

Результати моделювання. Проводимо дослідження трьох варіантів моделі з різними значеннями товщини матеріалу утеплювача – 0,02 м; 0,05 м та 0,1 м. Потік повітря, що проходить крізь трубу, нагріву залежить від товщини теплової ізоляції (Табл. 1). Графічно зміна температури потоку по довжині труби наведена на рис. 2 та рис. 3.

Таблиця 1. Зміна температури повітряного потоку

Товщина ізоляції, м	Початкова температура потоку, °C	Кінцева температура потоку, °C
0,02	20	31,52
0,05	20	44,6
0,1	20	44,85

Порівняння отриманих значень відхилення температур (рис. 4), відносної (рис. 5) та абсолютної (рис. 6) нев'язок температур внутрішньої та зовнішньої стінок труби, визначених за формулами (1) та (2), дають можливість визначити наскільки ефективним є використання теплової ізоляції понад значення критичного діаметра.

Відносна нев'язка температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби (рис. 5):

$$\Delta = (t_{in} - t_{out})/t_{in} \cdot 100\% \quad (2)$$

де t_{in} – температура внутрішньої поверхні труби, °C; t_{out} – температура зовнішньої поверхні стіки труби, °C.

Абсолютна нев'язка температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби (рис. 6) розрахована за формулою:

$$\Delta = t_{in} - t_{out} \quad (3)$$

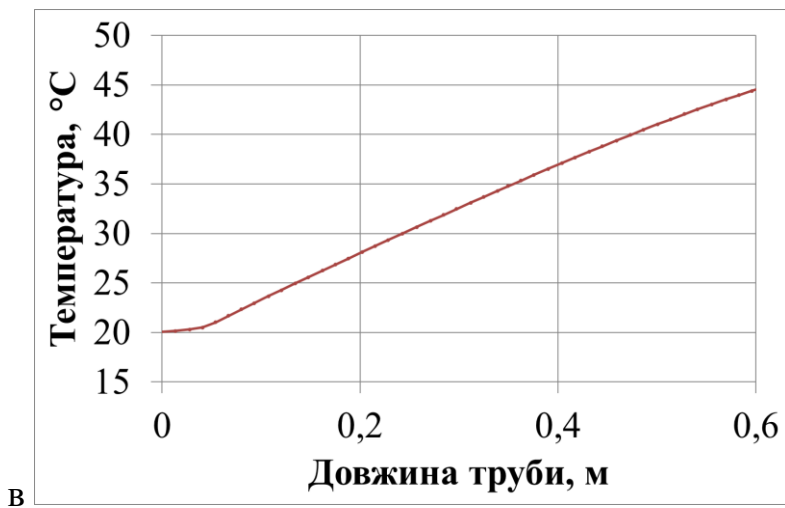
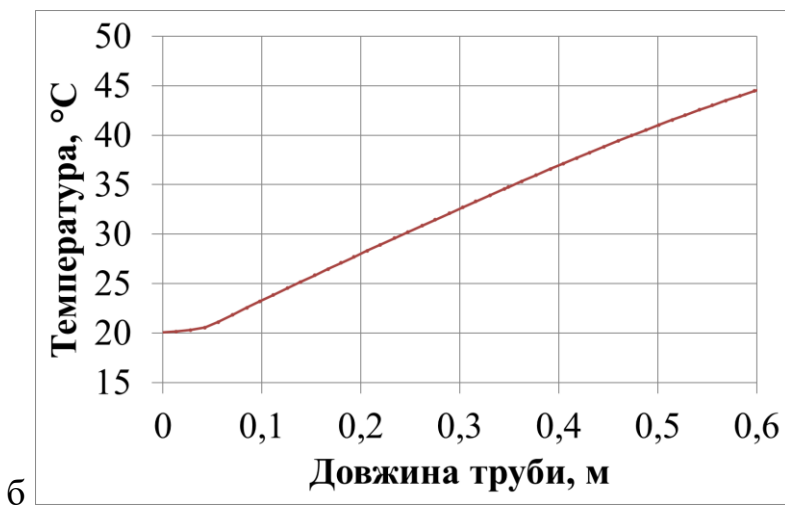
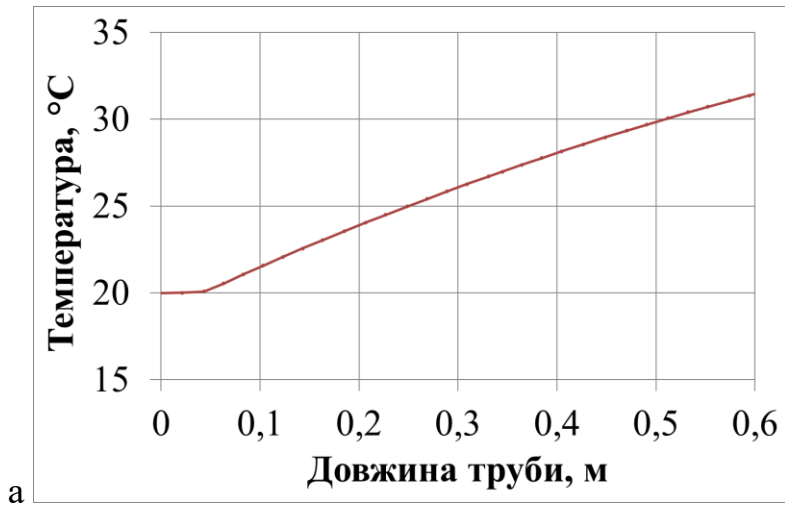


