

УДК 697.1

ДЕШКО В. І., СУХОДУБ І. О., ЯЦЕНКО О. І.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДСИСТЕМИ ТЕПЛОВІДДАЧІ НА ОСНОВІ CFD-МОДЕЛІ КІМНАТИ

Мета. Визначення енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі системи опалення на базі CFD-моделі опалювальної кімнати.

Методика. За допомогою CFD-моделювання типової кімнати з радіатором та природним повітрообміном були отримані дані, використані для розрахунку показників ефективності тепловіддавальної складової системи опалення (підсистеми тепловіддачі) відповідно до методики, представленої ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Для CFD-моделювання було використано k - ϵ модель турбулентності та S2S радіаційну модель.

Результати. За результатами чисельних моделювань, було проведено аналіз температурного розподілу у кімнаті. На основі отриманих даних про теплове навантаження кімнати, внутрішні середньооб'ємну та середньорадіаційну температури, а також температуру в робочій зоні було розраховано складову загальної ефективності, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні та включає коефіцієнт, що враховує вплив температурного напору та коефіцієнт, що враховує питомі тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції, визначені за температурного напору 29 К.

Наукова новизна. Запропоновано підхід до визначення коефіцієнтів, які стосуються ефективності тепловіддавальної складової системи опалення (підсистеми тепловіддачі). Таким чином методом гідродинамічного моделювання можна уточнити тепловтрати підсистеми тепловіддачі та наведені в ДСТУ Б А.2.2-12:2015 коефіцієнти.

Практична значимість. Наведені результати досліджень доводять доцільність застосування CFD-моделей при розрахунку тепловтрат тепловіддавальної складової системи опалення, а також дозволяють провести наукове обґрунтування ряду значень, наведених у таблицях стандарту ДСТУ Б А.2.2-12:2015, які стосуються ефективності тепловіддавальної складової системи опалення.

Ключові слова: підсистема тепловіддачі; BEM; CFD; енергетичне моделювання; Ansys Fluent.

Вступ. В рамках закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [1] методика визначення енергоефективності будівель, що використовується зокрема для сертифікації енергетичної ефективності будівель, представлена в Наказі від 11.07.2018 №169 [2], розроблена на базі європейських стандартів та законодавчих актів Європейського Союзу та Енергетичного Співтовариства. Дана методика [2] базується на методі розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні, представленому в національному стандарті для оцінки енергоефективності [3] та EN ISO 13790 [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Підходи ж, що стосуються питань визначення енергоефективності систем опалення були запозичені зі стандартів EN 15316-2-1 [5] та EN 15316-2-3 [6].

Відповідно до [3] загальне енергоспоживання будівлі на потреби опалення визначається як сума енергопотреб для підтримання заданих температур всередині будівлі та регулярних неутилізованих втрат теплоти в системі опалення, а також необхідної додаткової енергії. Регулярні неутилізовані тепловтрати включають втрати теплоти при генеруванні, акумулюванні, транспортуванні, регулюванні, розподіленні теплової енергії та тепловіддачі.

При визначенні тепловтрат в підсистемі тепловіддачі (тепловіддавальній складовій системи опалення) враховується енергетичний взаємозв'язок між приладом опалення (тип,

характеристика, розміщення) та приміщенням, в якому він розміщений, а також враховується метод теплового регулювання у приміщенні та тип обладнання, що забезпечує це регулювання (його здатність до зменшення відхилень та коливань внутрішньої температури). Втрати теплової енергії, які спричинені неоднорідністю розподілення внутрішньої температури, враховуються за допомогою коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі, наведених в додатках стандарту [7].

