

УДК 697.97-5

Моделювання ефективності теплоутилізації регенеративного провітрювача за різними підходами

Д. І. Вакуленко¹, В. О. Мілейковський²

¹ асп., асист. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, coppoka@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-2960-9659

² д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, v_mil@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-8543-1800

Анотація. Регенеративні провітрювачі є перспективним напрямком ефективної вентиляції з утилізацією теплоти витяжного повітря. Створено математичну модель регенератора теплоти провітрювача для покращення ефективності його роботи. У попередніх роботах на базі двох різних підходів було проведено моделювання роботи регенератора теплоти. Коефіцієнти температурної ефективності, отримані у результаті моделювання, мали значну відмінність. Метою роботи є пошук альтернативних методів для адекватного визначення ефективності роботи провітрювача. Виконано математичне моделювання з використанням іншого підходу, що враховує число Грасгофа. Отримано значення, що суттєво відрізняється від обох попередніх – до двох разів. У літературних джерелах відсутня інформація про експериментальні умови визначення числа Нуссельта, що використовувалося при моделюванні. Постає необхідність проведення експериментальних досліджень для визначення ефективності роботи регенеративного теплоутилізатора.

Ключові слова: теплоутилізація, регенеративний теплообмінник, моделювання, температурний коефіцієнт ефективності.

Вступ. Сучасні житлові новобудови мають мати клас енергоефективності не нижче «С» [1]. Для досягнення цього рівня рівня ефективності і вище доцільно використовувати утилізатори теплоти витяжного повітря у системах вентиляції. Особливої уваги заслуговують індивідуальні децентралізовані установки. Такі установки мають ряд переваг:

- дозволяють зменшити енергетичне навантаження систем охолодження та опалення без суттєвих фінансових затрат (помітно дешевші у порівнянні з центральними установками – на обох стадіях: улаштування й експлуатації);
- відсутнє втручання в інтер'єр приміщені (не потребують розгалуженої системи повітропроводів)
- індивідуальне регулювання за присутністю людини у приміщенні.

Наразі децентралізовані системи вентиляції повітря представлені наступними типами обладнання. Установки типу Prana з утилізацією теплоти витяжного повітря до 96 % за даними виробника [2] встановлюється в товщу стіни на висоті не менше 110 мм від стелі. Така висока ефективність забезпечується використанням мідного теплообмінника, який увесь час омивається з одного боку теплообмінних поверхонь припливним повітрям, а з іншого – витяжним потоком повітря (рис. 1). Недоліком системи є можливість замерзання. Тому в ній передбачено режим розморожування та недопущення замерзання, який слід вмикати вручну

при зниженні температури нижче температури замерзання води або якщо проблеми вже виникли. Останнє характерне, якщо момент досягнення цієї температури відповідає середині ночі, коли люди сплять. Також система має пасивний режим з природним рухом повітря, який може використовуватися при різниці температури зовнішнього і внутрішнього повітря до 5 К.

Ще однією компактною індивідуальною установкою для великих квартир або житлових будинків до 100 м² є freeAir 100 bluMartin. Вона встановлюється приховано в зовнішній стіні та завдяки пластинчатому рекуператору утилізує до 87 % теплоти витяжного повітря [3].

Установки freeAir 100 bluMartin мають більш громіздку конструкцію та використовують систему пластикових повітропроводів для видалення повітря із санітарних вузлів та ванних кімнат.

Провітрювач Vents Twin Fresh утилізує теплоту витяжного повітря в керамічному регенераторі. Це обладнання працює у реверсивному режимі – то на приплив, то на видалення повітря (рис. 1).

Виробник рекомендує влаштовувати їх попарно і зблоковано між собою аби зберігати повітряний баланс повітря у квартирі [4].

Актуальність дослідження. Застосування утилізаторів теплоти витяжного повітря дозволяє знизити витрати енергоресурсів на опалення та охолодження. При цьому зростає рівень енергоефективності житлової будівлі.



Рис. 1 Принцип роботи провітрювача Vents Twin Fresh [4]

Основними перевагами є компактність, вологообмін і неможливість намерзання. Підвищення ефективності утилізації теплоти децентралізованих систем вентиляції з використанням провітрювача Twin Fresh є актуальною задачею.