Рис. 2. Зміна температури потоку повітря по довжині труби:
а) товщина теплової ізоляції 0,02 м; б) товщина теплової ізоляції 0,05 м;
в) товщина теплової ізоляції 0,1 м

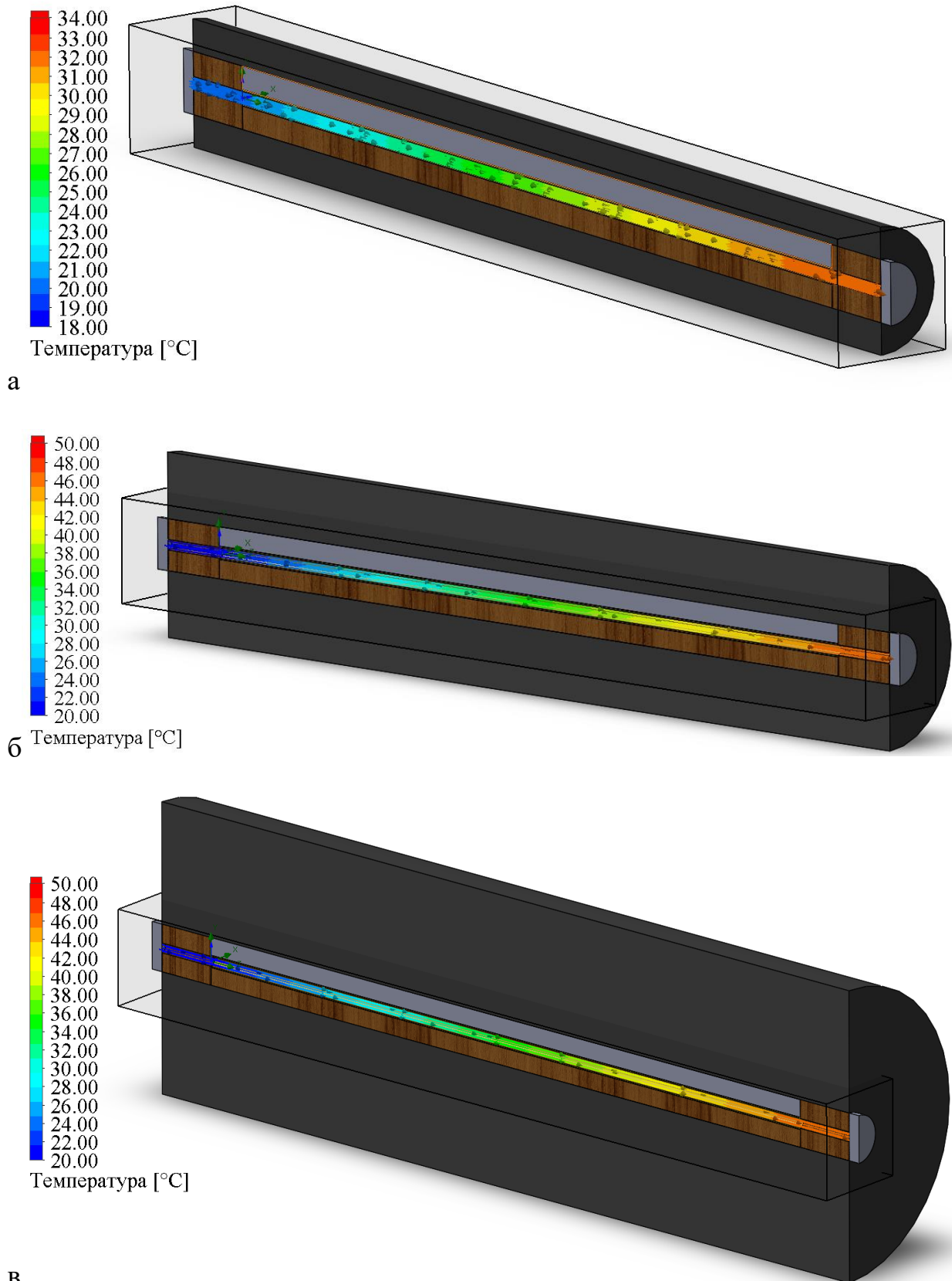


Рис. 3. Градієнт температури ламінарних потоків повітря:
