

regard for steam condensation. Comparison condensing and traditional boilers has been performed on the basis of conventional efficiency. There was analysed the influence of heat losses with combustion products on condensing boilers efficiency. The possibilities of full use of the higher heating value were discussed. There were selected the factors favoring a high efficiency of condensing boilers.

**Keywords:** thermal balance, condensing boilers, conventional efficiency, high efficiency.

1. Zhovmir N. M. Nizkotemperaturnyye rezhimy sistem otopleniya kak predposylka effektivnogo primeneniya kondensatsionnykh kotlov i teplovykh nasosov. // Promyshlennaya teplotekhnika. 2008. T30, №5. P. 62–68.

2. Zhovmir N. M. Ekonomiya topliva pri teplovy izolyatsii zdaniy s perekhodom k primeneniyu kondensatsionnykh otopitel'nykh kotlov. // Promyshlennaya teplotekhnika. 2009. T31, №3. P. 84–90.

3. Raysh M. Polnoye ispol'zovaniye teploty sgoraniya topliva v promyshlennykh kotel'nykh. // Akva – Term. 2008. №3(43). P. 20–24.

4. ECBCS Annex 49. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. [Elektronnyy resurs] // Rezhim dostupa – www.annex49.com.

5. Kudelya P. P., Barabash V. P. Opredeleniye kolichestva kondensata, vydelyayemogo iz produktov sgoraniya v kondensatsionnykh kotlakh. // Nova tema. 2012. №1. P. 52–54.

6. Teplovy raschet kotlov. Normativnyy metod. NPO TSKTI, SPb, 1998.

7. Kudelya P. P., Barabash V. P. Energeticheskaya effektivnost' kondensatsionnykh kotlov. // Nova tema. 2012. №2. P. 55–58.

8. Ber G. D. Tekhnicheskaya termodinamika. M.: Mir, 1977.

Надійшла 18.02.2014

Received 18.02.2014

УДК 662.963

М.Р. Котенко; В.І. Дешко, д-р техн. наук, професор  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІНУ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ

*Вентильовані фасади можуть бути використані у випадках реконструкції існуючих будівель і будівлі нових споруд для поліпшення як теплових характеристик будівель, так і архітектури. Перевагами вентильованих фасадів протягом літа є зниження теплового навантаження у зв'язку з комбінацією ефектів від затінення внутрішнього фасаду та наявністю повітряного потоку, викликаного природньою конвекцією в повітряному каналі. Основні складові під час оцінки ефективності вентильованого фасаду є вимога динамічного аналізу вентильованого повітроводу і точного знання коефіцієнтів тепловіддачі, факторів тертя і теплофізичних властивостей матеріалів. Для дослідження теплової поведінки вентильованого фасаду було використане програмне забезпечення ANSYS Fluent. Метою даного дослідження є висвітлення моделювання фасадів здатних забезпечити енергоефективну експлуатацію, як у випадку природньої так і вимушеної конвекції, викликані дією вентилятора.*

**Ключові слова:** вентильований фасад, математична модель, природня конвекція, вимушена конвекція.

**Вступ.** Вентильований фасад являє собою систему, що складається з зовнішнього фасаду, структури прикріпленої до поверхні стінки будівлі, ізоляційного матеріалу і повітряного зазору між зовнішнім фасадом та ізоляційним матеріалом. Повітряний потік всередині вентильованого каналу, викликаний ефектом плавучості, забирає теплове навантаження за допомогою природньої конвекції. Енергетичний аналіз вентильованого фасаду є важким через наступні фактори: загальна нестача даних, пов'язаних з вентильованими фасадами; відсутність програмних засобів, які можуть повністю оцінити термічну поведінку провітрюваного непрозорого фасаду. Європейська директива щодо енергетичних характеристик будівель (Директива 2002/91/ЄС) фокусує свою увагу на тому, що системи кондиціонування стали дуже поширеними, зокрема в країнах Південної Європи. Це створює значні проблеми в пікові навантаження; влітку в Італії потужність, необхідна під час літнього піку дорівнює навантаженням під час зимових піків. Така ситуація може повторитись у південних областях України в