Останні дослідження та публікації. Було створено математичну модель реверсивного утилізатора теплоти [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \bar{a} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{4 Nu a_{air} (T_{air} - T)}{d_e^2}; \\ \frac{Nu}{d_e} (T_{air} - T) = \frac{1}{4} Re Pr \frac{\partial T_{air}}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

де T – температура керамічного регенератора у поточному перерізі, К; τ – час, с; \bar{a} – середнє значення коефіцієнта теплопровідності, перераховане на весь об'єм регенератора з урахуванням каналів, m^2/c ; x – координата вздовж осі регенератора, К, $Nu = \alpha d_e / \lambda_{air}$ – число Нуссельта, α – коефіцієнт тепловіддачі, $Wt/(m^2 \cdot K)$; λ_{air} – коефіцієнт теплопровідності повітря, $Wt/(m \cdot K)$; a_{air} – коефіцієнт теплопровідності повітря, m^2/c ; T_{air} – температура повітря у поточному перерізі, К; $Re = v d_e / \nu$ – число Рейнольдса; ν – швидкість повітря, m/c ; $d_e = 4 A / \Pi$ – еквівалентний діаметр проходу повітря, м; A – загальна площа проходу повітря, м; Π – загальний периметр проходу повітря, м; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, m^2/c ; Pr – число Прандтля для повітря.

Для числа Нуссельта в рівнянні (1) було застосовано експериментальну формулу М. О. Міхеєва для ламінарного потоку, що містить число Рейнольдса, а саме

$$\begin{aligned} Nu &= 0,33 Re^{0,5} Pr_{air}^{0,33} \left(\frac{Pr_{air}}{Pr_w} \right)^{0,25} \approx \\ &\approx 0,33 Re^{0,5} Pr_{air}^{0,33}, \end{aligned} \quad (2)$$

де Pr_w – число Прандтля повітря при температурі стінки каналів регенератора. Через відносно незначний перепад температури прийнято $Pr_{air} \approx Pr_w$.

За рівняннями (1) і (2) створено скінченно-різницеvu модель, яку реалізовано в системі комп'ютерної алгебри SciLab Отримані (рис. 2) результати [5] показують температурний коефіцієнт ефективності утилізації 58,5 %.

Для більш детального аналізу причин зниження ефективності виконано моделювання [6] нестационарного теплообміну в системі SolidWorks Flow Simulation, що використовує рівняння Нав'є-Стокса та енергії (конвекції-дифузії). Отримано надзвичайно високий середній температурний коефіцієнт ефективності 97,4 %. При цьому миттєві значення не знижуються нижче 95 %. Розбіжність пояснюється різними значеннями коефіцієнта тепловіддачі за формулою Міхеєва та за рівнянням енергії (конвекції-дифузії) [7] навіть для круглих труб. Теоретично виявити, які з цих даних правильні, можливо лише перевіркою за іншими теоретичними та напівемпіричними підходами.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є перевірка отриманих результатів розрахунку ефективності провітрювача.

Коригування математичної моделі. Для уточнення параметрів моделі (1) проаналізовано різні методи опису числа Нуссельта в ламінарній течії. У літературних джерелах [8] наводиться більш складна формула з урахуванням впливу гравітаційних сил, а саме

$$Nu = 0,15 \varepsilon_l Re^{0,33} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot Gr^{0,1}, \quad (3)$$

де ε_l – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив початкової ділянки течії; Gr – критерій Грасгофа [5]:

$$Gr = \frac{g d_e^3}{\nu^2} \beta (T_{air} - T), \quad (4)$$

де $g = 9,80665$ – прискорення вільного падіння, м/с²; β – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, а саме

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T_{air}} \right) = \rho \left(\frac{\partial \frac{1}{\rho}}{\partial T_{air}} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{T_{air}} \quad (5)$$

де V – об'єм повітря, м³; $\rho = 353 / T_{air}$ – густина повітря, кг/м³.

