

УДК 697.133:536.2.01

Кузнецов С. Г., д.т.н., професор
Інститут теоретичної і прикладної механіки
Академії наук Чеської республіки
Бутова А.П.
Донецький національний університет економіки
і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

ВПЛИВ НАВКОЛИШНЬОЇ ЗАБУДОВИ НА ЗМІНУ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ВИКЛИКАНИХ ВІТРОМ ПРИ ПРИРОДНІЙ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Інтерес до природної вентиляції зростає у будівельній галузі через екологічні проблеми, підвищення вимог до комфорту проживання та економічні критерії. Метою даного дослідження є вивчення викликаної вітром природної вентиляції, а зокрема поведінку вітру в щільній забудові, параметрів зміни потоків усередині і зовні будинків. Унікальністю дослідження є робота з вертикальними й горизонтальними градієнтами коефіцієнтів тиску. Отримані результати представляють наскільки важливі горизонтальні градієнти у розумінні потоку повітря. Також обговорюється управління вентиляційним потенціалом, міськими вітрами в умовах сталого розвитку архітектури.

Ключові слова: теплові втрати, природна вентиляція, вітровий тиск, аеродинамічна труба з пограничним шаром, вітровий вплив.

1. ВВЕДЕННЯ

У холодних або помірних кліматичних зонах України теплові втрати в результаті неконтрольованої вентиляції будинків складають значну частину від загального теплового навантаження, особливо в будинках перших років масового будівництва. Енергозбереження у даний час стає дуже важливою проблемою, тому необхідні сучасні більш точні методи розрахунку вентиляційних втрат тепла. Наявна інформація про розподіл тиску вітру на будівлі, що потрібна для точної оцінки вентиляційних втрат, в основному обмежується окремими будинками повністю відкритими для вітру з усіх сторін. Тим не менш, ця ситуація рідко зустрічається на практиці. Систематичні дослідження впливу моделі вітру на розподіл тиску були зроблені [1-3], де розглядалася будівля для однієї родини з різними видами озеленення і [4-6] призматична будівля, розташована в центрі житлового масиву з будівлями однакової висоти. У науковій практиці є також і повномасштабні дослідження

вентиляції, але, на жаль, вони не застосовні для загального питання теплових втрат.

Метою даної роботи є дослідження розподілу тиску вітру на житловий п'ятиповерховий будинок, оточений ідентичними будівлями. Такий об'єкт дослідження було обрано через те, що він є типовим для забудови України. Коефіцієнти тиску, отримані в результаті випробувань в аеродинамічній трубці, були використані для розрахунку повітря, що викликається перепадом тисків і відповідних втрат тепла для повномасштабної будівлі при різних конфігураціях забудови. Отримані результати можуть служити основою для вибору проектувальниками альтернативних варіантів забудови в цілях зведення до мінімуму енергетичних втрат, викликаних вітром.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Перш ніж описати дане дослідження будуть корисні деякі теоретичні передумови. У вітровому потоці нижньої частини атмосфери відбуваються ефекти взаємодії сил тертя і в'язкості середовища. Поведінка вітру може бути описана за допомогою моделі прикордонного шару. Такий шар розвивається у радіусі кількох сотень метрів від поверхні землі. Профіль вітру в прикордонному шарі може бути досить добре описаний ступеневою функцією:

$$V_z = V_g \left(\frac{z}{h} \right)^{1/\alpha}, \quad (1)$$

де V_z - швидкість вітру на висоті z ;

V_g - швидкість вітру поза прикордонного шару;

h - висота прикордонного шару;

α - коефіцієнт, що описує шорсткість земної поверхні.

Індекс g обраний для подання вільного вітрового потоку. Цей вітер може бути представлений як модель "градієнта вітру" [7]. Велика шорсткість земної поверхні буде збільшувати висоту прикордонного шару і зменшувати значення α . Висота прикордонного шару для відкритої території може бути встановлена на висоті 275 м, у приміській зоні 365 м і в міському середовищі 460 м, відповідно з цим значення α будуть відповідати навколишньому середовищу, 7, 4,5 і 3. А показник ступеня прийме значення: 0,14, 0,22, 0,33. Показник ступеня, звичайно, значно спрощено, але дуже точний взаємозв'язок між формою земної поверхні та ступеневого закону в цьому випадку безглуздо. Для визначення природної вентиляції достатньо лише таких трьох варіантів розташування забудови.

