УДК 697.9

В. В. Джеджула

ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМИ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ В ПРОТИРАДІАЦІЙНИХ УКРИТТЯХ ЗА ОБМЕЖЕНОГО ПОВІТРООБМІНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто задачу вибору схеми повітророзподілу в протирадіаційних укриттях, де нормативна витрата зовнішнього повітря на одну людину мала, а густина заповнення приміщень висока. Показано, що в режимі чистої вентиляції зовнішнє повітря здатне асимілювати повні тепловиділення людей лише за різниці ентальпій близько 31 кДж/кг, а в резервному режимі — понад 110 кДж/кг, тому ефективність повітророзподілу стає визначальним чинником. Запропоновано критерії порівняння схем повітророзподілу та методику їх оцінювання засобами чисельного моделювання в OpenFOAM.

Ключові слова: протирадіаційне укриття, повітророзподіл, повітрообмін, ефективність вентиляції, чисельне моделювання, OpenFOAM.

Abstract

The problem of selecting an air distribution scheme for radiation shelters with a small normative outdoor airflow per person and a high occupant density is considered. It is shown that in the clean ventilation mode outdoor air can assimilate the total heat gains of occupants only at an enthalpy difference of about 31 kJ/kg, and in the reserve mode at more than 110 kJ/kg, so the efficiency of air distribution becomes the decisive factor. Criteria for comparing air distribution schemes and a method for their evaluation by numerical simulation in OpenFOAM are proposed.

Keywords: radiation shelter, air distribution, air exchange, ventilation effectiveness, numerical simulation, OpenFOAM.

Вступ

Масове пристосування заглиблених приміщень під протирадіаційні укриття (ПРУ) після введення в дію оновлених будівельних норм [1] суттєво посилило вимоги до їх інженерного забезпечення, зокрема до систем вентиляції [2]. Особливістю ПРУ є мала висота приміщень, висока густина розміщення людей і обмежена витрата зовнішнього повітря, яка в резервному режимі скорочується в кілька разів. За таких умов однакова кількість поданого повітря може забезпечити як прийнятні, так і неприйнятні параметри в зоні перебування людей — залежно від схеми його подачі та видалення.

Методи чисельного моделювання повітряних потоків добре відпрацьовані для звичайних приміщень [3]. Для заглиблених споруд експериментально показано, що зміна організації повітряних потоків за незмінної витрати повітря дозволяє знизити середню температуру в приміщенні приблизно на 2 °C [4]. Водночас для ПРУ з їх специфічною геометрією та режимами роботи обґрунтованих рекомендацій щодо вибору схеми повітророзподілу недостатньо.

Метою роботи є обґрунтування критеріїв і методики вибору схеми повітророзподілу в ПРУ за обмеженого повітрообміну.

Результати дослідження

Повні тепловиділення однієї людини прийнято 113 Вт, витрату зовнішнього повітря в режимі чистої вентиляції — 11 м^3/(год·люд), у резервному режимі — 3 м^3/(год·люд). Необхідна різниця питомих ентальпій видаленого та припливного повітря для асиміляції тепловиділень людей становить

$$\Delta h = 3{,}6 \cdot q / (\rho \cdot L), \qquad (1)$$

де q — повні тепловиділення однієї людини, Вт; ρ — густина повітря, кг/м^3; L — витрата повітря на одну людину, м^3/год.

Результати розрахунку за формулою (1) наведено на рис. 1.

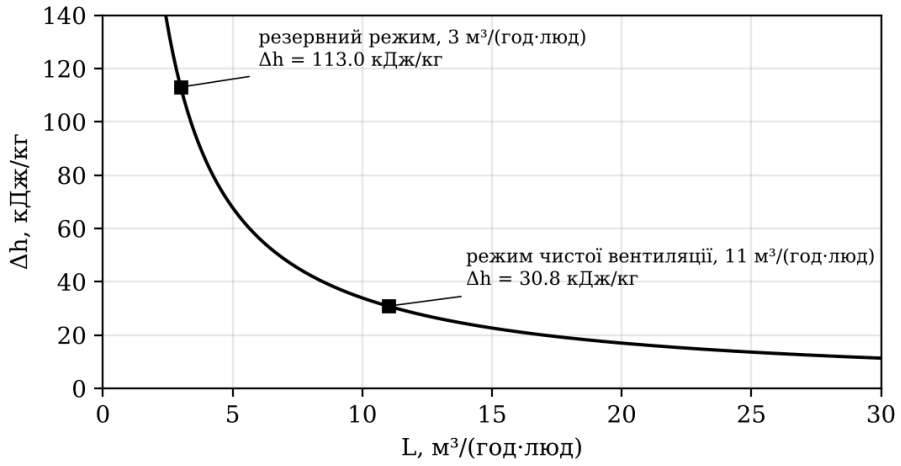


Рис. 1. Залежність необхідної різниці ентальпій Δh від витрати повітря на одну людину L