а) товщина теплової ізоляції 0,02 м; б) товщина теплової ізоляції 0,05 м;
в) товщина теплової ізоляції 0,1 м

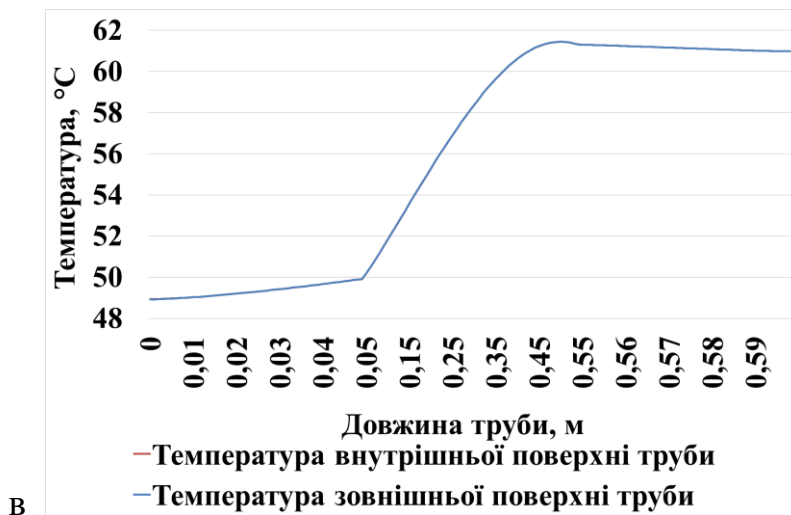
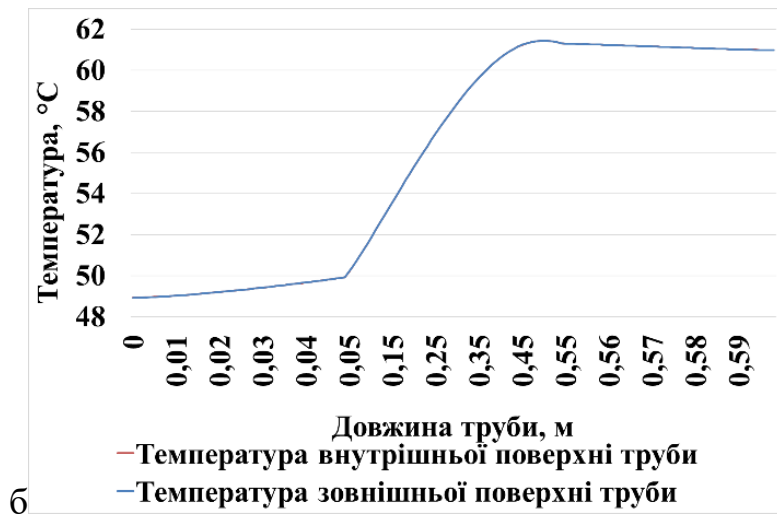
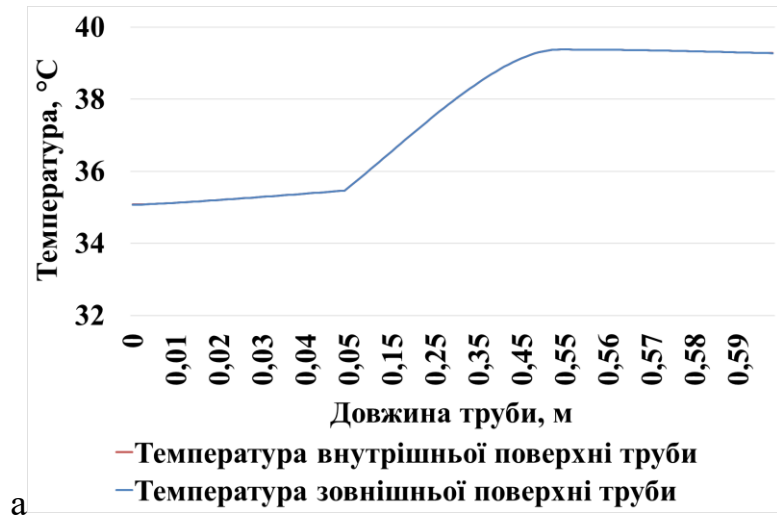