Аналіз попередніх досліджень. Для аналізу температурних та швидкісних полів у приміщеннях будівлі часто застосовується метод чисельного моделювання в гідроаеродинаміці (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD-моделювання вирішує диференціальні рівняння аеродинаміки та теплофізики у часткових похідних методом скінченних елементів. Результатом чисельного моделювання є можливість оцінити значення швидкості, температури та тиску повітря в кожній точці кімнати та інші показники, що впливають на мікроклімат у приміщенні. Можливість візуалізації результатів чисельного моделювання надає повну картину формування мікроклімату у кімнаті та дозволяє наочно продемонструвати, наприклад, якість обраної схеми повітророзподілу, а також якісно та кількісно порівняти різні варіанти проектних рішень. Зокрема, програмний пакет ANSYS Fluent широко використовується для виконання обчислень CFD, де на основі рівнянь безперервності, імпульсу та енергії програма дозволяє оцінити теплові та тривимірні поля течії [8].

В роботі [9] була досліджена можливість застосування CFD-моделі для характеристики поведінки повітрообміну під впливом опалення приміщення. Автори прийшли до висновку, що CFD метод доцільно використовувати для детальних досліджень теплового комфорту, якості повітря та споживання енергії. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для гідродинамічного моделювання для ряду задач, пов'язаних з дослідженням теплового комфорту, якості повітря та потенціалу енергозбереження у приміщеннях, за різних розрахункових умов, розглянуто в роботах [8–13]. Дослідники підтверджують точність результатів CFD-моделювання наявними експериментальними даними та той факт, що розроблені ними моделі можуть бути використані для прогнозування розподілу швидкості та температури повітря всередині приміщень.

На основі CFD-моделювання проводять обґрунтування використання того чи іншого розрахункового підходу, наведеного у стандартах. Наприклад, в роботі [10] імітаційна модель кімнати була використана для моделювання профілів швидкості та температури всередині приміщення, а також для розрахунку індексів теплового комфорту, відповідно до UNI 7730.

CFD-модель кімнати з опаленням та природнім повітрообміном була чисельно змодельована для аналізу параметрів теплового комфорту в роботі [11]. В публікації зазначено, що променева складова теплового потоку від приладу опалення значним чином вплинула на комфортну температуру в приміщенні. Там також виявлено, що незалежно від вибраної моделі турбулентності (k - ϵ чи k - ω) внутрішня температура, має подібний профіль. Згідно з висновками в цій роботі завдання адіабатних граничних умов для внутрішніх огорожувальних конструкцій є ідеалізацією та потребує врахування частки тепла яка проходить через ці конструкції, як це зробили, наприклад, для CFD-моделі в роботі [12].

Автори [14] стверджують, що за допомогою CFD-моделей можливим є здійснення аналізу впливу розташування приладу опалення та його геометричних характеристик на розподіл температури всередині приміщення, а також доводять, що використання постійної температури по поверхні приладу опалення є прийнятним.

В дослідженні, представленою в [15], увага приділялася організації теплового режиму приладу опалення, шляхом переведення аналогічної моделі в нестационарний режим роботи.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення енергетичних показників роботи підсистеми тепловіддачі на базі CFD-моделі. В ході роботи вирішені наступні задачі:

- досліджено методику визначення тепловтрат в підсистемі тепловіддачі згідно з EN 15316-2-1 [5];
- створено 3D CFD-модель кімнати в програмному середовищі ANSYS Fluent;
- проаналізовано розподіл температур в кімнаті;
- пораховано складову загальної ефективності, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури.

Методика визначення тепловтрат в підсистемі тепловіддачі. Згідно з [3, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**] теплові втрати у підсистемі тепловіддачі (тепловиділення) спричинені наступними факторами:

- втрати теплоти в результаті нерівномірності розподілення внутрішньої температури $Q_{em, str}$;
- втрати теплоти для вбудованих в огорожувальні конструкції опалювальних приладів (систем підлогового, стельового та стінового опалення), які враховуються коли одна сторона огорожувальної конструкції, в якій розміщено прилад опалення, контактує з неопалювальним об'ємом, $Q_{em, emb}$;
- втрати теплоти, спричинені регулюванням внутрішньої температури у тепловіддавальній складовій системи, які залежать від підходу до регулювання внутрішнього навантаження, $Q_{em, ctr}$.

