УДК 697.92 DOI 10.31548/energiya2020.06.071

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ В ПРИМІЩЕННІ КОТЕЛЬНІ

О. Т. Возняк, доктор технічних наук, професор

Ю. С. Юркевич, кандидат технічних наук, доцент

М. Є. Касинець, кандидат технічних наук, асистент

Національний університет «Львівська політехніка»

Н. А. Сподинюк, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: *n_spoduniuk@meta.ua*

Анотація. *Питання забезпечення нормативного повітрообміну у приміщеннях котелень є надзвичайно актуальним. У статті представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень визначення швидкості повітряного потоку при розподілі повітря круглими та компактними струменями у приміщенні котельні. Наведені графічні та аналітичні залежності. Результатами досліджень обґрунтовано вищу точність визначення середньої швидкості повітряного струменя в малогабаритних приміщеннях котелень.*

Метою роботи є розроблення методу експериментального визначення ефективності системи вентиляції в приміщенні котельні; підвищення точності визначення середньої швидкості круглих та компактних повітряних струменів у площині припливного насадка для забезпечення нормативного повітрообміну приміщення котелень та обґрунтування методику розрахунку.

Встановлено характеристики та закономірності розвитку круглих та компактних струменів у приміщеннях та отримано розрахункові залежності. Обґрунтовано, що застосування запропонованого методу дозволить суттєво підвищити точність визначення повітрообміну у приміщеннях котелень для забезпечення необхідної величини згідно з нормативними вимогами. Наведено рекомендації практичного визначення розрахункових величин для забезпечення належної вентиляції приміщень котелень.

Ключові слова: ***вентиляція, витрата, повітророзподіл, швидкість повітря, круглий повітряний струмінь, компактний повітряний струмінь***

Актуальність. Внутрішній мікроклімат приміщень характеризується різними параметрами повітря [1], включаючи концентрацію CO_2 [2, 3, 4]. Внутрішній мікроклімат приміщень котелень повинен відповідати нормативним параметрам внутрішнього повітря.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з діючими нормативними документами для приміщень котельні, що мають надлишки тепла, слід передбачати систему вентиляції з природним спонуканням. За неможливості забезпечення необхідного повітрообміну за рахунок природної вентиляції, проектують вентиляцію з механічним спонуканням. Системи вентиляції, способи подачі і видалення повітря необхідно приймати згідно з додатком Д. Для приміщень вбудованих котелень та дахових котелень, що працюють на газоподібному паливі, а також приміщень окремо розташованих та прибудованих котелень площею не більше, ніж 200 м^2 або висотою не більше, ніж 6 м, необхідно передбачати не менше, ніж трикратний повітрообмін за годину без урахування витрати повітря для горіння.

Таким чином, комфортні умови забезпечуються мінімальним трикратним повітрообміном, зокрема природньою витяжною вентиляцією. Кількість припливного повітря повинна бути більшою, оскільки його додаткова кількість потрібна для процесу горіння [1]. Необхідна кількість припливного повітря повинна забезпечуватись природньою вентиляцією і залежить від прийнятої схеми організації повітрообміну і способу подачі повітря у приміщення котельні [5]. Комбінація цих факторів визначає природу повітряного потоку і особливість розвитку вентиляційних струмин у приміщенні [5].

Тому при введенні котельні в експлуатацію та при міжсезонних пуско-налагоджувальних роботах проводиться паспортизація систем вентиляції котельнві на предмет відповідності розахунковим витратам припливного та витяжного повітря.

Величина трикратного повітрообміну зазвичай визначається експериментально. При цьому вимірюється швидкість повітря декілька разів у декількох точках у перерізі припливних та витяжних отворів для подальшого усереднення результатів, а також площа самих отворів. Відтак аналітично визначається продуктивність системи за рівнянням нерозривності. При цьому не враховується характер припливної струмини, її характеристики та особливості. Оскільки профіль струмини

є специфічним, існує можливість суттєвої похибки при виборі точок вимірювання та їх кількості.