Рис. 4. Відхилення температур внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби по довжині труби:

- а) товщина теплової ізоляції 0,02 м; б) товщина теплової ізоляції 0,05 м;
в) товщина теплової ізоляції 0,1 м

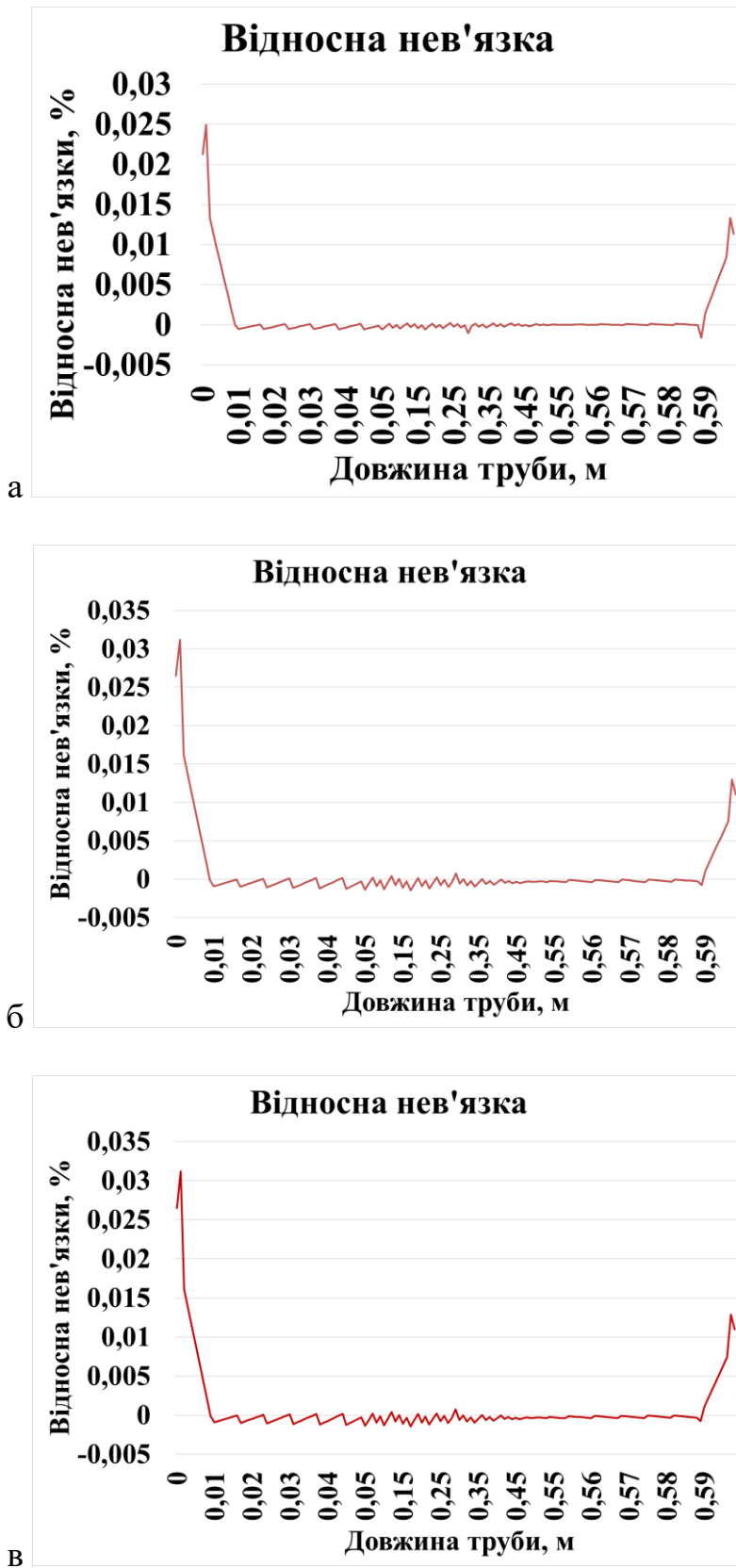


Рис. 5. Графіки зміни значень відносної нев'язки по довжині труби:
а) товщина теплової ізоляції 0,02 м; б) товщина теплової ізоляції 0,05 м;
в) товщина теплової ізоляції 0,1 м