Тож регулярні втрати теплоти у підсистемі тепловіддачі визначаються наступним чином:

$$Q_{em, ls} = Q_{em, str} + Q_{em, emb} + Q_{em, ctr}. \quad (1)$$

В [7] передбачено два підходи до визначення тепловтрат в підсистемі тепловіддачі/тепловиділення:

- метод, що базується на показниках ефективності підсистеми;
- метод, що базується на визначенні еквівалентної внутрішньої температури.

В [7] рекомендовано застосовувати один з методів, при цьому поєднання двох вищезазначених методів не допустиме. В національній Методиці визначення енергетичної ефективності будівель [3] представлено саме перший метод, який дозволяє визначити загальні втрати теплоти в підсистемі тепловіддачі за наступною формулою:

$$Q_{H, em, ls} = \left(\frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} - 1 \right) \cdot Q_{H, em, out}, \quad (2)$$

де $Q_{H, em, out}$ – енергія виходу від підсистеми тепловіддачі/тепловиділення (енергопотреба для опалення за обраний період часу), кВт·год;

f_{hydr} – коефіцієнт, який залежить від гідравлічного налагодження системи опалення;

f_{im} – коефіцієнт, що враховує наявність змінного теплового режиму у приміщенні, для постійного теплового режиму $f_{im} = 1$;

f_{rad} – коефіцієнт, що включає променеву складову теплового потоку і застосовується тільки для променевих систем опалення;

η_{em} – загальна ефективність тепловіддавальної складової системи опалення приміщення, що визначається за формулою:

$$\eta_{em} = \frac{1}{1 - (\eta_{str} + \eta_{ctr} + \eta_{emb})}, \quad (3)$$

де η_{ctr} – складова загальної ефективності, яка відповідає за регулювання внутрішньої температури у тепловіддавальній складовій системи опалення приміщення;

η_{emb} – складова загальної ефективності, яка відповідає за втрати теплоти за рахунок вбудованих в огорожувальні конструкції опалювальних приладів;

η_{str} – складова загальної ефективності, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні, визначається за формулою:

$$\eta_{str} = \frac{\eta_{str1} + \eta_{str2}}{2}, \quad (4)$$

де η_{str1} – коефіцієнт, що враховує вплив температурного напору;

η_{str2} – коефіцієнт, що враховує питомі тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції.

Приклад значень наведених вище коефіцієнтів для приміщення висотою не більше 4 м з радіаторною системою тепловіддачі приведено в табл. 1. Всі коефіцієнти, запозичені із європейських стандартів, були розраховані для певних умов.

Таблиця 1

**Ефективність підсистеми тепловіддачі з радіаторами
для приміщення висотою не більше 4 м [7]**

Впливовий фактор		Складові загального рівня ефективності			
		η_{str1}	η_{str2}	η_{ctr}	η_{emb}
Регулювання температури повітря приміщення	Відсутнє			0,86	
	За усередненої (характерної) температури повітря приміщень будівлі			0,88	
	П-регулювання (2 К)			0,93	
	П-регулювання (1 К)			0,95	
	ПІ-регулювання			0,97	
	ПІ-регулювання з оптимізацією			0,99	
Температурний напір (за температури повітря 20 °С)	60 К (наприклад, 90/70)	0,88			
	42,5 К (наприклад, 70/55)	0,93			
	30 К (наприклад, 55/45)	0,95			
Специфічні тепловтрати через зовнішні огороження	Опалювальний прилад встановлено біля внутрішньої стіни		0,87		1
	Опалювальний прилад встановлено біля зовнішньої стіни:				
	- вікно без радіаційного захисту;		0,83		1
	- вікно з радіаційним захистом;		0,88		1
	- звичайна стіна.		0,95		1

В основі розрахунку енергоспоживання на потреби опалення, згідно з [3], є припущення, що температура в робочій зоні та внутрішня середньооб'ємна однакові та рівномірно розподілені у приміщенні. Тому існує необхідність враховувати додаткові втрати теплової енергії, спричинені неоднорідністю розподілення внутрішньої температури, яка може бути результатом температурної стратифікації, радіації та конвекції від системи тепловіддачі через інші поверхні, підвищенням коефіцієнтом тепловіддачі біля вікон тощо. Саме за ці втрати відповідає складова загальної ефективності, яка враховує вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні [16]. Враховуючи наведені вище формули ця складова розраховується наступним чином:

$$\eta_{str} = 1 - \frac{Q_{H.em,ls}}{Q_{H.nd}}. \quad (5)$$

Гідродинамічна модель. На базі 3D моделі житлової кімнати (рис. 1) розробленої в програмному середовищі Ansys Fluent було досліджено коефіцієнти, які відповідають за вертикальний профіль розподілення температури повітря.