Прості алгебраїчні перетворення дозволяють визначити приміські та міські швидкості вітру на основі метеорологічних даних, які зазвичай даються для відкритих територій. Подальше дослідження засноване на гіпотезі постійного градієнта швидкості вітру над приземним прикордонним шаром атмосфери. Беручи індекси 1 і 2, для цих двох різних середовищ, отримуємо наступне:

$$v_{g_1} = v_{g_2}, \quad (2)$$

$$\frac{v_{z_1}}{(z_1/h_1)^{1/\alpha_1}} = \frac{v_{z_2}}{(z_2/h_2)^{1/\alpha_2}}, \quad (3)$$

$$v_{z_2} = v_{z_1} \left(\frac{h_1}{z_1} \right)^{1/\alpha_1} \left(\frac{z_2}{h_2} \right)^{1/\alpha_2}. \quad (4)$$

Використовуючи значення h і α , наведені вище можна легко перейти з одного типу прикордонного шару в інший. Необхідно розкрити ще таке поняття - коефіцієнт тиску:

$$c_p = \frac{p - p_{ref}}{p_{ref}}, \quad (5)$$

$$p_{ref} = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2, \quad (6)$$

де p - вимірний тиск на поверхні будівлі;

p_{ref} - повний динамічний тиск;

ρ - щільність повітря.

Таке формулювання дозволяє порівняти результати різних досліджень, коли використовуються відносні значення.

І останнє необхідно сказати, що дослідження проходило для трьох різних видів забудови і розглянути цей випадок можна як "вуличні каньйони" при ортогональному напрямку вітрового потоку. Залежно від відносної відстані між будівлями, вихровий рух за ними може розвиватися повністю або частково, що викликає такі явища, як "перешкода, що розташована окремо" та "вихрові взаємодії" [8, 9]. Якщо будівлі розташовані щільно одна до одної, то це викликає явище стаціонарних вихорів і тоді пограничний шар формується над будівлями, тобто відбувається "ковзання потоку". Ефект окремих будинків відбувається у випадку, коли відстань між будівлями перевищує трьох висот самого будинку. Вітрові потоки формуються на основі вихрових рухів між будівлями при відстані від 1,5 до 3 висоти будівлі. (рис. 1).