майбутньому. За Ciampi, M. Solar Energy, 2003 енергозбереження у вентилязованих фасадах збільшується, при збільшенні інтенсивності сонячного випромінювання. Отже задля дослідження даного аспекту необхідне порівняння термодинамічної поведінки вентилязованих фасадів при різних рівнях сонячного випромінювання. Крім цього оцінка вентилязованих фасадів вимагає динамічного аналізу вентилязованого повітропроводу і точне знання коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнти тертя і теплофізичні властивості матеріалів. Невизначені знання коефіцієнтів тепловіддачі і втрати тепла всередині повітряного каналу можуть бути нівельовані надійністю використання складних обчислювальних методів, як, наприклад, обчислювальна гідродинаміка (Computational Fluid Dynamics).

**Мета та завдання.** Дослідити енергетичну ефективність використання вентилязованих фасадів за допомогою порівняння показників температур у вентилязованому каналі, швидкостей повітряного потоку вентилязованого прошарку з використанням програмного середовища ANSYS Fluent та різних видів конвекції. Порівняння теплових потоків крізь стіну з вентилязованим прошарком та за відсутності такого каналу під час літнього періоду. Використання існуючої моделі променевого теплообміну у середовищі ANSYS Fluent з різними інтенсивностями сонячного випромінювання, для порівняння термодинамічних показників поведінки вентилязованого фасаду.[1]

**Матеріал і результати досліджень.** Непрозорий вентиляований фасад є спеціальним фасадом, коли зовнішня поверхня будівлі складається з окремого прошарку, який є природною вентиляованою порожниною. Вентиляований фасад зображений схематично у вигляді двовимірної системи на рис. 1. Він складається з двох плит (внутрішня і зовнішня плити) розділені повітропроводом, в який проникає повітря. Передача тепла викликана наступними чинниками [2]:

- радіаційний теплообмін між двома стінками каналу ;
- конвективний теплообмін між стінками порожнини і циркулюючими потоками повітря;
- теплопровідність крізь стіни.

Масу повітря, що протікає в канал, можна вважати в якості незалежної змінної у випадках примусової вентиляції, в той час як у випадку природної вентиляції вона визначається тепловим потоком, геометрією каналу і зовнішніми атмосферними умовами. Масовий потік повітря також перебуває під впливом зовнішніх умов вітру. Для спрощення основних рівнянь зовнішній ефект вітру в даній системі не розглядаються. Сформульована модель впроваджена у програмне забезпечення ANSYS Fluent.

Енергетичний баланс для стаціонарних систем був застосований для дослідження контрольного об'єму, який представляє собою два непрозорих фасади, розділених повітряним каналом. Усереднене за часом рівняння руху Нав'є-Стокса може бути записана у наступному вигляді [3].

Номенклатура:

$\rho$  - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>

$u_i$ ,- швидкість повітря відносно осі X, м/с

$x_i$  - відстань відносно осі X, м

$F_i$  - додаткові сили, які впливають на систему, Н

$j$  - ентальпія, Дж·кг<sup>-1</sup>

$T$  - температура, К

$S_h$  - додаткова енергія, яка надходить до системи, Дж

$\mu$  - динамічна в'язкість повітря, кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>

$\mu_0$  - динамічна в'язкість повітря на вході у повітряний канал, кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>

$G_k$  - генерація турбулентної кінетичної енергії, кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-3</sup>

$G_b$  - генерація турбулентної кінетичної енергії, яка викликана ефектом плавучості, кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-3</sup>

$k$  - турбулентна кінетична енергія, м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>

$k_0$  - кінетична енергія на вході у повітряний канал, м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>

$\varepsilon$  - швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, м<sup>2</sup>·с<sup>-3</sup>

$\sigma_\varepsilon, \sigma_k$  - турбулентний критерій Прандтля для  $\varepsilon, k$  відповідно

$C_{1\varepsilon}, G_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  - емпіричні коефіцієнти для  $k\varepsilon$  турбулентної моделі

