

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗПОДІЛУ
ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАКРУЧЕНОГО ПОВІТРЯНОГО СТРУМЕНЯ**

Бохан В.С., аспірант,
valentyn.s.bokhan@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4602-8249
Національний університет "Львівська Політехніка"
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79000, Україна

Анотація. Ефективне керування тепловими процесами в повітряних потоках є важливою умовою підвищення енергоефективності вентиляційних і теплотехнічних систем. Метою дослідження є аналіз процесів зниження надлишкової температури в ізотермічному вільному закрученому повітряному струмені з подальшим удосконаленням підходів до регулювання теплових характеристик потоку. Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення енергоефективності вентиляційних систем та теплотехнічного обладнання шляхом оптимізації температурних полів. Основне завдання полягало в аналізі процесів теплового згасання, обчисленні відповідного коефіцієнта та побудові температурних профілів у поперечних перерізах струменя. Для спрощення математичного опису введено коефіцієнт затухання температури, що дозволяє більш наочно оцінити динаміку теплового розсіювання. Здійснено кількісне дослідження розподілу осьових температур, побудовано графіки залежностей та визначено характер змін у різних зонах струменя. Запропоновано ефективний спосіб обчислення відносних температурних значень у довільних поперечних перерізах. Для врахування впливу гравітаційної сили на розвиток термічного поля застосовано безрозмірний критерій Архімеда. Температурні розподіли в струмені описано на основі узагальненої аналітичної моделі, аналогічної моделі Шліхтінга, адаптованої до теплових задач. Результати дослідження подано у вигляді узагальнених графічних залежностей та формул із поправочними коефіцієнтами. Виконано зіставлення експериментальних спостережень з результатами аналітичного моделювання, що засвідчило високу відповідність між отриманими даними та теоретичними передбаченнями. Проведений аналіз також охоплює формування турбулентних теплових структур у процесі охолодження струменя. Показано можливість регулювання температурного профілю шляхом зміни граничних умов та початкових параметрів. Отримані висновки можуть бути ефективно застосовані у проектуванні вентиляційних систем, теплотехнічного обладнання та енергетичних агрегатів, де критичною є рівномірність розподілу температури в повітряному середовищі. Зазначені результати є підґрунтям для подальшого дослідження нелінійних ефектів теплопередачі в умовах дії зовнішніх збурень та допоможуть розробити алгоритми автоматичного керування мікрокліматом у замкнених просторах.

Ключові слова: аеродинаміка, турбулентні потоки, закручений струмінь, температура, надлишкова температура, коефіцієнт затухання температури.

Вступ. Рациональний розподіл температурного поля у внутрішніх приміщеннях є ключовим чинником для формування сприятливого мікроклімату, підвищення енергоефективності та стабільної роботи систем повітрообміну [1]. Стандартні способи подачі повітря не завжди забезпечують необхідну однорідність температурного середовища, що може спричинити виникнення термічних застійних зон або нерівномірність теплових потоків [2].

Одним із перспективних рішень є застосування закручених повітряних струменів, які характеризуються підвищеним ступенем перемішування та стабільнішим поширенням теплового навантаження в об'ємі приміщення. Такі струмені демонструють збереження температурного надлишку на більших відстанях та сприяють рівномірному розподілу тепла [3, 4]. У зв'язку з цим особливого значення набуває дослідження ізотермічного вільного