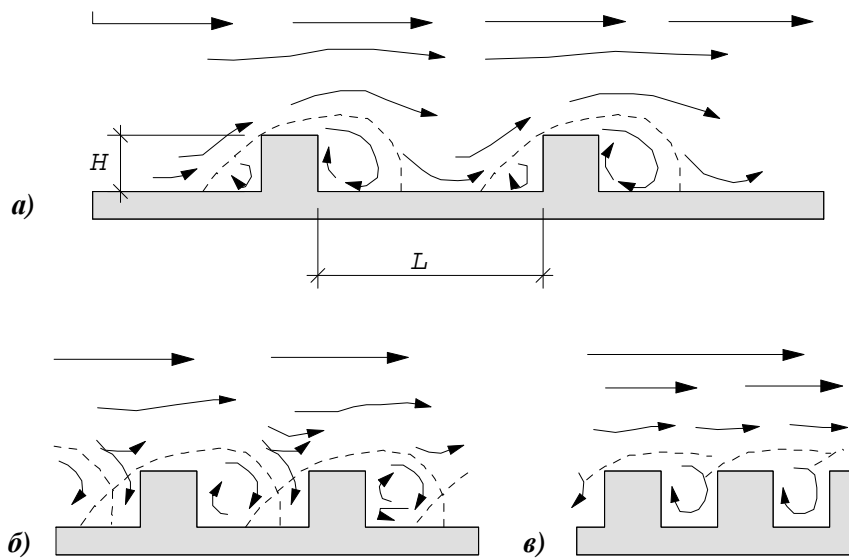


Рис. 1. Три типи формування потоків прикордонного шару в забудові при різних відстанях між будівлями: а) окремо стоять перешкоди; б) вихрові взаємодії; в) ковзання потоку.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводились у метеорологічній аеродинамічній трубі МАТ-1 Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Вона є прямооточного типу з довжиною робочої частини 4,8 м, шириною 1,0 м і висотою 0,7 м, максимальна швидкість потоку 20 м/с. Моделі будинків були встановлені на поворотний стіл діаметром 0,9 м, який розташовується у робочій секції на відстані 3,6 м по напрямку руху потоку від сопла аеродинамічної труби (рис. 2).

а)



б)

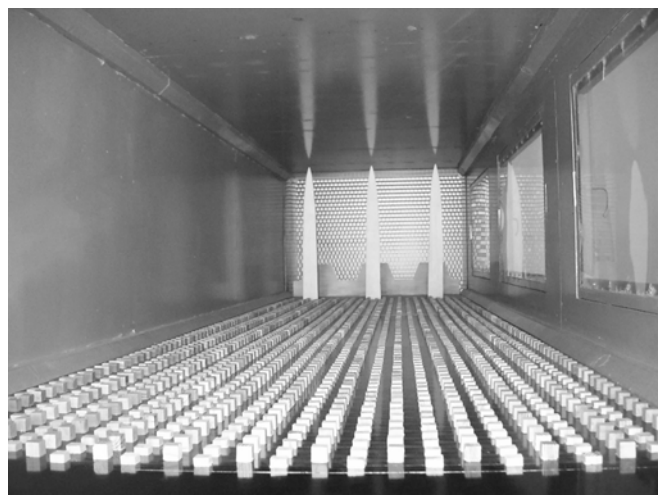


Рис. 2. Метеорологічна аеродинамічна труба МАТ-1: а) зовнішній вигляд; б) вид робочої частини.

Пограничний шар атмосфери був змодельований як для відкритої території за допомогою шпилів, кубічних шорсткостей і бар'єрів, розташованих на вході потоку в робочу частину труби. Масив кубічних елементів приблизно склав щільність 10%. Висота прикордонного шару складає 0,6 м, а показник ступеня зміни швидкості потоку по висоті - 0,14. Поздовжня інтенсивність турбулентності на рівні покрівлі моделей будинків склала 0,20, і поздовжній спектр потужності на тій же висоті відповідав повного спектру в 1:450. Моделі будинків були виготовлені в масштабі 1:300 за основу були взяті розміри звичайного п'ятиповерхового житлового будинку з плоскою покрівлею перших років масового будівництва. Модель будівлі, обладнана вимірювальними приладами, була виконана з плексигласу товщиною 3 мм і діаметром вимірювальної точки 0,3 мм, які розташовувалися по поверхні моделі, інші будівлі були з дерева і без вимірювальних приладів. Місця розташування вимірювальних точок були вибрані таким чином, щоб була можливість адекватного усереднювання значень. Покрівля масштабної моделі будівлі була обладнана також макетом виходів каналів природної вентиляції. Схема та параметри конфігурації масштабної забудови представлені на рис. 3.