Збереження маси у  $i$ -тому напрямку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0. \quad (1)$$

Збереження імпульсу в  $i$ -тому напрямку:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + F_i. \quad (2)$$

Збереження енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i j) = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (k + k_0) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h. \quad (3)$$

Рівняння переносу для стандартної моделі турбулентності  $k$ - $\varepsilon$ , виведене з рівняння Нав'є-Стокса, може бути записане як:

-турбулентна кінетична енергія:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_0}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_h + G_b - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

-кінетична енергія дисипації:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (5)$$

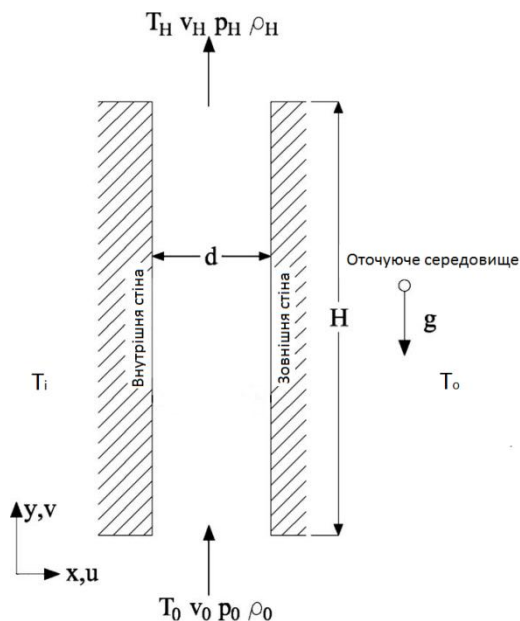


Рис. 1. Схематичне зображення вентилязованого фасаду

Чисельне рішення кінцевих різниць було використане для рішення рівнянь моделі з використанням необхідних граничних умов, які зазначені у табл.1. Наступні кліматичні умови були використані:  $T_i = 297$  К,  $T_o = 301$  К. Де  $T_i$  – це температура в приміщенні, а  $T_o$  – температура навколишнього середовища, інтенсивність сонячної радіації  $I = 400$  Вт/м<sup>2</sup>.

Таблиця 1

Граничні умови задачі	
$y=0$	$y=H$
$p=p_0$	$p=\rho g H$
$T=T_0$	-
$v=v_0$	-

Термофізичні властивості та геометричні розміри фасаду вказані у табл. 2. Розміри повітряного каналу були обрані згідно запропонованих величин. [4-6]. Висота  $H = 6$  м., товщина  $d = 0,15$  м.  $L=0.445$ м. - загальна товщина стінки.

Таблиця 2

Термофізичні властивості вентилязованого фасаду

Номер прошарку	Назва прошарку	Товщина, м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)
1	Цегляна стіна	0,045	800	0,3
2	Повітря	0,15	-	0,56
3	Скловолокно	0,04	100	0,038
4	Цементна стяжка	0,015	2000	1,4
5	Пустотіла цегла	0,18	1600	0,59
6	Штукатурка	0,015	1800	0,9

Схематичне зображення прошарків представлено на рис. 2.