Мета дослідження – розроблення методу експериментального визначення ефективності системи вентиляції в приміщенні котельні; підвищення точності визначення середньої швидкості круглих та компактних повітряних струменів у площині припливного насадка для забезпечення нормативного повітрообміну приміщення котелень та обґрунтування методики розрахунку.

Матеріали та методи дослідження. Важливо враховувати вплив технологічного обладнання та обслуговуючого персоналу на особливості розподілу швидкостей у припливному повітряному потоці. У даному випадку потрібно забезпечити необхідний повітрообмін у приміщенні котельні. Поряд із забезпеченням трикратної природної витяжки слід врахувати подачу надлишкової кількості припливного повітря для горіння газу, забезпечуючи повітряний баланс. Одним із способі збільшення ефективності системи вентиляції є застосування компактних, круглих припливних та витяжних повітряних струменів [5]. Окрім підвищення ефективності потрібно враховувати настилання припливної струмини на стелю, що впливає на розподіл поля швидкостей, процеси змішування і затухання швидкостей у струмині [6, 7, 8]. Також у випадку наявності технологічного обладнання і обслуговуючого персоналу та у невисоких приміщеннях найбільш раціональною є схема подачі припливного повітря настильними круглими або компактними припливними струминами.

Результати досліджень та їх обговорення. У роботі розглянуто компактні та круглі настильні струмини, що подаються вздовж невисокого виробничого приміщення із технологічним обладнанням та обслуговуючим персоналом при тупиковій схемі, при умові розташування витяжного отвору в тій самій площині, що і припливний (рис. 1).

У цьому випадку робоча зона із обслуговуючим персоналом омивається зворотнім потоком. Тому актуальним є визначення закономірностей розподілу струмини у зворотному потоці. Основна увага в цій роботі присвячена визначенню середньої швидкості повітря у витяжному отворі.

У вентиляційній техніці подача повітря здійснюється через припливні отвори (рис.1). Зазвичай утворюються вільні неізотермічні турбулентні струмені. Вони можуть бути різних типів: круглі, компактні, плоскі тощо.

Рис. 1. Котельня

Вільні струмини не мають перешкод при своєму розвитку, а на стиснені впливають поверхні приміщень. Якщо температура виходу струмини з насадка співпадає з температурою повітря в приміщенні, то струмина є ізотермічною, а якщо не співпадає (вища або нижча) – то неізотермічною (нагрітою чи охолодженою). Якщо критерій Re < 2300, то струмина є ламінарною, а при величинах Re > 10000 – турбулентною.

Область потоку з постійною швидкістю і температурою – це ядро струмини. По осі насадка на певній відстані від його зрізу знаходиться полюс струмини О. Якщо з нього через границі зрізу насадка провести промені, то одержимо зовнішні границі струмини.

На основній ділянці розвиток струмини супроводжується монотонним падінням осьової швидкості v_x. В ізотермічних струминах осьова швидкість v_x визначається за відомою формулою:

$$v_x = \frac{M}{x} \qquad (1),$$

де x – поточна координата; M – динамічна характеристика:

$$M = \frac{0,66}{tg\alpha}\sqrt{\frac{T_в}{T_o}} \cdot \sqrt[4]{\xi} \cdot v_o \cdot \sqrt{F_o} \qquad (2)$$

де α – кут розкриття струмини, а α = $12^0 25'$, а tgα = 0,22; ξ – коефіцієнт місцевого опору, ξ =1; T_o, $T_в$ – абсолютні температури відповідно на виході з насадка і в приміщенні; v_o – початкова швидкість, м/с; F_o – площа припливного насадка, м^2.