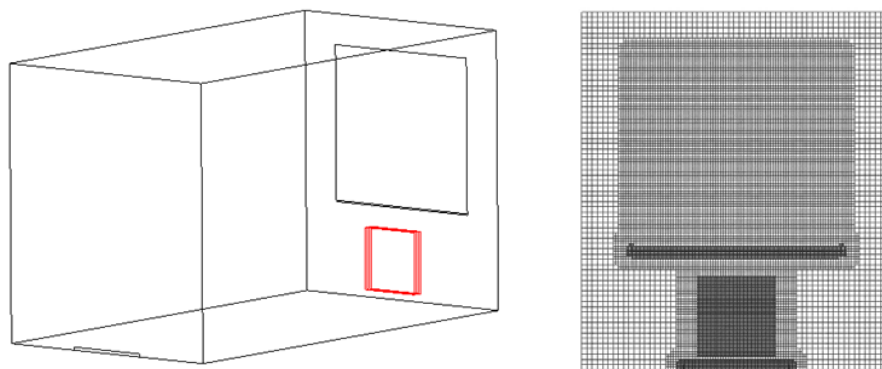


Рис. 1. 3D-модель досліджуваної кімнати та її розрахункова сітка

Досліджуване приміщення – житлова кімната площею 10,5 м², розташована в багатоквартирному будинку з середнім рівнем теплового захисту. Кімната має одну зовнішню стіну з керамічної цегли 400 мм, утеплену мінеральною ватою 50 мм, а також вікно з потрійним склопакетом з двома низькоемісійними покриттями і заповненням аргонем. Три внутрішні стіни межують з іншими кімнатами з тим же температурним режимом.

Розрахункова сітка моделі кімнати була побудована в розрахунковому середовищі ANSYS Workbench та складається з 676 144 вузлів і 637 297 елементів (рис. 1). Якість сітки оцінювалася такими показниками як “Orthogonal Quality” та “Skewness”, значення яких знаходились в межах, які характеризують якість сітки як дуже високу.

В моделі передбачено природний повітрообмін у кімнаті, який забезпечується шляхом інфільтрації крізь нещільності зовнішніх огорожувальних конструкцій на рівні 0,56 год⁻¹, що відповідає нормі кратності повітрообміну для даного приміщення, яка була обґрунтована в [17]. Вентиляційний вхід розміщений у вигляді вузького отвору під вікном, а вихід повітря відбувається через отвір над підлогою на протилежній стіні, у місці розташування міжкімнатних дверей. Масова витрата повітря становить 0,0057 кг/с. Граничну умову на витяжці встановлено через атмосферний тиск.

Опалення в кімнаті здійснюється за допомогою опалювального приладу – радіатора, розташованого на відстані 0,1 м від зовнішньої стіни та від підлоги відповідно. Радіатор складається з чотирьох поверхонь розмірами 0,6 м × 0,6 м та товщиною 2,5 мм. Тепловий потік

від радіатора встановлювався за допомогою температури на його поверхнях на рівні 51°C , що забезпечує внутрішню температуру 22°C .

