

## ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРООБМІНУ ТА ПОВІТРОРОЗПОДІЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ

*Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна*

*Розглянуто вплив організації повітрообміну і повітророзподілення на енергоефективність систем кондиціонування повітря та вентиляції. Запропоновано застосування напрямляючих щитів в приміщеннях зі складною геометрією для зміни напрямку і витрати припливних струмин.*

**Постановка проблеми.** Головним напрямком енергоефективного виконання будівель та їх експлуатації є комплексний підхід. Він передбачає фахове визначення енергоефективності всіх інженерних систем будівлі при будь-якому їх конструктивному виконанні (системи опалення, гарячого водопостачання, вентиляції, кондиціонування, освітлення) за певних характеристик теплової оболонки будівлі. Усі ці складові єдиного ланцюга з вимогами до його інспектування на сьогодні унормовані європейськими нормами [1...9]. Зазначений підхід прийнято до реалізації і в Україні. Однак, на даний час Міненергобудом прийнято норми, які охоплюють питання енергоефективності як при проектуванні, так і при експлуатації лише систем опалення. Що стосується енергоефективності при проектуванні та експлуатації систем вентиляції та кондиціонування повітря, то ці питання неунормовані та підлягають опрацюванню.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [10] на основі системного підходу до систем кондиціонування (СКП) та вентиляції (СВ) показано, що підсистема організації повітрообміну та повітророзподілення принципово відрізняються від інших підсистем СКП та СВ тим, що безпосередньо формує параметри повітряного середовища у приміщенні. Це єдина підсистема, яка одночасно впливає на всі техніко-економічні показники (витрату теплоти, холоду, повітря, води на його зволоження) та експлуатаційно-енергетичні показники (витрату електроенергії, матеріалів, надійність роботи та інші).

Комплексний підхід до оцінки підсистеми організації повітрообміну і повітророзподілення застосовано А.А. Римкевичем [11] та Т.А. Верховою [12]. Сучасні схеми і засоби повітророзподілення, сучасні методи розрахунку дозволяють вибирати такі рішення [13, 14], які забезпечують нормативні параметри повітряного середовища в робочій зоні приміщень різного призначення та конструкції. При цьому для одних і тих самих умов можливо запропонувати декілька рішень, що відрізняються техніко-економічними показниками. Для вибору оптимального варіанту необхідна їх оцінка та порівняння на базі обґрунтованого комплексу показників. Г.М. Позінім [15] було запропоновано метод комплексної оцінки ефективності систем

повітророзподілення за допомогою коефіцієнта повітрообміну  $K_l$ , що являє собою безрозмірний симплекс, що пов'язує температури повітря – витяжного  $t_l$ , припливного  $t_{in}$  та робочої зони  $t_{wz}$ :

$$K_l = \frac{t_l - t_{in}}{t_{wz} - t_{in}} = \frac{\Delta t_l}{\Delta t_{wz}}. \quad (1)$$

Чим більший коефіцієнт  $K_l$  - тим раціональніше організовано повітрообмін в приміщенні. Співвідношення для знаходження кількості припливного повітря з врахуванням коефіцієнта повітрообміну має вигляд:

$$L_{in} = L_{wz} + \frac{Q - c \cdot L_{wz} \cdot \Delta t_{wz}}{c \cdot K_l \cdot \Delta t_{wz}} = L_{wz} + \frac{\bar{Q} - L_{wz}}{K_l}, \quad (2)$$

де  $\bar{Q} = \frac{Q}{c \cdot \Delta t_{wz}}$  - відношення надлишків повної до надлишків явної

теплоти.

Значення коефіцієнта  $K_l$  безпосередньо впливає на витрати тепла та холоду в приміщенні. Так для приміщень, що обслуговуються системами з рециркуляцією повітря, в яких мають місце тепловиділення, при нагріві припливного повітря відношення витрат теплоти при  $K_l \neq 1$  ( $Q'_T$ ) до витрат теплоти при  $K_l = 1$  ( $Q_T$ ) визначається за виразом:

$$\frac{Q'_T}{Q_T} = 1 + \frac{\frac{G_H^{\min}}{G_0} Q_{надл} \left(1 - \frac{1}{K_l}\right)}{Q_T}, \quad (3)$$

де  $G_H^{\min}$  - мінімально необхідна витрата зовнішнього повітря за санітарними нормами або за умов компенсації витяжної вентиляції;  $Q_{надл}$  - теплонадлишки в приміщенні;  $G_0$  - витрата повітря, що подається в приміщення.