Важливою характеристикою є коефіцієнт затухання швидкості *m*, який визначається з (3):

$$m = \frac{0,66}{tg\alpha}\sqrt{\frac{T_в}{T_o}} \cdot \sqrt[4]{\xi} \qquad (3)$$

Відтак осьова швидкість v_x:

$$v_x = m \cdot v_o \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{x} \qquad (4)$$

Як відомо, профіль швидкостей у поперечному перерізі вільного компактного струменя має вигляд, як представлено на рис.2. Швидкість v_y в будь-якому перерізі «***x***» на відстані «***y***» від осі вільного компактного струменя (рис.2) визначається за теоріями Райхардта та Шліхтінга. Профіль розподілу швидкостей в поперечному перерізі вільного струменя підкоряється закону, який описаний формулою Райхардта, а саме:

$$\frac{v_y}{v_x} = e^{-0,7\left(\frac{y}{y_{0,5}}\right)^2} \qquad (5)$$

де v_x та v_y – відповідно осьова та поперечна швидкість, м/с; *y* – поточна поперечна координата, м; $y_{0,5}$ – поперечна координата, в якій поперечна швидкість дорівнює половині осьової.

Цією теорією враховано, що швидкість повітря не досягає нуля біля границі струменя. Її недоліком є те, що вона не окреслює границі струменя за своїм характером експоненти. Границі струменя враховано Шліхтінгом, але при цьому розглядається умовне спрощення, що на границі струменя швидкість дорівнює нулю, що насправді не відповідає дійсності. Профіль швидкості описується за такою формулою:

$$v_y = v_x\left[1-\left(\bar{y}\right)^{1,5}\right]^2 \qquad (6),$$

де $\bar{y}$ – це відносна поперечна координата, яка визначається як $\bar{y} = \dfrac{y}{y_{гр}}$, а y та $y_{гр}$ – відповідно поперечна абсолютна координата та відстань до границі струменя.

$\overline{v_y}$ – це відносна поперечна швидкість, яка визначається за (3):

$$\overline{v_y} = \frac{v_y}{v_x} \qquad (7)$$

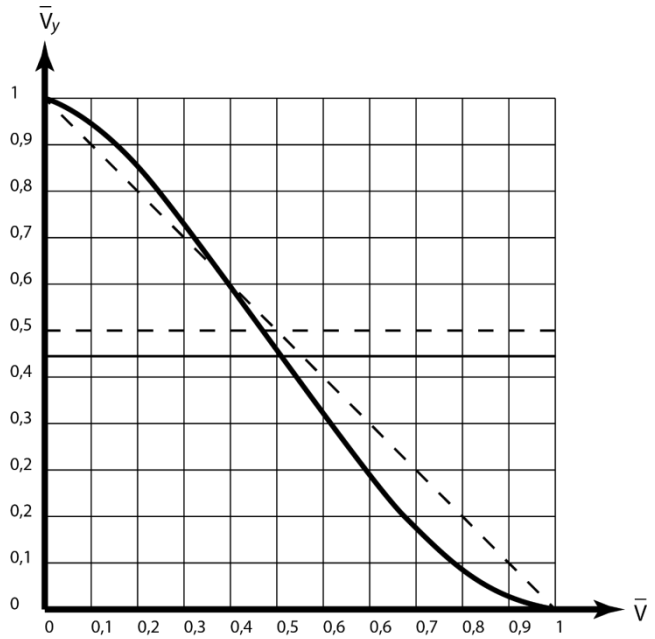

Рис.2. Залежність відносної швидкості від відносної поперечної координати: штрихова лінія – результати за традиційною методикою; суцільна лінія – уточнені результати

Доцільно використовувати відносні значення швидкостей, осьової $\bar{v}_x = v_x / v_o$ та в будь-якому поперечному перерізі $\bar{v}_y = v_y / v_x$.