закрученого повітряного струменя як об'єкта, що дозволяє розкрити особливості формування й розвитку температурного поля у повітряному середовищі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У дослідженні [5] проаналізовано вплив геометрії вентиляційного отвору та режиму подачі припливного повітря на формування структури повітряного струменя. Автори зосередили увагу на різновидах потоків – плоских, осесиметричних і закручених – які виникають залежно від конфігурації сопла та умов подачі повітря, однак, не розглянуто теплові особливості закрученого струменя та процес його температурного згасання. У роботі [6] розглянуто вплив навколишніх поверхонь на режим розвитку повітряного струменя. Установлено, що за відсутності перешкод потік є вільним, а у випадку взаємодії з твердими межами – обмеженим. Це має суттєве значення для оцінки теплових та аеродинамічних характеристик струменя, але у роботі не подано аналітичного опису температурного поля у вільному закрученому струмені. У статті [7] проаналізовано класифікацію струменів за температурним режимом. Зокрема, наголошено на важливості розмежування між ізотермічними та неізотермічними потоками, що дозволяє точніше передбачати їхню поведінку в реальних умовах експлуатації вентиляційних систем. Однак, не подано математичного опису температурного згасання та розподілу температури в ізотермічному закрученому потоці. У дослідженні [8] визначено ключову роль числа Рейнольдса для класифікації режимів руху повітря. Наведено критичні значення Re , що дозволяють розмежувати ламінарні й турбулентні режими, а також проаналізовано вплив турбулентності на інтенсивність теплового обміну. Проте, не розглянуто детально механізми формування турбулентних теплових структур у закрученому струмені. У роботі [9] розглянуто формування ядра струменя, в якому зберігаються початкові параметри потоку. Запропоновано методику визначення зони поширення температурного впливу шляхом побудови зовнішнього контуру струменя через геометричну прив'язку до осі симетрії, але не враховано вплив гравітаційних сил на розподіл температури. У статті [10] проаналізовано теплові процеси в початковій зоні неізотермічного струменя. Автори підкреслюють наявність теплового згасання вздовж осі симетрії та значну інтенсивність теплообміну із зовнішнім середовищем, що визначає специфіку розвитку струменя на ранніх етапах його поширення. Проте не запропоновано формального коефіцієнта температурного згасання та не подано узагальненої аналітичної моделі для опису температурного поля.

Таким чином, огляд сучасної літератури засвідчив комплексне вивчення геометричних, гідродинамічних і теплових характеристик повітряних струменів. Проте жодна з проаналізованих робіт не зосереджена на кількісному описі процесів згасання температури саме в ізотермічному вільному закрученому струмені з урахуванням критеріїв подібності та корекційних коефіцієнтів. Це і визначає актуальність проведення нашого дослідження.

Мета та завдання. Предметом цього дослідження є закономірності розподілу температури та особливості згасання теплових характеристик в межах вказаного потоку. Метою роботи є аналіз просторової динаміки температури в закрученому струмені з подальшим удосконаленням методичних підходів до регулювання теплових параметрів повітряних систем.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз формування температурного поля в ізотермічному закрученому струмені.
2. Визначити аналітичну залежність для опису процесу теплового згасання.
3. Ввести коефіцієнт згасання температури як узагальнюючий параметр для оцінювання динаміки розсіювання тепла.
4. Побудувати температурні профілі у поперечних перерізах струменя та дослідити їхню зміну вздовж осі.
5. Застосувати безрозмірні критерії (зокрема Архімеда) для врахування впливу гравітації на розподіл температури.
6. Порівняти отримані аналітичні результати з експериментальними спостереженнями для підтвердження достовірності моделі.

Аналіз теплових властивостей закручених потоків дозволяє глибше осмислити механізми

їх формування, що, у свою чергу, створює передумови для вдосконалення методів керування тепловими процесами. Це має важливе значення для проєктування ефективних систем вентиляції, кондиціонування та теплотехнічного обладнання в промислових і громадських будівлях.

Матеріали та методика дослідження. Залежно від величини критерію Архімеда Ar_0 припливні повітряні струмені класифікують як слабо неізотермічні, якщо гравітаційний вплив на них незначний, та неізотермічні, якщо температура істотно впливає на їхню траєкторію [11].

Як відомо [12], для горизонтальних струменів із малою температурною різницею (слабо неізотермічні) надлишкова температура визначається за формулою (1):

$$\Delta t_x = \frac{N}{x}, \quad (1)$$

де x – координата вздовж осі струменя, а N – узагальнений тепловий параметр, що розраховується за залежністю [13]:

$$N = \frac{0,54}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{\frac{T_g}{T_o}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\xi}} \cdot \Delta t_o \cdot \sqrt{F_o}, \quad (2)$$

де α – кут розширення струменя (прийнято $\alpha = 12^\circ 25'$, відповідно $\operatorname{tg} \alpha = 0.22$); $\xi = 1$ – коефіцієнт місцевого опору; T_g – абсолютна температура повітря на виході з насадки, К; F_o – площа перерізу насадки, м^2 ; Δt_o – початкова надлишкова температура, $^\circ\text{C}$.