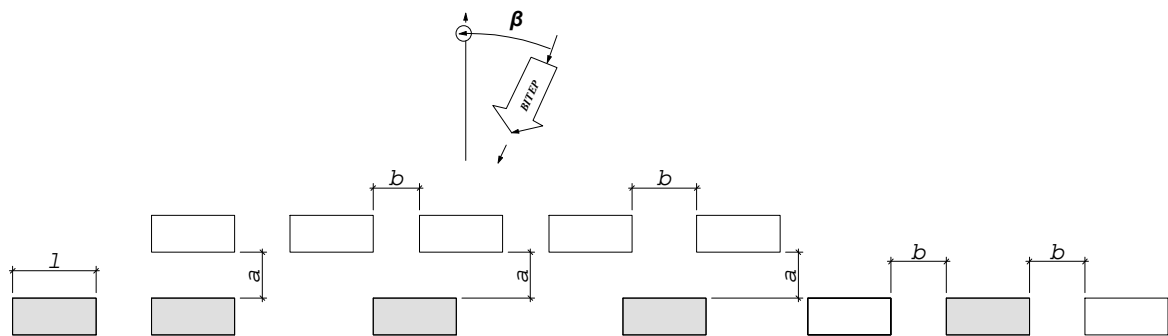


Рис. 3. Конфігурації досліджуваної моделі.

Процес вимірювання вітрового тиску, перетворення його в електричний сигнал, обробка й відображення отриманих результатів автоматизований з використанням електронної системи розробленої у Донбаській національній академії будівництва і архітектури.

До складу електронної системи входять: пневмокомутатор із датчиками тиску, високопродуктивний комп'ютер з багатофункціональним блоком "Овен", який забезпечує перетворення аналогових сигналів в цифрові, приймає синхросигнали та створює керуючі сигнали, а також відповідна комутаційна апаратура та джерела живлення.

До складу електронної системи входять датчики миттєвого тиску фірми "Motorola" (США). Методика проведення досліджень передбачала синхронне вимірювання тиску всіма датчиками. З імовірністю 90% випадкова помилка миттєвого значення коефіцієнта тиску не перевищувала $\varepsilon_{Cp} = 0,02$.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Різниця тисків, створена вітром між огорожуючих конструкцій і внутрішнім простором будівлі, призводить до неконтрольованої вентиляції через проникнення повітря крізь тріщини і порожнечі. Пов'язані з цим втрати тепла можуть становити більшу частину від загального споживання енергії, особливо у будинках з природною вентиляцією. У досліджуваних випадках ступінь повітрообміну, n , часто значно вище, ніж мінімально необхідне значення для підтримки якості повітря в приміщенні, яке стане небезпечним для здоров'я людини і не спровокує температурний дискомфорт. Стандартним є $n = 0,5$ ступінь обміну повітря в годину, що відповідає $n = 3,0$, яке встановлюється експериментальним тиском в 50 Па. Перепад тисків, що викликаний вітром, можна виразити за формулою:

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2 c_p - p, \quad (7)$$

а тиск, який викликаний тепловим перепадом, визначається за формулою:

$$\Delta p_T = -273 \rho g z \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (8)$$

де T_e - температура повітря зовні будівлі;

T_i - температура повітря всередині будівлі.

Швидкість інфільтрації може бути розрахована як:

$$I = A_l \frac{1}{h_b} \int_0^{h_b} \left\{ \frac{2}{\rho} (\Delta p_w + \Delta p_T) \right\}^{0,5} dz, \quad (9)$$

де A_l - ефективна площа всіх пор і щільностей, яка залежить від характеру, розмірів і отворів протікання повітря через огорожувальні конструкції;

h_b - висота будівлі, що випробовується.

Розрахункові впливи швидкості вітру і різниці температур ($\Delta T = T_i - T_e$) на швидкість фільтрації повітря показані на рис. 4.

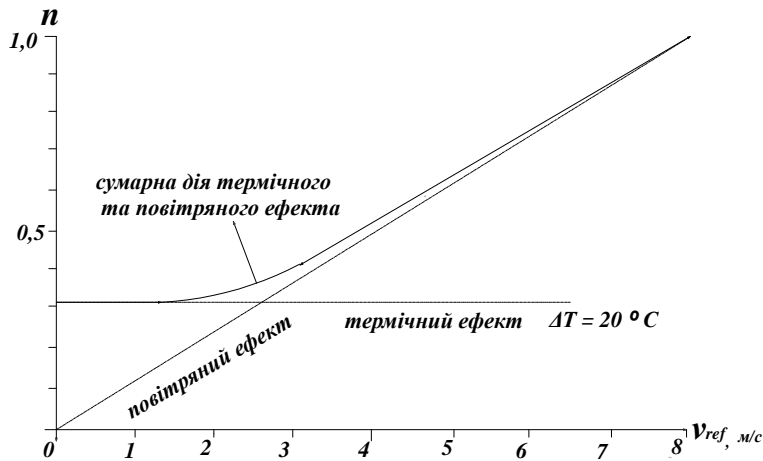


Рис. 4. Вплив швидкості вітру і різниці температур на повітрообмін.