Витрата холоду в залежності від коефіцієнта повітрообміну  $K_l$  має вигляд:

$$\frac{Q'_X}{Q_X} = 1 + \frac{\frac{G_{Flex}^{\min}}{G_0} Q_{надл} \left(\frac{1}{K_l} - 1\right)}{Q_X}, \quad (4)$$

де  $Q'_X$  - витрата холоду при  $K_l \neq 1$ ;  $Q_X$  - витрата холоду при  $K_l = 1$ .

**Постановка задачі.** В даній статті розглянуто метод комплексної оцінки енергоефективності схем організації повітрообміну за допомогою коефіцієнта повітрообміну  $K_l$  для приміщень зі складною геометрією.

**Основна частина.** Коефіцієнт повітрообміну  $K_l$  визначається експериментально або теоретично, ґрунтуючись на наближеному математичному описанні тепло-повітряних процесів у вентильованих приміщеннях.

Для теоретичного способу визначення коефіцієнта  $K_l$  застосовують наближені математичні моделі, що складаються з систем рівнянь збереження енергії, витрати та тиску. Розробка математичної моделі включає в себе чотири етапи:

- 1) виявлення розрахункової моделі теплообміну;
- 2) складання системи рівнянь збереження тепла і маси;
- 3) приведення системи балансових рівнянь до розрахункового вигляду;
- 4) постановка конкретної задачі та рішення системи рівнянь.

В розрахунковій схемі з необхідним ступенем деталізації виявляються всі характерні об'єми та поверхні теплообміну, враховуються потоки теплоти та маси, взаємодія яких формує мікроклімат в приміщенні. Для всіх характерних об'ємів та поверхонь у відповідності до розрахункової схеми складаються рівняння збереження тепла та маси. Сукупність співвідношень тепло-повітряних балансів утворює систему рівнянь, що являє собою математичну модель тепло-повітряних процесів у вентиляваному приміщенні. В результаті вирішення даної системи знаходяться шукані значення потоків тепла, маси та значення коефіцієнта повітрообміну  $K_l$ .

В разі, якщо система балансових рівнянь є доволі складною, доцільно будувати номограми, графіки, таблиці та застосовувати ЕОМ.

Розглянемо значення коефіцієнтів повітрообміну  $K_l$  для схеми повітророзподілення зосередженими горизонтальними струминами та схеми з використанням напрямляючих щитів для приміщення, розділеного на зони.

Робоча зона приміщення розділена на дві зони (зони I, II), в яких необхідно підтримувати нормативне значення температури  $t_{wz}$  (Рис.1). Припливне повітря з температурою  $t_{in}$  в кількості  $L_{in}$  подається горизонтальною струминою на відмітці  $h < 0,85 * H_n$ , де  $H_n$  – висота приміщення. В другому критичному перерізі струмина має найбільшу витрату  $L_{fl}$ . Температура повітря в струміні за другим критичним перерізом не змінюється і дорівнює  $t_{fl}$ . Видалення повітря в кількості  $L_l = L_{in}$  відбувається з верхньої зони. Температура витяжного повітря  $t_l$ . Тепловиділення в зонах I та II ( $Q_{wzI}$  та  $Q_{wzII}$ ) в даному прикладі прийнято рівними:

$$Q_{wzI} = Q_{wzII}, \quad Q_{wzI} + Q_{wzII} = Q_{wz}. \quad (5)$$

У верхній зоні приміщення виділяється теплота в кількості  $Q_{uz}$ .

При складанні балансових рівнянь для випадку зосередженої подачі повітря в приміщенні, розділеному на дві зони, виділяються 4 характерні об'єми (Рис.1.): I, II – перша та друга робочі зони (зони зворотнього току, що розташовані нижче струмини); III – припливна струмина; IV – верхня зона (зона зворотнього току над струминою).

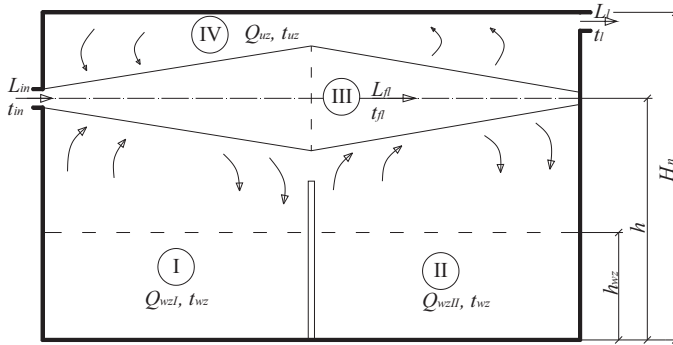


Рис.1. Розрахункова схема приміщення для визначення коефіцієнта ефективності повітрообміну при схемі повітророзподілення зосередженими горизонтальними струминами