При визначенні швидкості припливних та витяжних струмин у приміщенні котельні загальноприйнятою є методика виконання замірів у декількох точках у перерізі припливних та витяжних отворів з подальшим їх усередненням. Але графік осьової швидкості та профіль швидкостей (рис.2) свідчать про те, що при виборі точок існує можливість похибки, яка може бути суттєвою. У статті пропонується

уникнути цього явища, провівши визначення інтегральної швидкості за формулою (2) для круглої та компактної струмини. Оскільки кругла струмина є симетричною, то доцільно застосувати кратний інтеграл та полярні координати. Для компактної струмини доцільно двічі застосувати плоску задачу по взаємно перпендикулярних осях.

Для круглої струмини розкриваємо дужки у формулі Шліхтінга та переходимо до полярних координат:

$$v_{інт} = \int_0^1 \left(1 - 2\rho^{1,5} + \rho^3\right)\rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi . \tag{8}$$

Після розділення змінних:

$$v_{інт} = \int_0^1 \left(\rho - 2\rho^{2,5} + \rho^4\right) d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi . \tag{9}$$

Отримуємо результат інтегрування:

$$v_{інт} = \left(0,5\rho^2 \Big|_0^1 - \frac{2}{3,5}\rho^{3,5}\Big|_0^1 + \frac{1}{5}\rho^5\Big|_0^1 \right) 2\pi . \tag{10}$$

Після підстановки меж інтегрування отримуємо відносну інтегральну швидкість $v_{інт}$= 0,26π. Площа струмини F в площині насадка F= πr^2, тобто π відносних одиниць, (πr^2, де r =1), відтак середня відносна швидкість круглої струмини $v_{сер}$ = 0,26.

Для компактної струмини застосовуємо Декартові координати:

$$v_{інт} = \int_0^1 \left(1 - 2\bar{y}^{1,5} + \bar{y}^3\right) d\bar{y} . \tag{11}$$

Отримуємо результат інтегрування:

$$v_{інт} = \bar{y}\Big|_0^1 - \frac{2}{2,5}\bar{y}^{2,5}\Big|_0^1 + \frac{1}{4}\bar{y}^4\Big|_0^1 . \tag{12}$$

Після підстановки меж інтегрування отримуємо відносну інтегральну швидкість по осях OY та OZ $v_{інт}$= 0,45 та результуючу $v_{інт}$ = 0,2025. Площа струмини F у площині насадка F = $4r^2$, тобто 4 відносних одиниці, а середня відносна швидкість круглої струмини $v_{сер}$ = 0,2025.

Порівнюючи площі насадків та середні швидкості струмин у площині насадків, отримуємо:

$$\pi r^2/4r^2 = \pi /4 = 0{,}785$$

$$0{,}2025/0{,}26 = 0{,}779$$

Як бачимо з отриманих результатів, спостерігається задовільна збіжність.

При застосуванні традиційного процесу визначення середньої швидкості в площині припливного отвору, усереднюючи результати замірів (штрихова пряма на рис.2) отримуємо $v_{сер}$ = 0,5. Цей результат отримуємо інтегруванням, тобто визначенням площі трикутника, а відтак його середньої лінії. При розгляді фактичного профілю швидкостей результатом інтегрування є $v_{сер}$ = 0,45. У випадку плоскої задачі похибка становить 10 %. Якщо розглядати просторову задачу для фактичного профілю, то визначаючи потрійний інтеграл отримуємо результат $v_{сер}$ = 0,2025. Відповідно традиційний спосіб дає результат 0,5х0,5=0,25 з похибкою 19 %. Причому ця похибка є не з недостачею, а з надлишком, тобто значно погіршує ситуацію.

Отже, для отримання задовільних експериментальних результатів при замірах швидкості у приміщенні котельні необхідно з максимальною точністю декілька разів заміряти швидкість у центрі припливного насадка. Відтак результат помножити на відносну середню швидкість: для круглої струмини $v_{сер}$ = 0,26 та для компактної – $v_{сер}$ = 0,2025. Для цього не слід використовувати координатник, а відшукати точку на перетині діагоналей для компактної струмини та точку на перетині діаметрів для круглої.