У формулі (3) критерій Грасгофа має степінь 0,1. У температурному діапазоні 248...298 К значення коефіцієнта об'ємного розширення змінюється в межах 2 % (рис. 2). Доцільно вважати його константою $\beta = 3,665 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

У заданому діапазоні температури значення перепаду температури $\Delta T^{1,1}$ можна замінити апроксимаційною функцією (рис. 3) з відхиленням до 1,4 К^{1,1}

$$\Delta T^{1,1} \approx 1,408 \Delta T, \text{ K}^{1,1}, \quad (6)$$

де 1,408 – розмірний коефіцієнт, К^{0,1}.

Початкова ділянка дуже мала (коефіцієнт ε_l менше 1,04). Нехтуємо її впливом. Тоді формула (3) після спрощення має вигляд

$$Nu = 1,439 d_e^{0,3} Re^{0,33} Pr^{0,43}. \quad (7)$$

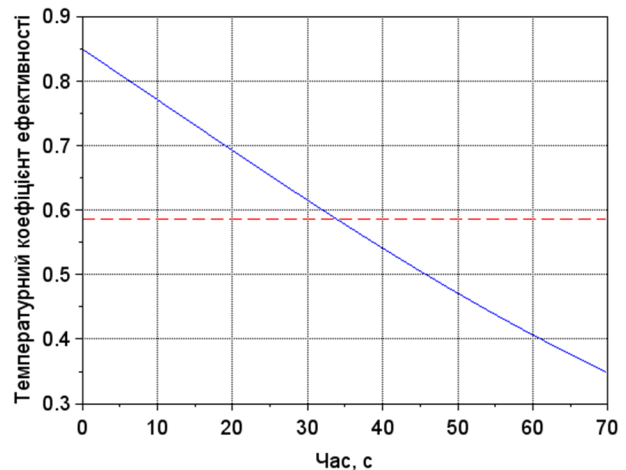
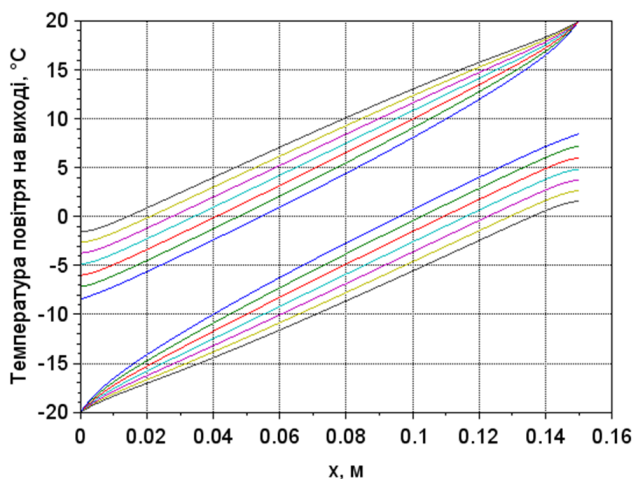


Рис. 2. Результати моделювання керамічного регенератора за формулою М. О. Міхеєва [5]

Повторне моделювання роботи регенеративного теплоутилізатора проводимо на базі нової математичної моделі:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \bar{a} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \\ &+ \frac{5,757 d_e^{0,3} Re^{0,33} Pr^{0,43} a_{air} (T_{air} - T)}{d_e^2}; \\ \frac{1,439 d_e^{0,3} Re^{0,33} Pr^{0,43}}{d_e} (T_{air} - T) &= \\ &+ \frac{1}{4} Pr Re \frac{\partial T_{air}}{\partial x}. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Критерій Грасгофа у рівняннях (8) враховано неявно. Числові коефіцієнти мають у собі середнє значення коефіцієнту об'ємного розширення повітря, К⁻¹, прискорення вільного падіння, м/с², та коефіцієнт, який лінеаризує незначну деформацію кривої від підвищення ступеню перепаду температури до 1,1 за формулою (6).

Результати моделювання. На підставі системи рівнянь (8) моделюємо роботу регенератора з урахуванням критерію Грасгофа та без нього. Отримуємо графіки зміни температури повітря регенератора теплоти та температурного коефіцієнта ефективності (рис. 7).

При врахуванні критерію Грасгофа температурний коефіцієнт ефективності становить лише 33,1 % (табл.). Без урахування критерію Грасгофа за формулою М. О. Міхеєва він становив 58,5 %, хоча гравітація має інтенсифікувати, а не гальмувати тепловіддачу.