Початкова надлишкова температура розраховується за формулою (3) [13]:

$$\Delta t_o = T_g - T_o. \quad (3)$$

З метою оптимізації розрахунків вводиться безрозмірний коефіцієнт затухання температури n [13]:

$$n = \frac{0,54}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{\frac{T_g}{T_o}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\xi}}, \quad (4)$$

де всі позначення відповідають попередньому виразу. Враховуючи це, подовжнє зменшення надлишкової температури на певній відстані x представлено у вигляді (5):

$$\Delta t_x = n \cdot \Delta t_o \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{x}. \quad (5)$$

Отримані залежності дозволяють кількісно описати закономірності охолодження струменя та врахувати вплив геометричних і теплових параметрів на процес поширення температурного поля в повітряному потоці [14].

На будь-якій площині перерізу, розташованій на координаті x , величина надлишкової температури $\Delta t_y = t_y - t_v$ на відстані y від осі струменя визначається за модифікованою формулою Тейлора [14]:

$$\Delta t_y = \Delta t_x \cdot \exp\left(-0,7\sigma_T \bar{y}^2\right), \quad (6)$$

де σ_T – число Прандтля для турбулентного теплообміну, що для компактних струменів зазвичай змінюється в межах 0.65–0.7; $\bar{y} = y/(cx)$ – відносна поперечна координата; $c = 0.28$ – емпірична константа, отримана за експериментальними даними, y та x – відповідно поперечна та поздовжня координати, м.

У будь-якому поперечному перерізі (координата « x ») та на певній відстані « y » від осі, температура Δt_y обчислюється з урахуванням профілю розподілу за законом:

$$\Delta t_y = t_x \left[1 - \left(\frac{y}{y_b} \right)^{1,5} \right]^2. \quad (7)$$

У практиці аналізу температурних полів струменя доцільно застосовувати нормовані значення температурного перевищення як у поздовжньому напрямку:

$$\Delta \bar{t}_x = \Delta t_x / \Delta t_o, \quad (8)$$

так і в поперечному:

$$\Delta \bar{t}_y = \Delta t_y / \Delta t_x. \quad (9)$$

Ці безрозмірні величини дозволяють уніфікувати аналіз температурного розподілу вздовж і поперек осі струменя для різних геометричних та температурних умов [15].

Середня відносна осьова та поперечна надлишкова температура (відповідно (8)(9)) описуються за допомогою температурних відносних коефіцієнтів (10), [15]:

$$\bar{\Delta t}_x = \frac{0,48}{\frac{ax}{d_e} + 0,145}, \quad (10)$$

де $a = 0,078$, безрозмірна експериментальна константа; d_e – еквівалентний діаметр отвору насадки, м.

Число Архімеда Ar_o що характеризує баланс між гравітаційними та інерційними ефектами в струмені, визначається за [15]:

$$Ar_o = \frac{g \sqrt{F_o} \cdot \Delta t_o}{t_o^2 \cdot T_e}, \quad (11)$$

де $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; F_o – площа виходу насадки (m^2); $\Delta t_o = t_o - t_v$ – надлишкова температура ($^{\circ}\text{C}$); T_v – температура повітря в приміщенні (K); t_o – температура повітря в струмені ($^{\circ}\text{C}$).

Результати досліджень. Для вимірювань було використано термоелектричний анемометр testo-405. Початкове значення температури t_o було встановлено експериментально. Значення x_i варіювали в межах 0.7-2.2. Температурні розподіли t_y у поперечному напрямку було розраховано за формулою (10), після чого побудовано графіки залежності $\bar{t}_x = f(\bar{x})$, де $\bar{x} = x / \sqrt{F_o}$.