Висновки і перспективи. На основі отриманих результатів можна стверджувати, що:

- встановлена безрозмірна інтегральна швидкість повітря для круглих і компактних струменів повітря в приміщенні котельні;
- отримані розрахункові залежності для визначення витрати повітря в котельні;
- обгрунтовано, що для отримання задовільних експериментальних результатів при замірах швидкості в приміщенні котельні необхідно з максимальною точністю декілька разів заміряти швидкість у центрі припливного насадка. Відтак результат

помножити на відносну середню швидкість: для круглої струмини $v_{сер}$ = 0,26 та для компактної – $v_{сер}$ = 0,2025.

- отримані результати дають змогу уникнути суттєвої похибки (19 %) при визначенні необхідного повітрообміну вентиляції приміщення котельні.

Отримані результати дозволяють розрахувати середню швидкість компактних і круглих струмин у котельні та визначити швидкість потоку повітря необхідну згідно нормативних документів. Застосування цього методу дозволяє значно підвищити точність визначення витрати повітря для котельні.

Список використаних джерел

1. Voznyak O. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climat / O. Voznyak, K. Myroniuk, O. Dovbush // Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference 2005 Supplementary Issue. - Technical University of Kosice. – 2005. – P. 148–152.

2. Kapalo P. Ensuring comfort microclimate in the classrooms under condition of the required air exchange / P. Kapalo, O. Voznyak, Yu. Yurkevych, Kh. Myroniuk, I. Sukholova // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. - Vol. 5/10 (95). – 2018. – P. 6–14.

3. Kapalo P. The impact of carbon dioxide concentration on the human health - case study / P. Kapalo, F. Domnita, C. Bacotiu, N. Spodyniuk // Journal of Applied Engineering Sciences. - Vol. 8, No. 1. – 2018. – P. 61-66.

4. Kapalo P. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms / P. Kapalo, S. Vilcekova, O. Voznyak // Chemical Engineering Transactions. - Vol. 39. – 2014. – P. 1789-1794.

5. Voznyak O. Air distribution efficiency in a room by a two-flow device, Proceedings of CEE / O. Voznyak, V. Korbut, B. Davydenko, I. Sukholova // Advances in Resourse-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering, Springer. - Vol 47. – 2019. – P. 526–533.

6. Kapalo P. Effect of ventilation on indoor environmental quality in buildings / P. Kapalo, A. Sedláková, D. Košicanová, O. Voznyak, J. Lojkovics, P. Siroczki // The 9th International Conference “Environmental Engineering” 22–23 May 2014. Vilnius, Lithuania. – 2014.

7. Kapalo P. Ensuring comfort microclimate in the classrooms under condition of the required air exchange / P. Kapalo, O. Voznyak, Yu. Yurkevych, K. Myroniuk, I. Sukholova // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. - Vol 5/10 (95). – 2018. - P. 6 – 14.

8. Kapalo P. Determining the Ventilation Rate inside an Apartment House on the Basis of Measured Carbon Dioxide Concentrations - Case Study / P. Kapalo, S. Vilceková, F. Domnita, C. Bacotiu, O. Voznyak // The 10th International Conference on Environmental Engineering. - Vilnius, Lithuania. – 2017. – P. 30–35.

References

1. Voznyak O., Myroniuk K., Dovbush O. (2005). Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate. Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference 2005 Supplementary Issue. Technical University of Kosiceб 148–152.

2. Kapalo P., Voznyak O., Yurkevych Yu., Myroniuk Kh., Sukholova I. (2018). Ensuring comfort microclimate in the classrooms under condition of the required air exchange. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 5/10 (95), 6 – 14.

3. Kapalo P., Domnita F., Bacotiu C., & Spodyniuk N. (2018). The impact of carbon dioxide concentration on the human health - case study. Journal of Applied Engineering Sciences], 8 (1), 61-66.