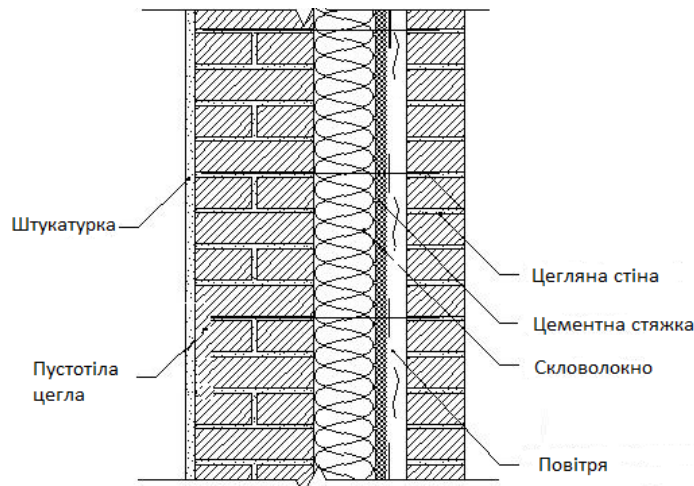


Рис. 2. Прошарки вентиляційного фасаду

Результати імітаційного моделювання процесу при різних умовах наведено нижче. Було виконано кілька моделювань з різними температурами та швидкостями. Чисельна збіжність між послідовними ітераціями у розмірі  $10^{-3}$  для рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії досягається за допомогою від 400 до 500 ітерацій. На рис. 3 представлені залежності температури і швидкості від позиції у повітряному каналі. Графіки показують, що температура повітря збільшується вздовж напрямку руху повітря.  $T_1$  та  $T_2$ , розраховані температури стінок з внутрішніх поверхонь повітроводу, (К), які зображені на рис.2 при  $d=0$  м та  $d=0.15$  м відповідно,  $d$  – відстань у повітряному каналі.

Профілі швидкостей показують, що найбільша швидкість у граничних областях біля плит. Графіки швидкостей симетричні. Потік повітря всередині каналу є ламінарним з середньою швидкістю близько  $v_0=0,5$  м/с,  $Re=4200$ , що є менше критичного значення ( $Re_c=1.2 \cdot 10^5$ ) для даної геометричної конфігурації. Слід зазначити, що у випускній секції ( $y = 6$  м), швидкість повітря зменшується через втрату тиску на цій ділянці каналу. Інші розрахунки були проведені при збільшенні інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на зовнішню поверхню, від  $100 \text{ Вт/м}^2$  до  $500 \text{ Вт/м}^2$ .

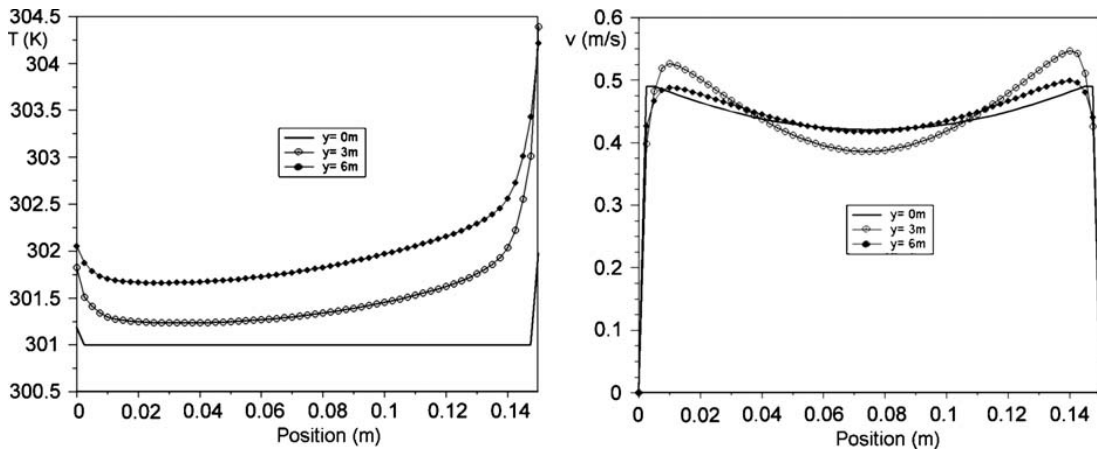


Рис. 3. Залежність температури та швидкості від відстані до стін на різних висотах  $I = 400 \text{ Вт/м}^2$  ( $y = 0$  м,  $y = 3$  м;  $y = 6$  м).

На рис.4 представлено наступне підтвердження, що збільшення сонячної радіації “I” викликає значне нагрівання повітря в каналі, а отже збільшення температури повітря на виході з каналу, та як наслідок збільшення теплового потоку, паралельного осі Y. У випадку відсутності повітряного прошарку при  $I=400 \text{ Вт/м}^2$  тепловий потік, який доходить до приміщення дорівнює  $q=40 \text{ Вт}$ , в той час як при тих самих умовах у вентиляційному фасаді тепловий потік дорівнює  $q_{vf}=15 \text{ Вт}$ .