Результати на рис. 1 добре узгоджуються з теоретичними розрахунками.

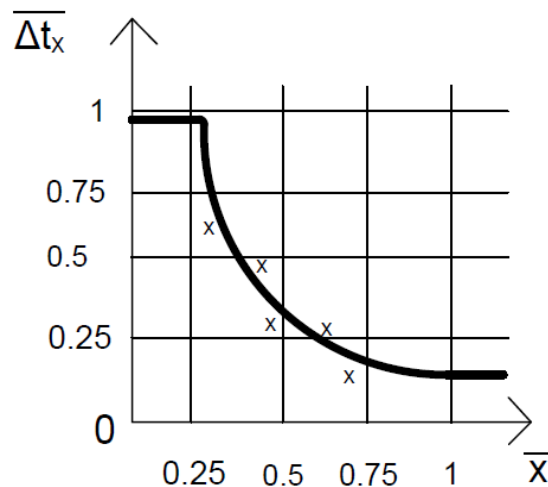


Рис. 1. Залежність відносної осьової надлишкової температури від відносної поздовжньої координати

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в тому, що вперше для ізотермічного вільного закрученого повітряного струменя введено узагальнений коефіцієнт теплового затухання, який забезпечує спрощене аналітичне представлення процесів розсіювання температури. Побудовано температурні профілі у довільних поперечних перерізах з використанням апроксимуючих функцій, що дозволило уточнити просторову структуру термічного поля. Урахування безрозмірного критерію Архімеда дало змогу розширити існуючі моделі опису теплообміну у вільних струменях за рахунок врахування гравітаційних ефектів.

Практична значущість результатів дослідження полягає в можливості використання отриманих залежностей та коефіцієнтів для інженерного розрахунку теплових характеристик вентиляційних систем, теплотехнічного обладнання та енергетичних установок. Запропоновані моделі дозволяють заздалегідь прогнозувати розподіл температури повітря в приміщенні, забезпечуючи ефективніше проєктування систем мікроклімату з урахуванням рівномірності температурного поля та енергоефективності.

Висновки. За результатами проведеного дослідження можна сформулювати такі основні висновки:

1. Отримані результати сприяють удосконаленню підходів до аналізу теплових характеристик повітряних потоків і є необхідними при проєктуванні вентиляційних систем.
2. Встановлено характер розподілу відносної осьової надлишкової температури в повітряному закрученому струмені.
3. Визначено закономірності зміни відносної осьової надлишкової температури вздовж осі.
4. Проведене порівняння експериментальних даних із результатами аналітичного моделювання підтверджує надійність запропонованого математичного опису та доцільність його використання у практичних застосуваннях, зокрема в теплотехніці, вентиляції та енергетиці.