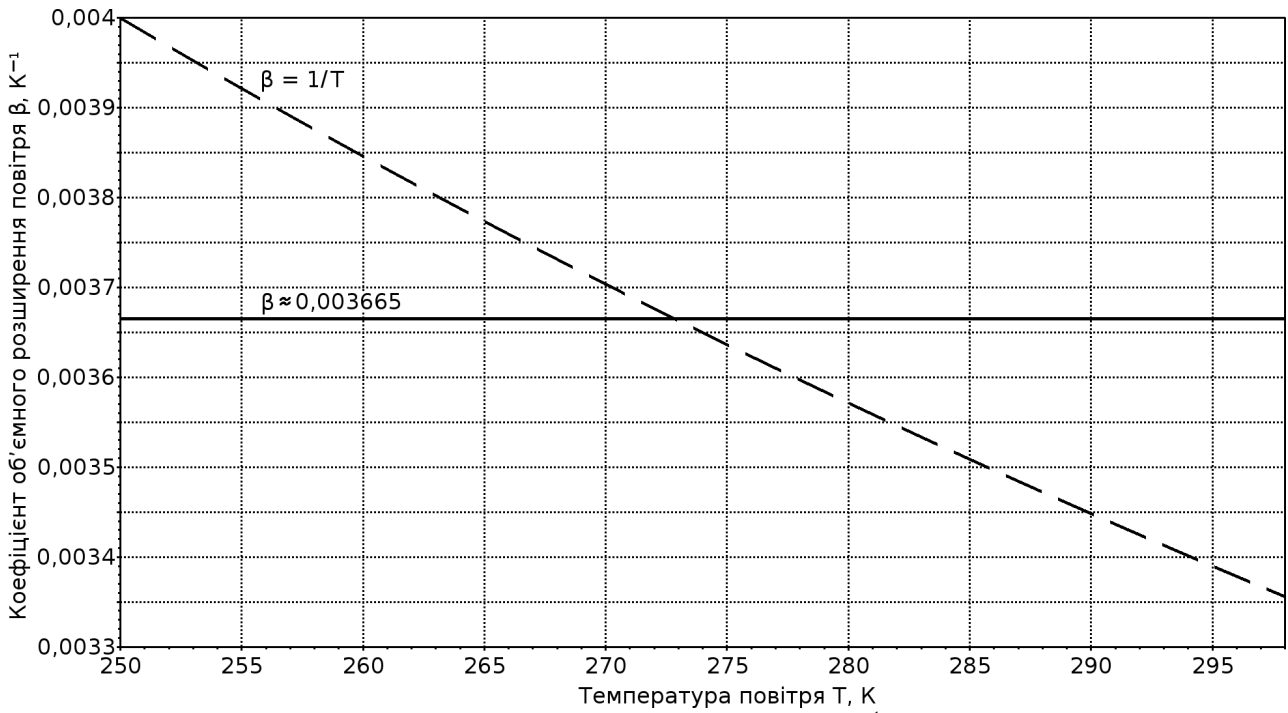


Рис. 2. Коефіцієнт об'ємного розширення, K^{-1}

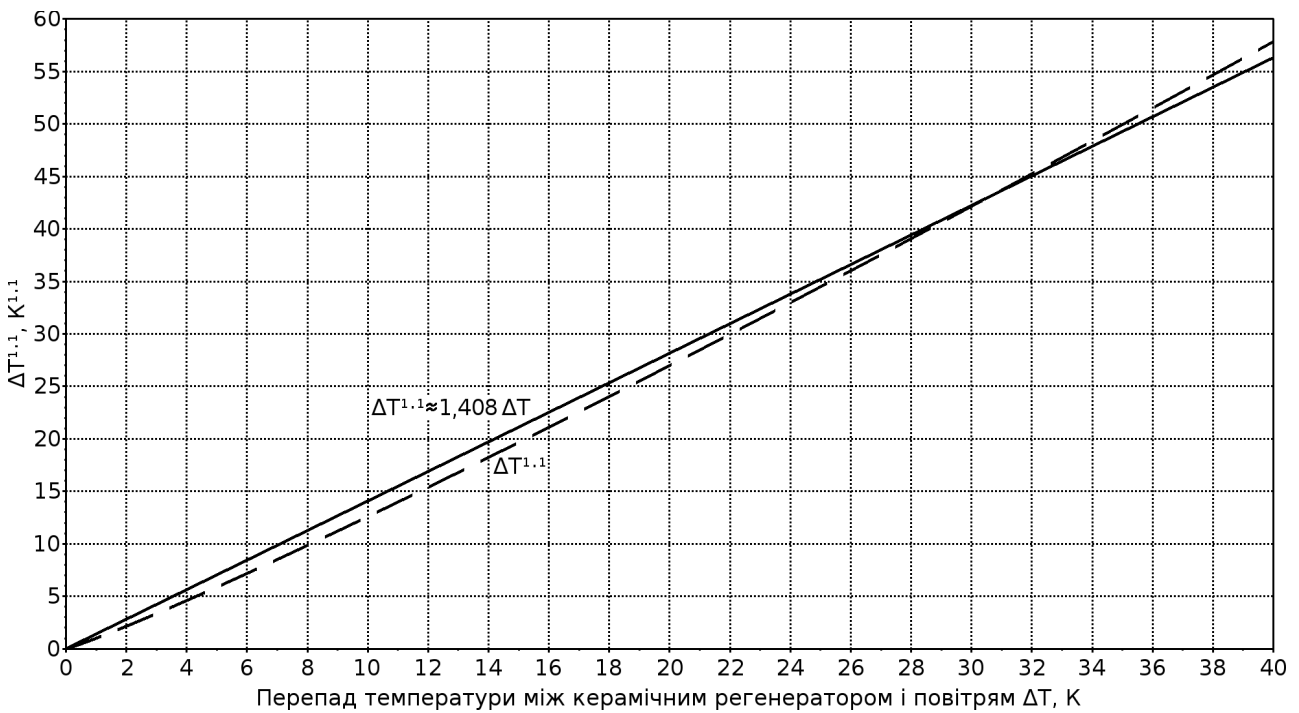


Рис. 6. Перепад між температурами стінки та повітря ΔT , K

Таблиця 1

Порівняння результатів моделювання керамічного регенератора за різними формулами

Варіант формули		М. О. Міхеєва	З урахуванням числа Грасгофа	Рівняння енергії