Відповідні втрати тепла визначаються за формулою:

$$Q = I\rho c\Delta T, \quad (10)$$

де c - питома теплоємність повітря.

Коефіцієнти тиску вітру, отримані в результаті випробувань у аеродинамічній трубці, були використані для розрахунку ступеня обміну повітря і пов'язаних з ним втрат тепла для натурної будівлі. Для розрахунків було прийнято, що витік повітря рівномірно розподіляється по всій поверхні будівлі з ефективною площею фільтрації повітря $A_f = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, що відповідає ступеню фільтрації $n = 0,35$ при $\Delta T = 20^\circ\text{C}$, $v_{ref} < 1 \text{ м/с}$ і щільної забудови. Крім того передбачається, що середня витрата фільтрації повітря через отвори визначається як середня різниця тисків Δc_p на конструкції. Це припущення прийнято, тому що є прямий взаємозв'язок між швидкістю потоку і перепадом тиску для встановленої течії. Зовнішнім впливом турбулентності можна знехтувати з причини появи безлічі помилок через свою нестабільність.

Розрахунок теплових втрат був зроблений для $0 \leq v_{ref} \leq 8 \text{ м/с}$ і $5 \leq \Delta T \leq 30^\circ\text{C}$:

- частка повітрообміну, n , і пов'язані з нею теплові втрати, Q , (для повномасштабного) окремого будинку (n_e , Q_e) і розташованого в оточенні будинків (n_s , Q_s);

- різниця теплових втрат в результаті дії навколишніх будинків $\Delta Q = Q_e - Q_s$;

- відносне зменшення теплових втрат $r_Q = \Delta Q / Q_e$.

Вплив на ΔQ різних швидкостей і щільності забудови представлений на рис. 5 при напрямку вітрового потоку $\beta = 0^\circ$. При всіх швидкостях вітрового

потоків і відстані між будівлями від 1,5 до 2 висот будівлі зниження теплових втрат приблизно на 50%.

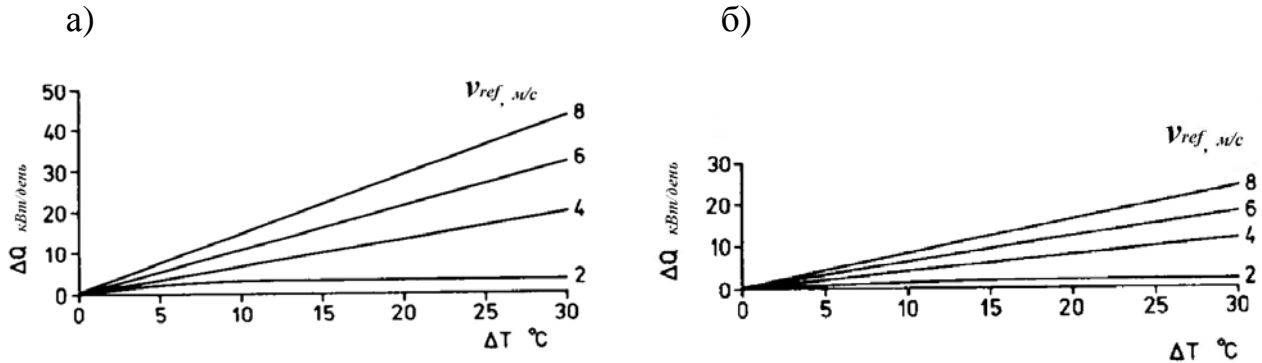


Рис. 5. Розрахунки теплових втрат при різних відстанях між будівлями і швидкості вітру: а) відстань 1,0 висоти; б) відстань 2,0 висоти.