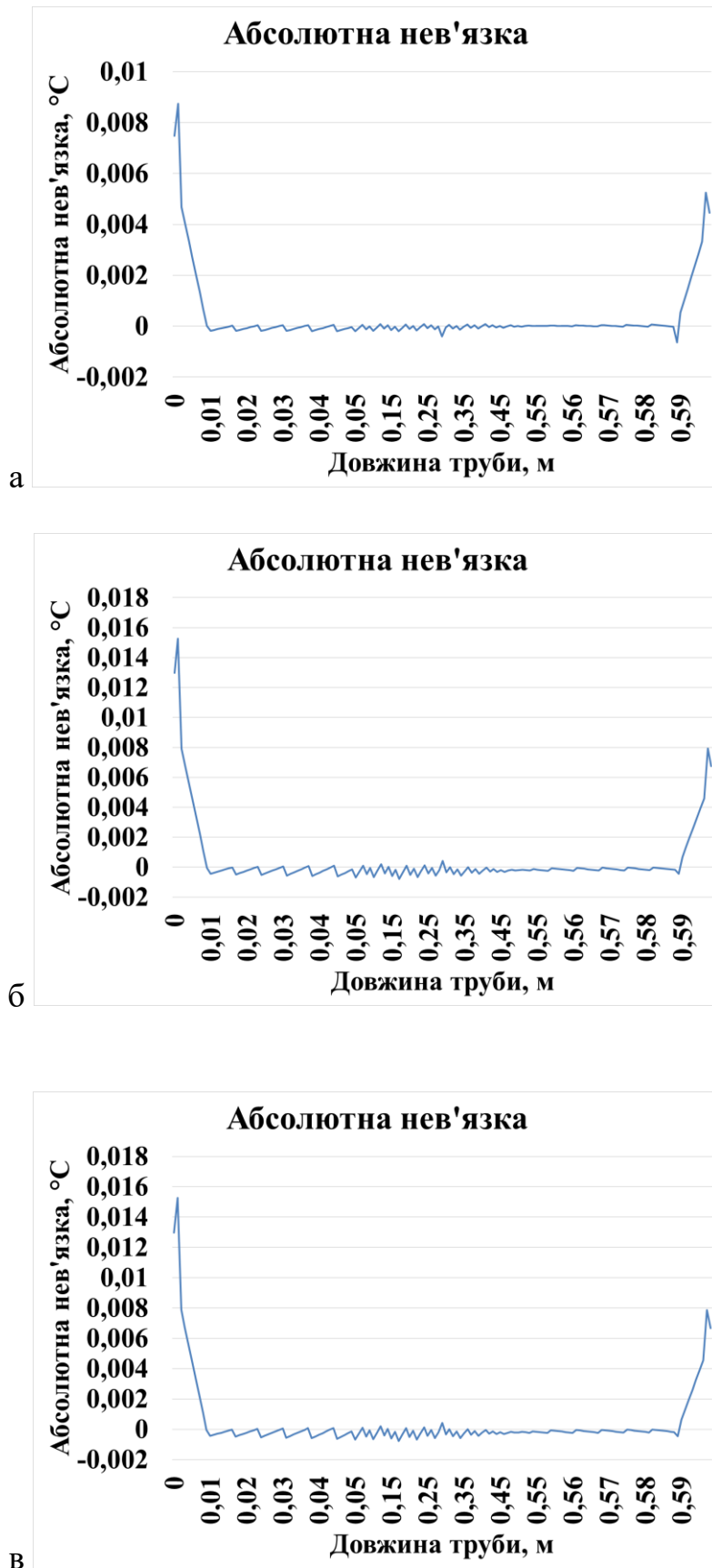


Рис. 6. Зміна значень абсолютної нев'язки по довжині труби:
а) товщина теплової ізоляції 0,02 м; б) товщина теплової ізоляції 0,05 м;

в) товщина теплової ізоляції 0,1 м

Висновки. У результаті проведених досліджень було підтверджено спростованність теорії критичного діаметра. За отриманими значеннями температур повітряного потоку на виході з трубки (відповідно 31,52 °С, 44,6 °С та 44,85 °С) видно, що має місце позитивний ефект від нарощення теплової ізоляції понад критичне значення. Результати підтверджують ефективність використання доцільної товщини утеплювача труб, що дає змогу нехтувати впливом зовнішнього середовища на теплообмінні процеси під шаром теплової ізоляції. Температура на внутрішній та зовнішній поверхнях тонкої трубки практично не відрізняється, тому фіксація температури на зовнішній поверхні під час експериментального дослідження не потребує введення поправки вимірювань.

References

1. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia. DBN V.2.2-15:2019, Ukrarkhbudininform, 2019. (In Ukrainian)
2. Predun, K., Voinalovich, V., & Guliyev, J. “Enhancement of energy efficiency and biosphere compatibility of buildings and structures in Ukraine.” *Urban Development and Spatial Planning*, vol. 84, 2023, pp. 263–275. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.263-275>