Література

1. Allmaras S.R., Johnson F.T., & Spalart P.R. Modifications and clarifications for the implementation of the spalart-allmaras turbulence model ICCFD7-1902. *7th International Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2012, Hawaii. https://www.iccfd.org/iccfd7/assets/pdf/papers/ICCFD7-1902_paper.pdf.
2. Dovhaliuk V. et al. Simplified analysis of turbulence intensity in curvilinear wall jets. *FME Transactions*, 2018. 46. 177–182.
3. Dovhaliuk V., & Mileikovskiy V. New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018. 7(3.2). 591-596. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14596>.
4. Kapalo P., Sedláková A., Košicanová D., Voznyak O., Lojkovics J., & Siroczki P. Effect of ventilation on indoor environmental quality in buildings. *The 9th International Conference "Environmental Engineering"*, 2014, Vilnius, Lithuania. http://enviro2014.vgtu.lt/Articles/6/265_Kapalo.pdf.
5. Lorin E., Benhajali A., & Soulaïmani A. Positivity Preserving Finite Element-Finite Volume Solver for The Spalart-Allmaras Turbulence Model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007. Vol. 196, No 17–20 2097–2116. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2006.10.009>.
6. Kapalo P., Vilcekova S., Domnita F., Bacotiu C., & Voznyak O. Determining the Ventilation Rate inside an Apartment House on the Basis of Measured Carbon Dioxide Concentrations. *The 10-th International Conference "Environmental Engineering"*, 2017, Vilnius, Lithuania, Selected Papers, 30 – 35. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.262>.
7. Kapalo P., Vilcekova S., & Voznyak O. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms. *Chemical Engineering Transactions*, 2014. 39. 1789–1794. <https://www.aidic.it/cet/14/39/299.pdf>.
8. Andersson H., Cehlin M., & Moshfegh B. Experimental and numerical investigations of a new ventilation supply device based on confluent jets. *Building and Environment*, 2018. Vol. 137. 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.038>.
9. Bin Z., Xianting L., Qisen Y.Zh. A simplified system for indoor airflow simulation. *Building and Environment*, 2003. Vol. 38. 543–552. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132302001828>.
10. Gumen O., Dovhaliuk V., & Mileikovskiy V. Geometric representation of turbulent macrostructure in 3D jets, *ICGG 2018, Proceedings of the 18-th International Conference on Geometry and Graphics*, 2019, 739-745. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_61.
11. Gumen O. et al. Geometric analysis of turbulent macrostructure in jets laid on flat surfaces for turbulence intensity calculation. *FME Transaction*, 2017. 45. 236-242. <https://doi.org/10.5937/fmet1702236G>.

12. Janbakhsh S., & Moshfegh B. Experimental investigation of a ventilation system based on wall confluent jets. *Building and Environment*, 2014. Vol. 80. 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.011>.
13. Rumsey C.L., & Spalart P.R. Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields. *AIAA Journal*, 2009. Vol. 47. No. 4. 982–993. <https://doi.org/10.2514/1.39947>.
14. Srebric J., & Chen Q. Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers. *HVAC&R Research*, 2002. 8(3). 277–294. <https://doi.org/10.1080/10789669.2002.10391442>.
15. Voznyak O., Korbut V., Davydenko B., & Sukholova I. Air distribution efficiency in a room by a two-flow device. *Springer, Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering*, 2019. Vol. 47. 526–533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_67.

References

- [1] S.R. Allmaras, F.T. Johnson, & P.R. Spalart, "Modifications and clarifications for the implementation of the spalart-allmaras turbulence model", *ICCFD7-1902. 7th International Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2012, Hawaii. https://www.iccfd.org/iccfd7/assets/pdf/papers/ICCFD7-1902_paper.pdf.
- [2] V. Dovhaliuk et al., "Simplified analysis of turbulence intensity in curvilinear wall jets", *FME Transactions*, 46, 177–182, 2018.
- [3] V. Dovhaliuk, & V. Mileikovskiy, "New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization", *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3.2), 591-596. 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14596>.
- [4] P. Kapalo, A. Sedláková, D. Košicanová, O. Voznyak, J. Lojkovics, & P. Siroczki, "Effect of ventilation on indoor environmental quality in buildings", *The 9th International Conference "Environmental Engineering"*, 2014, Vilnius, Lithuania. http://enviro2014.vgtu.lt/Articles/6/265_Kapalo.pdf.
- [5] "Positivity Preserving Finite Element-Finite Volume Solver for The Spalart-Allmaras Turbulence Model", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196, no. 17–20, pp. 2097–2116, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2006.10.009>.
- [6] P. Kapalo, S. Vilcekova, F. Domnita, C. Bacotiu, & O. Voznyak, "Determining the Ventilation Rate inside an Apartment House on the Basis of Measured Carbon Dioxide Concentrations", *The 10-th International Conference "Environmental Engineering"*, 2017, Vilnius, Lithuania, Selected Papers, 30 – 35. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.262>.
- [7] P. Kapalo, S. Vilcekova, & O. Voznyak, "Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms", *Chemical Engineering Transactions*, 39, 1789–1794, 2014. <https://www.aidic.it/cet/14/39/299.pdf>.
- [8] H. Andersson, M. Cehlin, & B. Moshfegh, "Experimental and numerical investigations of a new ventilation supply device based on confluent jets", *Building and Environment*, vol. 137, 18–33, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.038>.
- [9] Z. Bin, L. Xianting, Y. Zh. Qisen, "A simplified system for indoor airflow simulation", *Building and Environment*, vol. 38, 543–552, 2003. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132302001828>.
- [10] O. Gumen, V. Dovhaliuk, & V. Mileikovskiy, "Geometric representation of turbulent macrostructure in 3D jets", *ICGG 2018, Proceedings of the 18-th International Conference on Geometry and Graphics*, pp. 739-745, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_61.
- [11] O. Gumen et al., "Geometric analysis of turbulent macrostructure in jets laid on flat surfaces for turbulence intensity calculation", *FME Transaction*, 45, 236-242, 2017. <https://doi.org/10.5937/fmet1702236G>.
- [12] S. Janbakhsh, & B. Moshfegh, "Experimental investigation of a ventilation system based on wall confluent jets", *Building and Environment*, vol. 80, 18-31, 2014.