Середній температурний коефіцієнт ефективності η		58,5	33,1	97,4
Відхилення $\varepsilon = 100 \eta - \eta' /\eta'$ від значення за формулою	М. О. Міхеєва ($\eta' = 58,5$)	–	43,42	66,50
	з урахуванням числа Грасгофа ($\eta' = 33,1$)	76,74	–	194,26
	рівняння енергії ($\eta' = 97,4$)	39,94	66,02	–

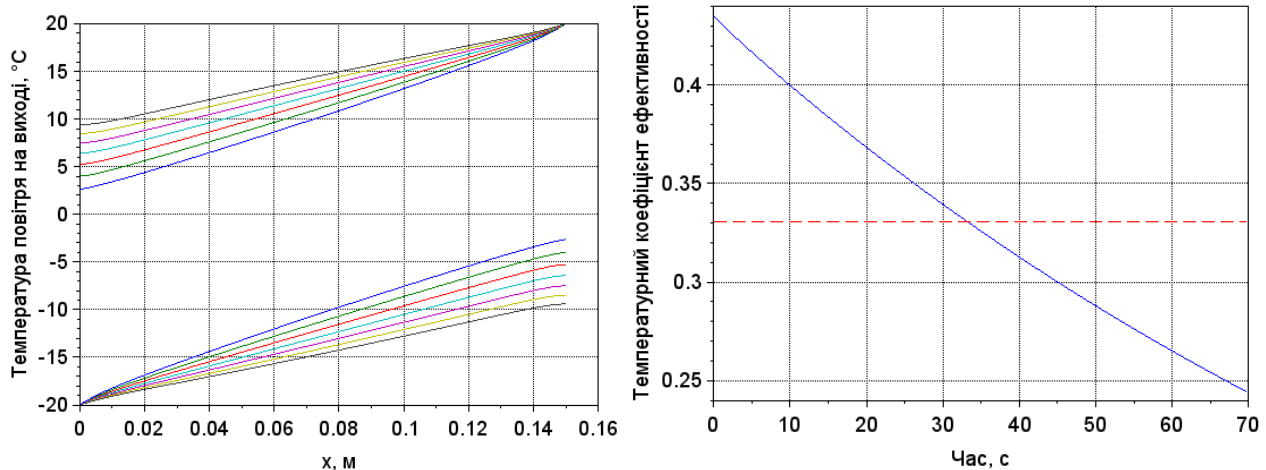


Рис. 7. Результати моделювання керамічного регенератора за формулою довідника [8]