В CFD-моделі для всіх огорожень було застосоване поняття гомогенних еквівалентних стін, характеристика яких зведена в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики огорожень

Тип конструкції	δ , м	ρ , кг/м^3	c , $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
Зовнішня стіна (Сх)	0,47	1271	874	0,535
Внутрішня стіна (Пд)	0,42	1795	878	0,813
Внутрішня стіна (Зх, Пн)	0,165	1549	840	0,42
Стеля, підлога	0,22	2436	840	1,939
Вікно	0,038	1000	450	0,0483
Радіатор (4 ребра)	0,0025	7007	946	55,17

На поверхнях огорожувальних конструкцій (стіни і вікно) були задані граничні умови 3 роду ($t_{\text{ext.}} = -22^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{int.}} = 22^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\text{ext.}} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, $\alpha_{\text{int.}} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$). Для внутрішніх стін обрано конвективний теплообмін.

В розрахунковій області обрані наступні моделі:

- турбулентний режим течії з “k-epsilon” моделлю турбулентності;
- радіаційний теплообмін, з “surface to surface (S2S)” радіаційною моделлю;
- теплопровідність та в’язкість повітря не залежать від його температури.

Для моделювання радіаційного теплообміну між поверхнями в кімнаті було застосовано дві моделі: “Discrete ordinates (DO)” та “Surface to Surface (S2S)”. В результаті виявлено, що загальний тепловий та радіаційний баланси кімнати подібні у обох випадках. Зауважимо, що сонячні теплонадходження не були задані в даній моделі.

Передбачена перевірка збіжності реалізовувалась шляхом спостереження за збіжністю змінних (швидкості руху повітря, температури внутрішньої та на поверхнях, тиску, тощо), а також нев’язки в балансі.

Валідацію CFD-моделі житлової кімнати в програмному середовищі AnsysFluent було реалізовано на основі порівняння теплового навантаження за стаціонарних умов ($t_{\text{rad.}} = 51^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{int.}} = 22^{\circ}\text{C}$) з даними отриманими з моделі цієї ж кімнати в програмному середовищі EnergyPlus. Так теплове навантаження, за результатами CFD-моделювання склало $44,75 \text{ Вт/м}^2$, а за результатами динамічного моделювання в EnergyPlus – $48,73 \text{ Вт/м}^2$.

Застосування CFD-моделі для аналізу показників енергоефективності підсистеми тепловіддачі. У заданій моделі температурний напір при внутрішній температурі повітря 22°C становить 29 K, а радіатор встановлений біля зовнішньої стіни під вікном без радіаційного захисту. За розрахункову температуру всередині житлового приміщення приймалася температура в робочій зоні на висоті 1,2 м від підлоги [9] і на відстані 2 м від огороження, яка становить $t_{\text{work.ar.}} = 296,047 \text{ K}$ за температури поверхні радіатора $t_{\text{rad.}} = 324,15 \text{ K}$ та теплового потоку від приладу опалення $471,2 \text{ Вт}$.

Розподіл температури по висоті на відстані 2 м від огороження показано на рис. 2.

Було також досліджено розподіл внутрішньої температури на горизонтальній поверхні робочої зони, на висоті 1 м, 1,2 м та 1,4 м від підлоги. Контури температури на цих поверхнях представлені на рис. 3.

Середньооб’ємна температура у розглянутій кімнаті за тих же умов становила $t_{\text{vol.av.}} = 295,39 \text{ K}$. Враховуючи результати моделювання щодо температур, а також формули (4) та (5) визначено коефіцієнти η_{str1} та η_{str2} для заданих умов за формулами (6) та (7).