За L = 11 м³/(год·люд) $\Delta h \approx$ 30,8 кДж/кг, за L = 3 м³/(год·люд) — 113 кДж/кг. Орієнтовна різниця ентальпій між внутрішнім і зовнішнім повітрям у теплий період не перевищує 10–15 кДж/кг, отже лише зовнішнім повітрям тепловиділення людей не асимілюються. У ПРУ необхідна рециркуляція з охолодженням повітря, а зовнішнє повітря виконує насамперед функцію розбавлення CO_2. Відтак ефективність використання кожного кубометра повітря визначає саме схема повітророзподілу.

Для порівняння схем запропоновано використовувати коефіцієнти ефективності повітрообміну за температурою та за концентрацією CO_2:

$$\varepsilon_t = (t_в - t_п) / (t_{рз} - t_п); \quad \varepsilon_c = (C_в - C_п) / (C_{рз} - C_п), \tag{2}$$

де $t_в$, $t_п$, $t_{рз}$ — температура видаленого, припливного повітря та середня температура в зоні перебування людей, °C; $C_в$, $C_п$, $C_{рз}$ — відповідні концентрації CO_2, ppm.

Додатковими критеріями є вертикальний градієнт температури між рівнями 0,1 і 1,1 м від підлоги та частка об'єму зони перебування людей зі швидкістю руху повітря понад 0,25 м/с.

Розглянуто три схеми повітророзподілу: «зверху — вгору» (перемішувальна подача та видалення в верхній зоні), «зверху — вниз» (подача в верхній зоні, видалення з нижньої) та «знизу — вгору» (витісняльна подача з низькою швидкістю в нижній зоні, видалення з верхньої). За малої висоти приміщень ПРУ витісняльна схема обмежена висотою стратифікованого шару, а перемішувальна — ризиком «короткого замикання» потоку між припливними та витяжними пристроями.

Для кількісного порівняння схем запропоновано методику чисельного моделювання в OpenFOAM: тривимірна задача з урахуванням сил плавучості (розв'язувачі buoyantSimpleFoam та buoyantPimpleFoam), модель турбулентності k-ω SST, люди задаються як джерела теплоти та CO_2, огороджувальні конструкції — з температурою ґрунтового масиву. Розрахунки виконуються для режиму чистої вентиляції та резервного режиму з рециркуляційним повітроохолоджувачем, а схеми ранжуються за критеріями (2).

Висновки

Встановлено, що за нормативного повітрообміну в ПРУ асиміляція тепловиділень людей потребує різниці ентальпій близько 31 кДж/кг у режимі чистої вентиляції та 113 кДж/кг у резервному режимі, що неможливо забезпечити лише зовнішнім повітрям. Тому в ПРУ необхідна рециркуляція з охолодженням, а вибір схеми повітророзподілу визначає, наскільки ефективно використовується обмежена кількість повітря. Обґрунтовано критерії порівняння схем — коефіцієнти ефективності повітрообміну за температурою та концентрацією CO_2, і запропоновано методику їх чисельного визначення в OpenFOAM, яка дозволяє обирати схему повітророзподілу з урахуванням геометрії конкретного укриття та розміщення людей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Захисні споруди цивільного захисту : ДБН В.2.2-5:2023. — Офіц. вид. — Київ, 2023.

2. Джеджула В. В. Особливості влаштування вентиляції в захисних спорудах цивільного захисту / В. В. Джеджула // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. — 2023. — № 2. — С. 185–189. — DOI: 10.31649/2311-1429-2023-2-185-189.

3. Возняк О. Т. Моделювання потоку повітря у приміщенні в нестаціонарному режимі / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва. — 2017. — № 877. — С. 25–32.

4. Jin H. Experimental study on the optimization of thermal environment and airflow organization in a ventilated underground refuge chamber using deflectors / H. Jin, Z. Zhang, R. Mao, J. Zhou, H. Wu, X. Liang // Case Studies in Thermal Engineering. — 2025. — Vol. 69. — Art. 106023. — DOI: 10.1016/j.csite.2025.106023.

Джеджула Вячеслав Васильович — д-р екон. наук, професор, в. о. завідувача кафедри міського будівництва та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: djedjula@vntu.edu.ua

Dzhedzhula Viacheslav V. — Dr. Sc. (Econ.), Professor, Acting Head of the Department of Urban Construction and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: djedjula@vntu.edu.ua