Вирішуючи систему балансових рівнянь та застосовуючи формули переходу, отримано значення коефіцієнта повітрообміну:

$$K_l = \frac{0,5 \cdot \bar{L}_{fl}}{2 \cdot \bar{Q}_{wzI} + 2 \cdot \bar{Q}_{wzII} + 0,5 \cdot \bar{L}_{fl} - 1}, \quad (6)$$

де  $\bar{L}_{fl} = \frac{L_{fl}}{L_{in}}$ ,  $\bar{Q}_{wzI} = \frac{Q_{wzI}}{Q}$ ,  $\bar{Q}_{wzII} = \frac{Q_{wzII}}{Q}$ ,  $Q = Q_{wzI} + Q_{wzII} + Q_{uz}$ .

Для визначення коефіцієнта ефективності повітрообміну схеми з використанням напрямляючих щитів використовуються вихідні дані, аналогічні попередньому прикладу (Рис.2.). Над першою та другою робочими зонами розташовано напрямляючі щити. На вході в першу та другу робочі зони струмина має параметри  $L_{flI}$ ,  $t_{flI}$  та  $L_{flII}$ ,  $t_{flII}$ . Площа струмини на вході в першу та другу робочі зони дорівнює  $F_{flI}$  та  $F_{flII}$  відповідно.

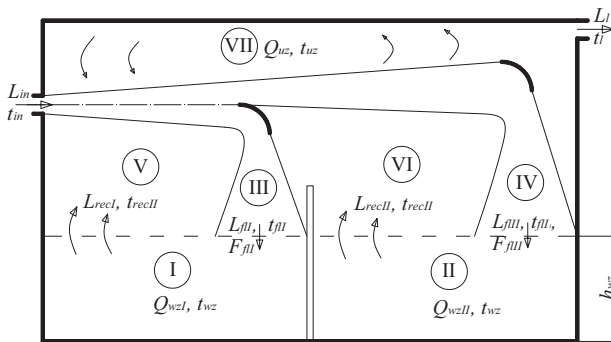


Рис.2. Розрахункова схема для визначення коефіцієнта ефективності повітрообміну приміщення з напрямляючими щитами

При складанні балансових рівнянь виділяються сім характерних об'ємів (Рис.2.): I, II – перша та друга робочі зони; III, IV – припливні струмини до

верхнього рівня робочої зони; V, VI – зони зворотнього току; VII – верхня зона (зона зворотнього току над струминою).

Вирішуючи систему балансових рівнянь та застосовуючи формули переходу, отримано значення коефіцієнту повітрообміну:

$$K_l = \frac{\bar{L}_{\text{пл}} + \bar{L}_{\text{плII}}}{\bar{L}_{\text{пл}} + \bar{L}_{\text{плII}} + \bar{Q}_{\text{wzI}} \left(1 - \frac{F_{\text{пл}}}{F_n}\right) + \bar{Q}_{\text{wzII}} \left(1 - \frac{F_{\text{плII}}}{F_n}\right) - 1}, \quad (7)$$

де  $\bar{L}_{\text{пл}} = \frac{L_{\text{пл}}}{L_{\text{in}}}$ ,  $\bar{L}_{\text{плII}} = \frac{L_{\text{плII}}}{L_{\text{in}}}$ ,  $\bar{Q}_{\text{wzI}} = \frac{Q_{\text{wzI}}}{Q}$ ,  $\bar{Q}_{\text{wzII}} = \frac{Q_{\text{wzII}}}{Q}$ ,  $Q = Q_{\text{wzI}} + Q_{\text{wzII}} + Q_{\text{uz}}$ .

Складено графіки залежностей коефіцієнта повітрообміну від відношення теплонадходжень в робочій зоні до загальних теплонадходжень в приміщенні  $Q_{\text{wz}}/Q$  (Рис. 3.) та від відношення витрати струмины до витрати припливного повітря  $L_{\text{пл}}/L_{\text{in}}$  (Рис. 4).