Ефективність використання вентиляційних фасадів:

$$\eta = \frac{q - q_{vf}}{q} = 62.5\% \quad (6)$$

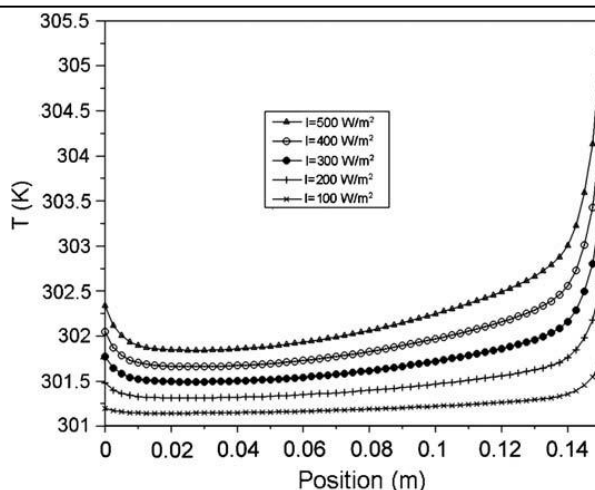


Рис. 4. Залежність температури повітряного каналу від сонячної радіації

Подальші розрахунки (рис. 5) були проведені при збільшенні швидкості повітря на вході в вентиляований канал  $v_0$ . Залежність швидкості має тенденцію розвиватися до параболічної форми з переходом від ламінарного до турбулентного потоку. Температурний профіль показує дуже плоску тенденцію в середині каналу з двома точками максимуму біля плит. Збільшення швидкості  $v_0$ , за допомогою вентилятора, викликає зниження різниці температур між двома сторонами каналу і зменшення різниці температур між вхідною і вихідною температурами. Але тепловий потік направлений від входу у вентиляований канал до його виходу збільшується за рахунок збільшення масового потоку повітря. Значення температур у середині каналу менше ніж ті, які були розраховані для більш низьких швидкостей повітря, отже можна спостерігати зменшення потоку тепла направлено у будівлю.

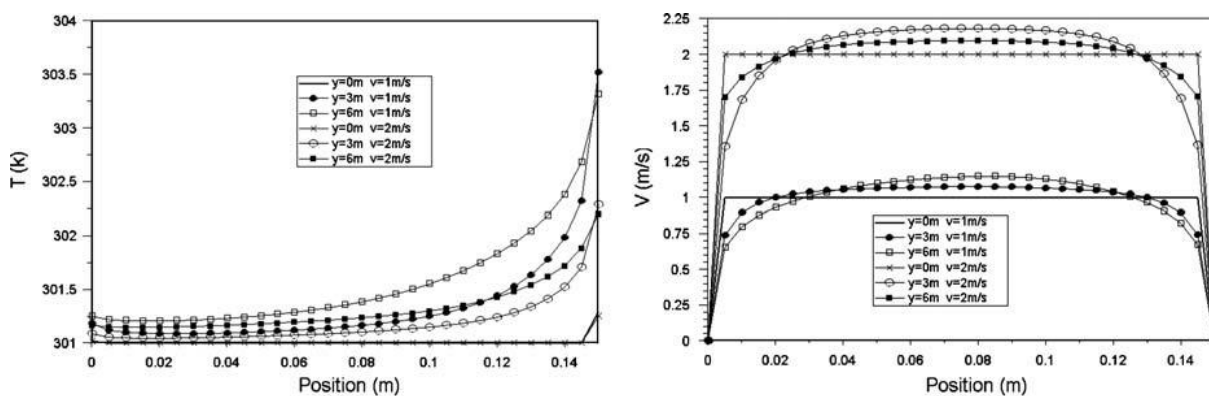


Рис. 5. Залежність швидкості повітря у вентиляованому каналі від позиції у каналі