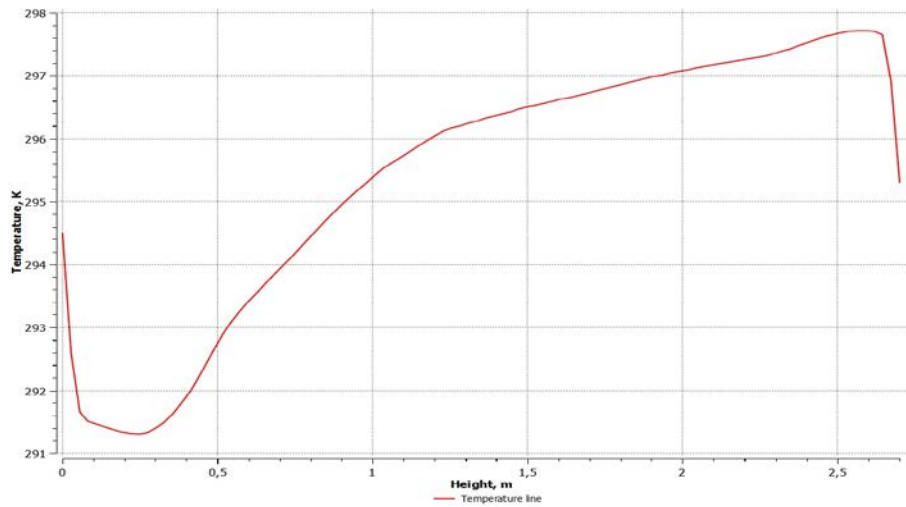


Рис. 2. Графік розподілу температури по висоті на відстані 2 м від огороження

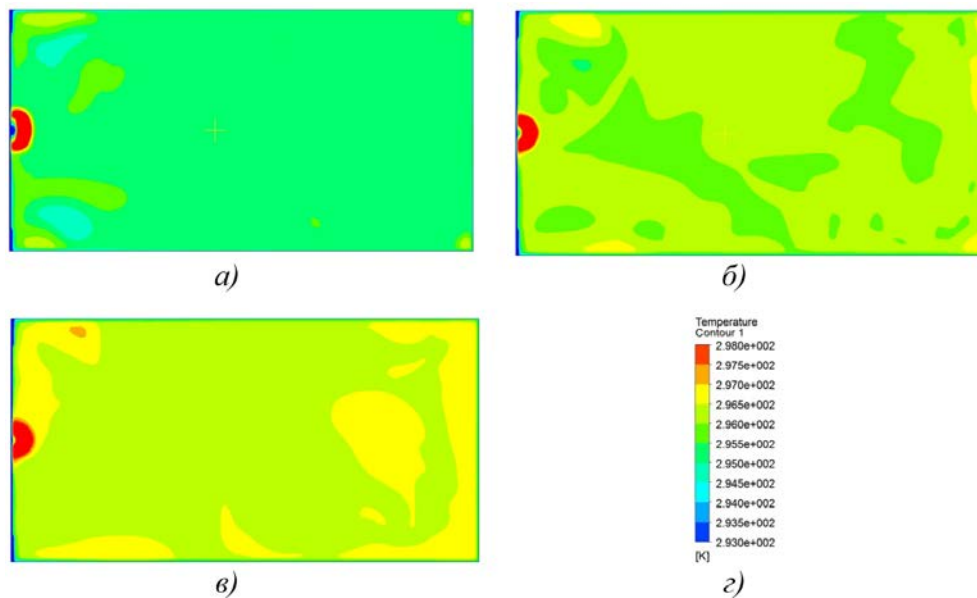


Рис. 3. Контури температури у розрізі на горизонтальній поверхні на висоті 1 м (а), 1,2 м (б) та 1,4 м (в) від підлоги

Коефіцієнт, що враховує вплив температурного напору:

$$\eta_{str1} = 1 - \frac{2 \cdot Q_{H.em.ls}}{Q_{H.nd}} = 1 - \frac{2 \cdot ((t_{rad.} - t_{vol.av.}) - (t_{rad.} - t_{work.ar.}))}{(t_{rad.} - t_{work.ar.})},$$

$$\eta_{str1} = 1 - \frac{2 \cdot ((324,15 - 295,39) - (324,15 - 296,047))}{324,15 - 296,047} = 0,953. \quad (6)$$

Коефіцієнт, що враховує питомі тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції:

$$\eta_{str2} = 1 - \frac{2 \cdot Q_{H.em.ls}}{Q_{H.nd}} = 1 - \frac{2 \cdot ((t_{work.ar.} - t_{ext.}) - (t_{vol.av.} - t_{ext.}))}{(t_{vol.av.} - t_{ext.})},$$

$$\eta_{str2} = 1 - \frac{2 \cdot ((296,047 - 251,15) - (295,39 - 251,15))}{295,39 - 251,15} = 0,97. \quad (7)$$