3. Korbut, V., Tkachenko, T., Mileikovskiy, V., Vakhula, V., Konovaliuk, V. “Analytical studies of the functioning of ventilation with local cooling in public buildings”. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, vol. 45, Nov. 2023, pp. 5–20. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.45.5-20>
4. Komelina O. “Suchasni problemy zabezpechennia enerhoefektyvnosti zhytloвого budivnytstva v Ukraini” *Problemy ekonomiky*, vol. 3, 2014, pp. 108-114.
5. Lapa M., Dvoiehlazova M., Pechonkin I., Lapa Yu. “Zabezpechennia enerhoefektyvnosti budivel.” *Technical Sciences and Technology*, no. 1(7), Sept. 2021, pp. 225-33. (In Ukrainian) <http://tst.stu.cn.ua/article/view/105260>
6. Kovalchuk A., Lystopadska T. “Efficiency type regenerative air handling units.” *Energy saving. Power engineering. Energy audit.*, vol. 4, 2015, pp. 7-14. (In Ukrainian) <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/43622>
7. “Serii Vents TwinFresh Stail” Vents. <https://vents.ua/series/twinfresh-style/>. Accessed 19 November 2023
8. Mileikovskiy V., Vakulenko D. “Simulation of the efficiency of improved regenerative decentralised ventilators Vents TwinFresh.” *Construction of Optimized Energy Potential (CoOEP)*, vol. 9, no 1, 2020, pp. 61-67, <https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.1.07>