4. Kapalo P., Vilcekova S., Voznyak O. (2014). Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms. Chemical Engineering Transactions,. 39, 1789-1794.

5. Voznyak O., Korbut V., Davydenko B., Sukholova I. (2019). Air distribution efficiency in a room by a two-flow device, Proceedings of CEE. Advances in Resourse-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering, Springer, 47, 526–533.

6. Kapalo P., Sedláková A., Košicanová D., Voznyak O., Lojkovics J., Siroczki P. (2014). Effect of ventilation on indoor environmental quality in buildings The 9th International Conference “Environmental Engineering” 22–23 May 2014. Vilnius, Lithuania.

7. Kapalo P., Voznyak O., Yurkevych Yu., Myroniuk K., Sukholova I. (2018). Ensuring comfort microclimate in the classrooms under condition of the required air exchange. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 5/10 (95), 6 – 14.

8. Kapalo P., Vilceková S., Domnita F., Bacotiu C., Voznyak O. (2017). Determining the Ventilation Rate inside an Apartment House on the Basis of Measured Carbon Dioxide Concentrations - Case Study. The 10th International Conference on Environmental Engineering. Vilnius, Lithuania, 30–35.

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ В ПОМЕЩЕНИИ КОТЕЛЬНОЙ

О. Т. Возняк, Ю. С. Юркевич, М. Е. Касынец, Н. А. Сподынюк

Аннотация. *Вопрос обеспечения нормативного воздухообмена в помещениях котельных является чрезвычайно актуальным. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований определения скорости воздушного потока при распределении воздуха круглыми и компактными струями в помещении котельной. Приведены графические и аналитические зависимости. Результатами исследований обоснованно высокую точность определения средней скорости воздушной струи в малогабаритных помещениях котельных.*

Целью работы является разработка метода экспериментального определения эффективности системы вентиляции в помещении котельной; повышение точности определения средней скорости круглых и компактных воздушных струй в

плоскости приточного насадка для обеспечения нормативного воздухообмена помещения котельных и обоснование методики расчета.

Установлены характеристики и закономерности развития круглых и компактных струй в помещениях и получены расчетные зависимости. Обосновано, что применение предложенного метода позволит существенно повысить точность определения воздухообмена в помещениях котельных для обеспечения требуемой величины в соответствии с нормативными требованиями. Приведены рекомендации практического определения расчетных величин для обеспечения вентиляции помещений котельных.

Ключевые слова*: вентиляция, расход, воздухораспределение, скорость воздуха, круглая воздушная струя, компактная воздушная струя*

METHOD OF THE BOILER ROOM VENTILATION SYSTEM EFFICIENCY EXPERIMENTAL DETERMINATION

O. Voznyak, Yu. Yurkevych, M. Kasynets, N. Spodyniuk

Abstract. *The issue of the normative air exchange ensuring in the premises of the boiler houses is extremely important. The article presents the results of theoretical and experimental studies of air velocity determination in the distribution of air by round and compact jets in the boiler room. Graphical and analytical dependences are given. The research results substantiate the higher accuracy of the average air flow velocity determination in small boiler rooms.*

The aim of the work is to develop a method for experimental determination of the efficiency of the ventilation system in the boiler room; to increase of the accuracy of the average velocity determination of the round and the compact air jets in the plane of the supply nozzle to ensure the normative air exchange of the boiler room and to substantiate of the calculation method.

The characteristics and patterns of development of round and compact air jets in the premises are established and the calculated dependences are obtained. It is substantiated that the application of the proposed method will significantly increase the accuracy of air exchange determination in the boiler rooms to ensure the required value in accordance with regulatory requirements. Recommendations for the practical determination of the calculated values to ensure proper ventilation of the boiler rooms are given.

Key words: ***ventilation, flow rate, air distribution, air velocity, round air jet, compact air jet***