Вплив кількості рядів оточення випробуваної будівлі впливає на теплові втрати, а зміна відстані між рядами менш помітна. В той час, як перший ряд впливає на зменшення теплових втрат, додавання ще одного ряду будинків має лише незначний вплив при всіх напрямках вітру. Спільний вплив швидкості вітру і різниці температур на ΔQ для різних конфігурацій моделі і напрямків вітру може бути більш чітко продемонстровано, якщо відносне зменшення теплових втрат, $r_Q = \Delta Q / Q_e$, представити у вигляді функції від числа Фруда:

$$Fr = \frac{v_{ref}^2 T_e}{2gz_T \Delta T}, \quad (11)$$

де z_T - висота термічно нейтрального рівня.

На рисунку 6 представлено вплив напрямку вітру на зменшення теплових втрат, r_{Qm} , $Fr = 22,5$, що відповідає $v_{ref} = 6$ м/с і $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

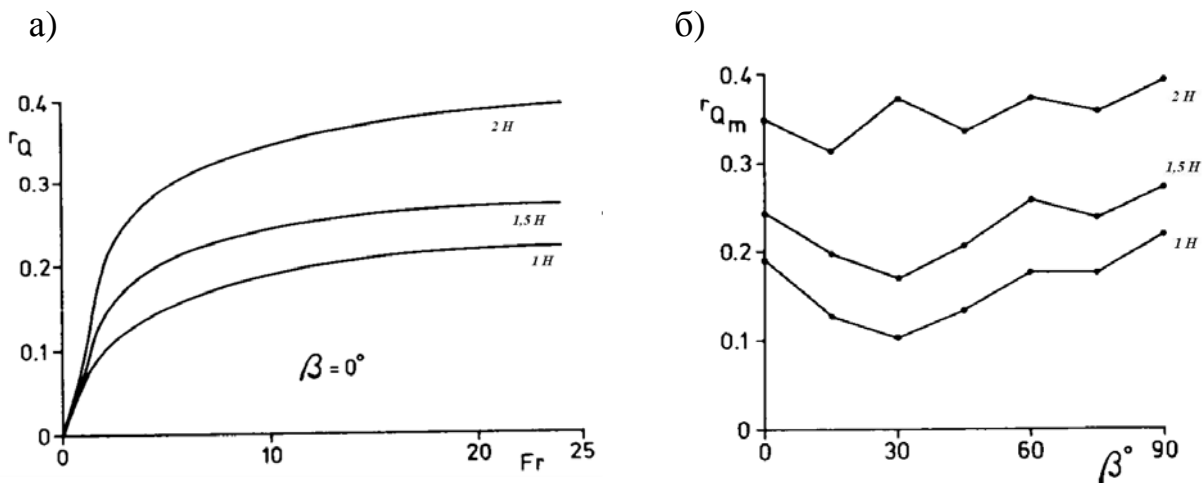


Рис. 6. Відносне зменшення теплових втрат: а) при зміні кількості Fr ; б) при зміні напрямку вітрового потоку.

Найбільше зниження теплових втрат отримано при відстані між будівлями у одну висоту при числі Fr близько 35% і доволі не залежно від напрямку вітру. На вентиляційні теплові втрати доводиться 30% від загального споживання енергії п'ятиповерхового багатоквартирного житлового будинку перших років масового будівництва, і правильне, з точки зору економії ресурсів, компонування забудови призводить до зниження енергоспоживання такого будинку від 10 до 12%.