9. Vakulenko, D., Mileikovskiy V. “Simulation the Effectiveness of Heat Recovery of the Regenerative Ventilator Using Different Approaches.” *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, vol. 41, Apr. 2022, pp. 32-38. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.32-38>
10. Vakulenko D., Mileikovskiy V., Tkachenko T., Ujma A., Konovaliuk V. “Analysis of critical radius of insulation for horizontal pipes.” Contents of Proceedings of *22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, May 24-26, 2023, pp. 902-907, <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF178>
11. Dymo, Borys Vasylovych, and Vitalii Ivanovych Pylypchak. “Efektyvnist teplovoi izoliatsii truboprovodiv system teplopостachannia.” *Naukovi pratsi. Serii: Tekhnohenna bezpeka*, vol. 137, 2010, pp. 16-18 (In Ukrainian)
12. Ishihara T, Qian G-W, Qi Y-H. “Numerical study of turbulent flow fields in urban areas using modified k ϵ model and large eddy simulation.” *J Wind Eng Ind Aerod* vol. 206, 2020, no 104333. doi:10.1016/j.jweia.2020.104333
13. Aydogdu M. “Analysis of the effect of rigid vegetation patches on the hydraulics of an open channel flow with Realizable k- ϵ and Reynolds stress turbulence models”. *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 94, 2023, no 102477. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102477>
14. Liu Y., Hinrichsen O. “Study on CFD–PBM turbulence closures based on k- ϵ and Reynolds stress models for heterogeneous bubble column flows.” *Comput. Fluids*, vol. 105, 2014, pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.09.023>
15. Mileikovskiy V. O. Enerhoefektyvne formuvannia mikroklimatu na osnovi rozroblenoї teorii makrostruktury turbulentnykh tekhii. Diss. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2020. (In Ukrainian)
16. Hargreaves D, Wright NG. “On the use of the k- ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer.” *J Wind Eng Ind Aerodyn*, vol. 95, no 5, May 2007, pp. 355–369. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.08.002>
17. Wang M., Jagad P., Hirani A. N., Samtaney R. “Discrete exterior calculus discretization of two-phase incompressible Navier-Stokes equations with a conservative phase field method.” *Journal of Computational Physics*, vol. 488, 2023, no 112245. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.112245>
18. Cabezón D., Sanz J., Van Beeck J. “Sensitivity analysis on turbulence models for the ABL in complex terrain.”, *Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC 2007*, Milan (Italy), 7-10 May 2007
19. Abdi, D.S., Bitsuamlak, G.T., “Wind flow simulations on idealized and real complex terrain using various turbulence models.” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 75, 2014, pp. 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.05.002>

20. Edeling W. N., Cinnella P., Dwight R. P., Bijl H. “Bayesian estimates of parameter variability in the k - ϵ turbulence model.” *J. Comput. Phys.*, vol. 258, 2014, pp. 73–94. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.027>

UDC 697

Ass. prof. **Daria Vakulenko**,
vakulenko_di@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2960-9659,
Kyiv national University of Construction and Architecture

THEORETICAL STUDIES OF THE EXPEDIENT RADIUS OF THIN PIPE INSULATION

Decentralized ventilation systems with exhaust heat recovery are an energy-efficient solution for organizing and maintaining comfortable microclimate parameters in apartments and individual residential buildings. Such supply and exhaust systems do not require additional space for the distribution network of air ducts and significant intervention in the interior of the premises. One such device is the Vents TwinFresh regenerative installation. Twin Fresh install in the structure of the outer wall. The task of follow-up is to increase the efficiency of its work. Studies of heat exchange processes in the thin channels of the heat regenerator carried out. Channels with different thermophysical properties are studied. Experimental uncertainty decreases with better thermal insulation of the investigational stand. It is confirmed by the decrease in overheating and the heat transfer coefficient of the external surface thermal insulation when its thickness increases. Overcoming the critical diameter of the insulation of the experimental installation allows to minimize the measurement error, which takes into account the influence of heat exchange processes of the outer surface of the insulation with the environment. It is necessary to determine not the critical but the expedient diameter of the insulation. When using the appropriate thickness of thermal insulation, the temperatures on the inner and outer surfaces of the pipe have practically the same value. Thus, it is possible to take temperature readings of thin tubes from the outside, not from the inside, with the same accuracy. Accordingly, the design of the test stands for experimental research is simplified. The scope of application of the appropriate diameter of thermal insulation is not limited only to studies of heat transfer. This concept can used in any systems, equipment, and techniques that require insulating materials.

Keywords: critical radius of insulation; heat transfer coefficient; Nusselt number; energy efficiency; expedient radius of insulation.