- <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.011>.
- [13] C.L. Rumsey, & P.R. Spalart, "Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields", *AIAA Journal*, vol. 47, no. 4, 982–993, 2009. <https://doi.org/10.2514/1.39947>.
- [14] J. Srebric, & Q. Chen, "Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers", *HVAC&R Research*, 8(3), 277–294, 2002. <https://doi.org/10.1080/10789669.2002.10391442>.
- [15] O. Voznyak, V. Korbut, B. Davydenko, & I. Sukholova, "Air distribution efficiency in a room by a two-flow device", *Springer, Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering*, vol. 47, 526–533, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_67.

IMPROVING TEMPERATURE DISTRIBUTION EFFICIENCY USING A SWIRLING AIR JET

Bokhan V.S., postgraduate,
valentyn.s.bokhan@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4602-8249
Lviv Polytechnic National University
12 Stepana Bandery Street, Lviv, 79000, Ukraine

Abstract. Effective control of thermal processes in air flows is an important condition for improving the energy efficiency of ventilation and heat engineering systems. The aim of the study is to analyze the processes of reducing excess temperature in an isothermal free swirling air jet, followed by the improvement of approaches to regulating the thermal characteristics of the flow. The relevance of the work is determined by the need to enhance the energy efficiency of ventilation systems and heat engineering equipment through the optimization of temperature fields. The main task consisted in analyzing the processes of thermal decay, calculating the corresponding coefficient, and constructing temperature profiles in cross-sections of the jet. To simplify the mathematical description, a temperature attenuation coefficient was introduced, which makes it possible to more clearly assess the dynamics of heat dissipation. A quantitative study of axial temperature distribution was carried out, dependence graphs were constructed, and the nature of changes in different jet zones was determined. An efficient method for calculating relative temperature values in arbitrary cross-sections was proposed. To account for the influence of gravitational forces on the development of the thermal field, the dimensionless Archimedes number was applied. The temperature distributions in the jet were described on the basis of a generalized analytical model similar to the Schlichting model, adapted to thermal problems. The results of the study are presented in the form of generalized graphical dependencies and formulas with correction coefficients. A comparison of experimental observations with analytical modeling results demonstrated a high degree of agreement between the obtained data and theoretical predictions. The analysis also covers the formation of turbulent thermal structures during jet cooling. The possibility of regulating the temperature profile by changing boundary conditions and initial parameters is shown. The obtained conclusions can be effectively applied in the design of ventilation systems, heat engineering equipment, and energy units, where the uniformity of temperature distribution in the air environment is critical. The presented results provide a foundation for further research on nonlinear heat transfer effects under external disturbances and will contribute to the development of algorithms for automatic microclimate control in enclosed spaces.

Keywords: aerodynamics, turbulent flows, swirling jet, temperature, excess temperature, temperature attenuation coefficient.

Стаття надійшла до редакції 13.08.2025

Стаття прийнята до друку 10.09.2025

Дата публікації статті 25.12.2025

This work by © 2025 by Бохан В.С. is licensed under CC BY 4.0