**Висновки.** Можна стверджувати, що вентиляовані фасади під час літнього періоду забезпечують високі темпи енергозбереження, як правило, вище 40%. Були порівняні температури та швидкості повітря у повітряному каналі, відповідно до різних інтенсивностей випромінювання та швидкостей повітря. Був помічений значний вплив випромінювання на температуру у повітряному каналі. Це спостереження має велике значення для архітекторів, які обирають зовнішнє облицювання вентиляованих фасадів тільки по естетичним критеріям, ігноруючи важливість того, що покриття має бути енергоефективним. Потрібно використовувати матеріали та фарби для фасадів з низьким коефіцієнтом поглинання, задля застосування таких заходів рекомендовано провести економічний аналіз. Перспектива цього дослідження буде стосуватися аналізу енергоефективності вентиляованого фасаду протягом зимового сезону та узгодження параметрів фасаду виходячи з інтеграції літніх та зимових умов

#### Перелік літератури

1. T. Hulda, R Muller, A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa (2012) 181-185.
2. C. Balocco, A simple model to study ventilated facades energy performance, Energy and Buildings 34 (2002) 469-475.
3. Fluent 6.3 User Guide.

4. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, On the thermal behavior of ventilated facades and roof, *La Termotecnica* 1 (2002) 87–97.

5. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, On the use of ventilated facades to reduce summer thermal loads, *Costruire in Laterizio* 89 (2002) 70–75.

6. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, *Solar Energy* 75 (2003) 491–502.

**M. Kotenko, V. Deshko**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»**

#### **ANALYSIS OF HEAT TRANSFER THROUGH VENTILATED FACADES**

*Ventilated facades can be used in cases of reconstruction of existing buildings and in new construction to improve thermal performance of buildings and the architectural appearance of the skin. One of the advantages is reduction of energy consumption using ventilated facades during the summer. This is caused by the combined effect of shading the external wall and airflow induced by convection in heated channel. Performance evaluation of a ventilated facade requires a complete dynamic analysis of ventilation duct and accurate knowledge of heat transfer coefficients, friction factors and thermal properties of materials. Computer code "Fluent" was used to investigate the thermal behavior of three different typologies of ventilated facades. The purpose of this study is to show modelling and simulation of ventilated facade that can provide all practical criteria for the selection of suitable the most ventilated facades, as in the case of forced convection due to action fan and natural convection due to stack effect.*

**Keywords:** ventilated facade, a mathematical model, natural convection, forced convection.

1. T. Hulda, R Muller, A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa (2012) 181-185.

2. C. Balocco, A simple model to study ventilated facades energy performance, *Energy and Buildings* 34 (2002) 469–475.

3. *Fluent 6.3 User Guide*.

4. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, On the thermal behavior of ventilated facades and roof, *La Termotecnica* 1 (2002) 87–97.

5. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, On the use of ventilated facades to reduce summer thermal loads, *Costruire in Laterizio* 89 (2002) 70–75.

6. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, *Solar Energy* 75 (2003) 491–502.

УДК 662.963

**М.Р. Котенко; В.И. Дешко**, д-р техн. наук, профессор

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**

#### **АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕНА ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ**

*Вентилируемые фасады могут быть использованы в случае реконструкции существующих зданий и возведения новых зданий для улучшения как тепловых характеристик, так и архитектуры зданий. Преимущества вентилируемых фасадов во время летнего периода является снижение тепловой нагрузки в связи со следующими эффектами: затенение внутреннего фасада и возникновение воздушного потока, вызванного естественной конвекции в воздушном канале. Оценка эффективности вентилируемого фасада требует динамического анализа вентилируемого воздуховода и точного знания коэффициентов теплоотдачи, факторов трения и теплофизические свойства материалов. Было использовано программное обеспечение ANSYS Fluent для исследования теплового поведения одного из самых распространенных типов вентилируемого фасада. Целью данного исследования является моделирование вентилируемых фасадов способных обеспечить энергоэффективную эксплуатацию, как в случае естественной, так и механической конвекции, вызванной действием вентилятора.*

**Ключевые слова:** вентилируемый фасад, математическая модель, естественная конвекция, вынужденная конвекция.

Надійшла 13.03.2014

Received 13.03.2014