5. ВИСНОВКИ

Дане дослідження спрямоване на взаємозв'язок тиску вітру на поверхнях будівлі з природною вентиляцією. Це було зроблено шляхом фізичного моделювання в аеродинамічній трубі, що дозволило емітувати вітрові потоки всередині забудови і відтворити горизонтальні і вертикальні градієнти коефіцієнтів тиску на будівлі. Дослідження проводилося з урахуванням вертикального розподілу швидкості вітру і турбулентності ідентичне приземному прикордонного шару атмосфери, і при декількох конфігураціях моделі (окремо розташованої будівлі і оточеної забудовою). Із великої кількості даних, отриманих у результаті випробувань був проведений відбір, щоб проілюструвати деякі характерні особливості впливу навколишніх будинків на зміни коефіцієнтів розподілу тиску. Загальний висновок полягає у тому, що тиск вітру практично постійний на будь-якій вертикальній секції на стінах будівлі при всіх напрямках потоку і конфігурацій моделей за винятком навітряної сторони і фронтів стін при окремому розташуванні моделі. Розподіл тиску вітру сильно залежить від навколишніх будинків і щільності забудови.

Проведені експериментальні дослідження вказують на необхідність ретельного проектування нових будівель, що будуть вбудовуватись в існуючі мікрорайони, що може привести до збільшення енергоспоживання будівлями, які вже побудовані та експлуатуються, а також можуть погіршити режими роботи і ефективності вентиляції з природним спонуканням руху повітря, особливо у вентиляційних каналах.

Література

1. Pillai S.S., Yoshie R. Experimental and numerical studies on convective heat transfer from various urban canopy configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106, 2012.- pp. 447-454.
2. Hatzidimoula E., Poulios K. Natural ventilation of indoor spaces while minimizing heat losses: Theoretical and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 40, 2008. pp. 621-626.
3. Emmel M.G., Abadie M.O. Nathan Mendes. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings*, 39, 2007. pp. 335-342.

4. Zaki S.A., Hagishima A., Tanimoto J. Experimental study of wind-induced ventilation in urban building of cube arrays with various layouts. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 103, 2012.- pp. 31-40.

5. Defraeye T., Carmeliet J. A methodology to assess the influence of local wind conditions and building orientation on the convective heat transfer at building surfaces. *Environmental Modelling & Software*, 25, 2010. pp. 1813-1824.

6. Chenga H., Haydena P., Robins A.G., Castro I.P. Flow over cube arrays of different packing densities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 2007.- pp. 715-740.

7. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения. – Донецк: Норд-Пресс, 2009.- 168с.

8. Горохов Е.В., Васылев В.Н., Кузнецов С.Г., Лозинский Э.А. Уплотнение существующей жилой застройки высотным зданием с учетом ветрового подпора на вентиляционные системы низких зданий. *Металлические конструкции*. Том 18, Номер 1, 2012. С. 49-60.

9. Кузнецов С.Г., Бутова А.П. Експериментальне дослідження обтікання вітром лінійної забудови. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. Збірник серія: технічні науки та архітектура* – Харків: видавництво ХНАМГ. – 2012. – вип. 103. – С. 182-188.

Аннотация

Интерес к естественной вентиляции возрастает в строительной отрасли из-за ряда экологических проблем, повышения требований к комфорту проживания и экономических критериев. Целью данного исследования является изучение вызванной ветром естественной вентиляции, а в частности поведение ветра в плотной застройке, параметров изменения потоков внутри и снаружи зданий. Уникальностью исследования является работа с вертикальными и горизонтальными градиентами коэффициентов давления. Полученные результаты представляют, насколько важны горизонтальные градиенты в понимании потока воздуха. Также обсуждается управление вентиляционным потенциалом городскими ветрами в условиях устойчивого развития архитектуры.

Ключевые слова: тепловые потери, естественная вентиляция, ветровое давление, аэродинамическая труба с пограничным слоем, ветровое влияние

Annotation

Interest to natural ventilation increases in a build industry from the row of ecological problems, increase of requirements to the comfort of residence and economic criteria. The purpose of this research is a study of the natural ventilation caused by wind, and in particular conduct of wind in dense building, parameters of change of streams inside-outside of buildings. A research unicity is work with the vertical and horizontal gradients of coefficients of pressure. The got results present, as far as horizontal gradients are important in understanding of blast. Also a management comes into question a vent potential by city winds in the conditions of steady development of architecture.

Keywords: thermal losses, natural ventilation, wind pressure, wind-channel with a boundary layer, wind influence.