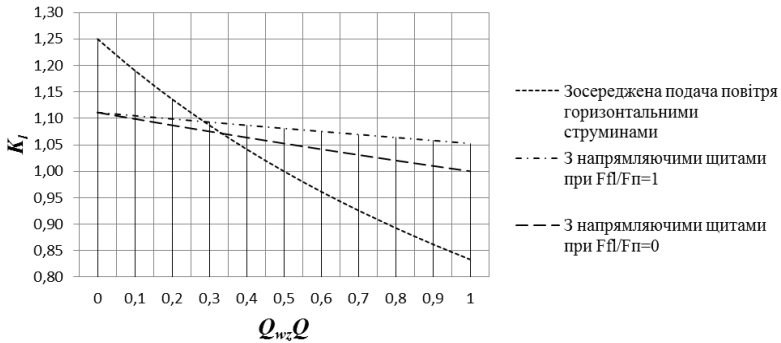


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів ефективності повітрообміну від співвідношення теплонадходжень в приміщенні

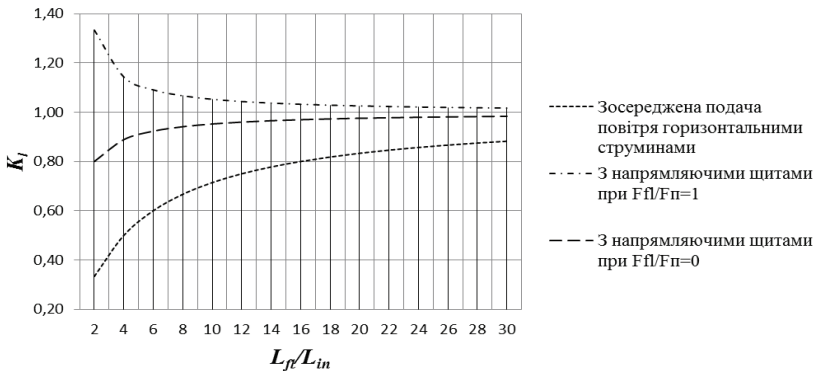


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів ефективності повітрообміну від співвідношення витрат повітря в приміщенні

Отримані результати засвідчують, що у випадку, коли теплонадходження в робочій зоні перевищують теплонадходження у верхній зоні приміщення ( $Q_{wz}/Q$ )>0,5, коефіцієнт повітрообміну для зосередженої подачі повітря  $K_f < 1$ , а для схеми з напрямляючими щитами  $K_f > 1$ . Враховуючи те, що в більшості приміщень I-го класу теплонадходження до робочої зони значно перевищують теплонадходження до верхньої зони  $Q_{wz} \gg Q_{uz}$ , стає очевидною перевага схеми з напрямляючими щитами над традиційною схемою з зосередженою подачею повітря. Найбільше значення коефіцієнт повітрообміну  $K_f = 1,33$  має при схемі повітророзподілення з напрямляючими щитами за умов:  $L_{pl}/L_{in} = 2$  та  $F_{pl}/F_n = 1$ .

Для оцінки тепло-повітряних процесів у вентилятованих приміщеннях зі складною геометрією доцільно використовувати програмні продукти на основі методів обчислювальної гідродинаміки – CFD (Computational Fluid Dynamics). Дані програмні продукти виконують розрахунок течій рідин і газів шляхом чисельного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності, що описують найбільш загальний випадок руху цих середовищ (для турбулентних течій - рівнянь Рейнольдса).

В програмному продукті SolidWorks 2012 було розроблено математичну модель процесів повітрообміну з застосуванням напрямляючих щитів у приміщенні, розбитому на дві зони. Візуалізацію розрахунків даної математичної моделі наведено на Рис.5.

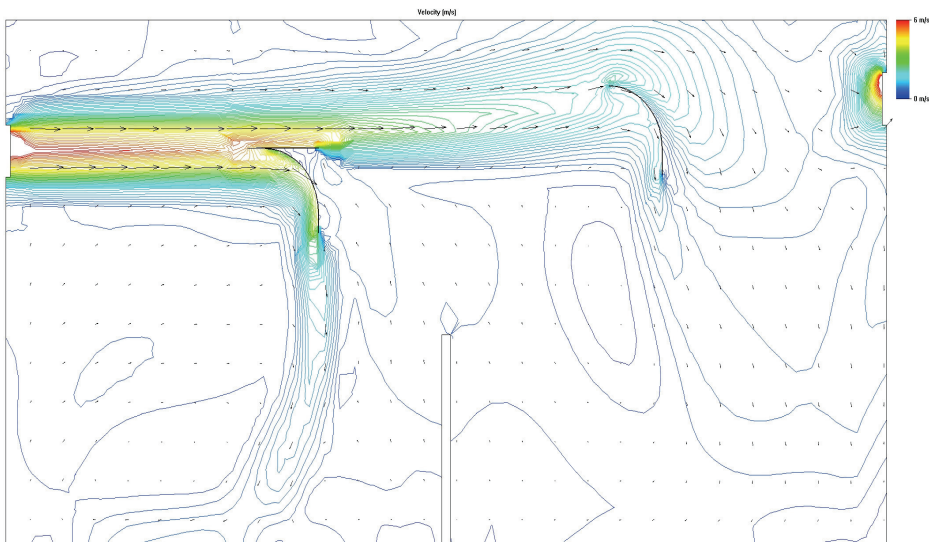


Рис. 5. Візуалізація процесів організації повітрообміну приміщення з застосуванням напрямляючих щитів

Аналіз результатів математичного моделювання в програмному продукті SolidWorks 2012 засвідчує повну відповідність обраної розрахункової схеми до

математичної моделі процесів повітрообміну в приміщеннях зі складною геометрією.