Висновки. Існує значна розбіжність результатів моделювання середнього температурного коефіцієнта ефективності керамічного регенератора, а саме від 39,94 % до 194,26 %. У літературі не було знайдено умов при яких визначалося експериментальне значення числа Нуссельта. Тобто відсутня можливість аналізу відповідності розглянутих підходів умовам роботи регенеративного теплоутилізатора. Для уточнення результатів необхідні експериментальні дослідження.

Перспективи подальших досліджень.

Виготовляються експериментальні установки для дослідження тепловіддачі в трубках за умов, що відповідають каналам керамічного регенератора теплоти. Після виконання експериментів буде повторено математичне моделювання температурного коефіцієнта ефективності, а результати також будуть перевірено експериментально.

Подяки. Висловлюємо подяку ПрАТ «Вентиляційні системи» за підтримку цих досліджень.

Література

1. ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення / Мінрегіон України. – Київ: Укрархбудінформ., 2019. – 39 с.
2. Prana recuperators. Технічний паспорт. Припливно-витяжна система вентиляції з рекуперацією тепла [Електронний ресурс] / Prana. – 12 с. – Режим доступу: https://prana.org.ua/image/catalog/thp/ua/150_200_UA.pdf. – дата звернення 09.02.2022.
3. Децентралізована система вентиляції freeAir 100. [Електронний ресурс] / bluMartin. – Режим доступу: <https://blumartin.de/wohnraumlueftung-freeair-dezentral-mit-waermerueckgewinnung/>. – дата звернення 09.02.2022.
4. Провітрювачі ТвінФреш серії «Стайл» [Електронний ресурс] / Vents. – Режим доступу: <https://vents.ua/ua/series/ventilators-vents-twinfresh-style>. – дата звернення 09.02.2022.
5. Мілейковський В. О. Аналітичні дослідження нестационарного режиму роботи регенератора теплоти провітрювача ВЕНТС ТвінФреш / Мілейковський В. О., Вакуленко Д. І. // VENTS MAGAZINE. – 2019. – Вип. 5.- с.72-78.
6. Viktor Mileikovskiy, Daria Vakulenko (2020) Simulation of the efficiency of improved regenerative decentralised ventilators Vents TwinFresh // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. – 2020. – Iss. 1. – P. 61–67. – <https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.1.07>
7. Internal Flow: Heat Transfer in Pipes [Electronic resource], URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjWrMbl_I3oAhWJ16YKHcy7Ci8QFjANegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fmycourses.aalto.fi%2Fpluginfile.php%2F389208%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FLecturePipeFlow.pdf%3Fforcedownload%3D1&usq=AOvVaw2krJw7OsyY1gVT7AribK2uu. – Access Date 05.11.2021
8. Островский Г. М. 2004, Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Санкт-Петербург.- АНО НПО «Профессионал», с.237-238.