**Висновки.** Загальна енергоефективність систем СКП та СВ значною мірою залежить від ефективності підсистем організації повітрообміну та повітророзподілення. Аналіз отриманих даних засвідчує, що схема повітророзподілення з застосуванням напрямляючих щитів навіть за найнесприятливіших умов ( $F_{pl}/F_n=0$ ) буде більш ефективною за традиційну схему з зосередженою подачею повітря горизонтальними струминами: значення коефіцієнта ефективності повітрообміну для схеми з напрямляючими щитами знаходиться в межах  $K_f=0,8\dots 1,33$ , для схеми з зосередженою подачею повітря  $K_f=0,33\dots 0,88$ .

## Література

1. *CEN/TR 15615* Explanation of the general relationship between various European standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Umbrella Document.

2. *EN 15217* Energy performance of buildings – Methods for expressing energy performance and energy certification of buildings.

3. *EN 14336:2004* Heating systems in buildings – Installation and commissioning of water-based heating systems.

4. *EN 15316-3-1:2007* Heating systems in buildings– Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 3-1: Domestic hot water systems, characterisation of needs (tapping requirements).

5. *EN 15316-3-2:2007* Heating systems in buildings– Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 3-2: Domestic hot water systems, distribution.

6. *EN 15316-4-5:2007* Heating systems in buildings– Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 4-5: Space heating generation systems, the performance and quality of district heating and large volume systems.

7. *EN 834:1994* Heat cost allocators for the determination of the consumption of room heating radiators – Appliances with electrical energy supply.

8. *EN 15239:2007* Ventilation for buildings – Energy performance of buildings – Guidelines for inspection of ventilation systems

9. *EN 15240:2007* Ventilation for buildings – Energy performance of buildings – Guidelines for inspection of airconditioning systems

10. *Сотников А.Г.* Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции / Теория, техника и проектирование на рубеже столетий / В двух томах. Том II, г. 2, С.-Петербург, 2007г. - 512с.

11. *Римкевич А.А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха./Изд.1-е. М.: Стройиздат, 1990г. - 300 с. Изд 2-е, доп. И испр. АВОК – С.-З., 2003г. - 271 с.

12. *Верхова Т.А.* Исследование методов комплексной оценки конструируемых способов воздухораспределения для помещений небольшой высоты./Автореферат кандидатской диссертации. Л.: ЛТИХП, 1980г. – 23с.

13. *Довгалоук В.Б., Милейковський В.О.* Ефективність організації повітрообміну в тепло напружених приміщеннях у стиснутих умовах, Будівництво України: Науково-виробничий журнал №3, 2007г. – с. 36-39.

14. *Довгалоук В.Б., Рудзинський В.О., Наконечний В.І.* Підвищення ефективності повітрообміну за допомогою напрямляючих щитів у приміщеннях зі змінними об'ємно-планувальними рішеннями. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка»/Випуск №89. – К.: КНУБА, 2012р. – с. 166-172.

15. *Позин Г. М.* Принципы разработки приближенной математической модели тепловоздушных процессов в вентилируемых помещениях – Известия вузов. Строительство и архитектура. 1980, № 11. – с. 122-127.

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУХООБМЕНА И ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ**

*В. Б. Довгалоук, В. О. Рудзинский*

Рассмотрено влияние организации воздухообмена и воздухораспределения на энергоэффективность систем кондиционирования воздуха и вентиляции. Предложено применение направляющих щитов в помещениях со сложной геометрией для изменения направления и расхода приточных струй.

## **ASSESS EFFICIENCY OF AIR EXCHANGE AND AIR DISTRIBUTION FOR SPACES WITH COMPLEX GEOMETRY**

*V.B. Dovgalyuk, V.O. Rudzinskiy*

The influence of air exchange and air distribution on the energy efficiency of air conditioning and ventilation systems is considered. Proposed use of the guiding shields for spaces with complex geometry for changing the direction and flow rate of air jets.