References

1. DBN V.2.2-15:2019 Zhitlovi budinki. Osnovni polozhennya. Minrehiion of Ukraine. Kyiv, UkrArkhBudInform, 2019.
2. Prana recuperators. Tekhnichniy pasport. Pryplyvno-vytyazhna systema ventyliatsii z rekuperatsieiu tepla, URL: <https://prana.org.ua/characteristics>. Accessed 09 February 2022.
3. Detsentralizovana systema ventilyatsii freeAir 100. bluMartin [Electronic resource], URL: <https://blumartin.de/wohnräumlüftung-freeair-dezentral-mit-waermerueckgewinnung/>. – Accessed 09 February 2022.
4. Provitriuvachi TvinFresh serii «Stail». Vents [Electronic resource], URL: <https://vents.ua/ua/series/ventilators-vents-twinfresh-style>. – Accessed 09 February 2022.
5. Mileikovskiy, V. & Vakulenko, D. “Analytical Studies of the Non-stationary Mode of Operation of the VENTS TwinFresh Ventilator Heat Regenerator”. Kyiv, VENTS Magazine, 2019.
6. Viktor Mileikovskiy, Daria Vakulenko “Simulation of the efficiency of improved regenerative decentralised ventilators Vents TwinFresh”, Construction of optimized energy potential Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, BoZPE 2020;(1):61–67, 2020. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.1.07>
7. Internal Flow: Heat Transfer in Pipes [Electronic resource], URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjWrMbl_I3oAhWJ16YKHcy7-Ci8QFjANegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fmycourses.aalto.fi%2Fpluginfile.php%2F389208%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FLecturePipeFlow.pdf%3Fforcedownload%3D1&usq=AOvVaw2krJw7OsY1gVT7AribK2uu. – Accessed 05 November 2021
8. Ostrovskiy G. M. *Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i aparaty khimicheskikh tekhnologii*. ANO NPO «Professional», pp. 237-238, 2004.

УДК 697.97-5

Моделирование эффективности теплоутилизации регенеративного проветривателя различными подходами

Д. И. Вакуленко¹, В. А. Милейковский²

¹асп., асист. Київський національний університет будівництва та архітектури, г. Київ, Україна, coppoka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2960-9659

²д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва та архітектури, г. Київ, Україна, v_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Аннотация. Регенеративные проветриватели представляют собой перспективное направление эффективной вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха. Создана математическая модель регенератора теплоты проветривателя для улучшения эффективности его работы. В предыдущих работах на базе двух разных подходов было проведено моделирование работы регенератора теплоты. Коэффициенты эффективности, полученные в результате моделирования, имели значительное отличие. Целью работы является поиск альтернативных методов для адекватного определения эффективности работы проветривателя. Выполнено математическое моделирование с использованием другого подхода, учитывающего число Грасгофа. Получены значения, которые существенно отличаются от обоих предыдущих – до двух раз. В литературных источниках отсутствует информация об экспериментальных условиях определения числа Нуссельта, которое использовалось при моделировании. Возникает необходимость проведения экспериментальных исследований для определения эффективности работы регенеративного теплоутилизатора.

Ключевые слова: теплоутилизация, регенеративный теплообменник, моделирование, коэффициент эффективности.

UDC 697.97-5

Simulation the effectiveness of heat recovery of the regenerative ventilator using different approaches

D. Vakulenko¹, V. Mileikovsky²

¹ Post-graduate student, assistant professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, coppoka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2960-9659

² Sc.D, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Abstract. Today buildings should be designed for energy efficiency class not less than C. This requires ventilation with heat recovery. On the market, there are different compact heat recovery ventilation units for decentralized ventilation. Regenerative ventilators represent a promising area of effective ventilation with exhaust air heat recovery. They operate cyclically for the inlet and outlet of air. These kinds of ventilators should work in a blocked pair(s) – one for input and one for output in each pair. If not, the effectiveness will decrease. A mathematical model of the ceramic heat regenerator in the regenerative ventilator “Twin Fresh” by Vents has been created to improve the efficiency of its operation. In previous works, on the basis of two different approaches, the operation of the heat regenerator was simulated. The first one uses M. Mikheev’s formula for the Nusselt number. The second one is computational fluid dynamic simulation by SolidWorks Flow Simulation. The efficiency coefficients obtained as a result of the simulation had a significant difference – up to 66.5 %. The aim of the work is to find alternative methods for adequately determining the efficiency of the ventilator. A mathematical simulation was performed using a different formula from “Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i aparaty khimicheskikh tekhnologii”. This formula takes into account the Grashof number. Values obtained are significantly different from both previous ones – up to two times. There is no information in the literature about the experimental conditions for determining the Nusselt number, which was used in the simulation. Therefore, we can’t assume, what approach is closer to the conditions of the ceramic regenerator. There is a need to conduct experimental studies to determine the efficiency of the regenerative heat exchanger.

Keywords: heat recovery, regenerative heat exchanger, modelling, efficiency factor.

Надійшла до редакції / Received 12.02.2022