Висновки. В даній роботі запропоновано та випробувано підхід до визначення складової загального рівня ефективності підсистеми тепловіддачі, яка відповідає за вертикальний профіль розподілення температури повітря у приміщенні, що дозволить точніше враховувати втрати пов'язані з нерівномірністю розподілення при розрахунках енергоспоживання за ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

На базі CFD-моделі, було досліджено коефіцієнти ефективності, що враховують вплив температурного напору та питомих тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції при розрахунку втрат теплоти в підсистемі тепловіддачі. В ході моделювання було отримано зміну середньооб'ємної температури та температури на робочій поверхні. Різниця між ними і впливає безпосередньо на значення цих коефіцієнтів, наведених в ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Таким чином методом гідродинамічного моделювання можна уточнити тепловтрати підсистеми тепловіддачі та наведені в стандарті коефіцієнти.

References

Література

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy [On energy efficiency of buildings: Law of Ukraine dated 22.06.2017 No. 2118-VIII]. VVR = *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*. Iss. 33, Article 359 [in Ukrainian].
2. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel [About the approval of the Methodology for calculating the energy performance of buildings: MinRegion order № 169 dated 11.07.2018] [in Ukrainian].
3. DSTU-N B A.2.2-12:2015 Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittleni ta hariachomu vodopostachanni [Energy performance of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water]. Effective from 01-01-2016. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 202 p. [in Ukrainian].
4. EN ISO 13790 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008.
5. EN 15316-2.1 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 2.1: Space heating emission systems.
6. EN 15316-2.3 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 2.3: Space heating distribution systems.
7. DSTU-B EN 15316-2-1:2011 Systemy teplozabezpechennia budivel. Metodyka rozrakhunku enerhopotreby ta enerhoefektyvnosti systemy. Chastyna 2-1. Teploviddacha systemoiu opalennia. [Heating systems in buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 2.1: Space heating emission systems]. Effective from 2013-01-01. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 64 p. [in Ukrainian].
8. Buratti, C., Palladino, D., Moretti, E. (2017). Prediction Of Indoor Conditions And Thermal Comfort Using CFD
1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 33. Ст. 359.
2. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ №169 від 11.07.2018.
3. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Чинний від 01-01-2016. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. 202 с.
4. EN ISO 13790 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008.
5. EN 15316-2.1 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 2.1: Space heating emission systems.
6. EN 15316-2.3 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 2.3: Space heating distribution systems.
7. ДСТУ Б EN 15316-2-1:2011 Системи теплозабезпечення будівель. Методика розрахунку енергопотреб та енергоефективності системи. Ч. 2-1. Тепловіддача системою опалення. Чинний з 2013-01-01. К.: Мінрегіон України, 2013. 64 с.
8. Buratti C., Palladino D., Moretti E. Prediction Of Indoor Conditions And Thermal

Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. *Energy Procedia*, 126, 115–122.

9. Teodosiu, C., Kuznik, F., & Teodosiu, R. (2014). CFD modeling of buoyancy driven cavities with internal heat source – Application to heated rooms. *Energy and Buildings*, 68, 403–411.

10. Buratti, C., Palladino, D., Moretti, E. (2017). Prediction Of Indoor Conditions And Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. *Energy Procedia*, 126, 115–122.

11. Anthony, A. S., Verma, T. N. (2021). Numerical analysis of natural convection in a heated room and its implication on thermal comfort. *Journal of Thermal Engineering*, 7(1), 37–53.

12. Laubi, R. N., Abbood, N. K. (2020). CFD analysis of the classroom thermal conditions built from the sandwich panel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1773(1):012019.

13. Ganesh, G. A., Sinha, S. L., Verma, T. N. (2019). Numerical simulation for optimization of the indoor environment of an occupied office building using double-panel and ventilation radiator. *Journal of Building Engineering*, 101139.

14. Basok, B. I., Goncharuk, S. M., Priemchenko, V. P., Novitska, M. P., Nedbailo, O. M., Tkachenko, M. V. (2021). Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu prymishchennia pry vykorystanni opaliuvalnykh keramichnykh panelei [Experimental studies of the thermal regime of the room when using heating ceramic panels]. *Ceramics: science and life*, 3(52), 15–20 [in Ukrainian].

15. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Yatsenko O.I. (2021) Analysis of constant and intermittent heating modes using BEM and CFD simulation. *Book of abstracts V International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”*, 3-5 June 2021. Poland. Pp. 39–41.

16. Yatsenko, O. (2022). Zastosuvannia CFD-modeliuвання dlia analizu pokaznykiv efektyvnosti roboty systemy opalennia [Analysis of the heating system performance indicators using CFD-modeling]. *Materialy XIV konferentsii “Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna”*, June 2–3, Kyiv, Pp. 81–85 [in Ukrainian].

17. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. (2021). Evaluation of energy use for heating in residential

Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. P. 115–122.

9. Teodosiu C., Kuznik F., Teodosiu R. CFD modeling of buoyancy driven cavities with internal heat source – Application to heated rooms. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 68. P. 403–411.

8. Buratti C., Palladino D., Moretti E. Prediction Of Indoor Conditions And Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. P. 115–122.

11. Anthony A. S., Verma T. N. Numerical analysis of natural convection in a heated room and its implication on thermal comfort. *Journal of Thermal Engineering*. 2021. Vol. 7, No. 1. P. 37–53.

12. Laubi R. N., Abbood N. K. CFD analysis of the classroom thermal conditions built from the sandwich panel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1773(1):012019.

13. Ganesh G. A., Sinha S. L., Verma T. N. Numerical simulation for optimization of the indoor environment of an occupied office building using double-panel and ventilation radiator. *Journal of Building Engineering*. 2019. 101139.

14. Басок Б. І., Гончарук С. М., Приємченко В. П., Новіцька М. П., Недбайло О. М., Ткаченко М. В. Експериментальні дослідження теплового режиму приміщення при використанні опалювальних керамічних панелей. *Кераміка: наука і життя*. 2021. № 3 (52). С. 14–22. DOI: 10.26909/csl.3.2021.2.

15. Deshko V. I., Sukhodub I. O., Yatsenko O. I. Analysis of constant and intermittent heating modes using BEM and CFD simulation. *Book of abstracts V International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering”*, 3-5 June 2021. Poland. Pp. 39–41.

16. Яценко О. І. Застосування CFD-модельовання для аналізу показників ефективності роботи системи опалення. *Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина»*, м. Київ, 2–3 червня 2022 р. С. 81–85.

17. Deshko V., Bilous I., Sukhodub I., Yatsenko O. Evaluation of energy use for

building under the influence of air exchange modes.
Journal of Building Engineering, 42(2021):103020.

heating in residential building under the
influence of air exchange modes. *Journal of
Building Engineering*, 2021. 42(2021). 103020.

DESHKO VALERII

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>
Scopus Author ID: 6506189670
ResearcherID: J-6517-2017
E-mail: te@kpi.ua

SUKHODUB IRYNA

Candidate of Technical Sciences, Associate professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>
Scopus Author ID: 57140834000
ResearcherID: I-9788-2017
E-mail: ira_krot@ukr.net

YATSENKO OLENA

Assistant lecturer
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8001-5987>
Scopus Author ID: 57226536764
ResearcherID: ACV-8484-2022
E-mail: loco-motion@ukr.net

DESHKO V. I., SUKHODUB I. O., YATSENKO O. I.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

**STUDY OF PART EFFICIENCIES OF THE HEAT EMISSION
SYSTEM USING ROOM CFD-MODEL**

Purpose. Determination of the part efficiencies of the heat emission system using CFD modeling of a typical room.

Methods. The data used to calculate the part efficiencies of the heat emission were obtained in accordance with the methodology presented in DSTU B A.2.2-12:2015 (methodology based on EN 15316-2-1) and CFD modeling results. The $k-\varepsilon$ (k -epsilon) turbulence model and the S2S (surface to surface) radiation model were used for modeling.

Results. According to the results of numerical simulations, an analysis of the temperature distribution in the room was carried out. On the basis of the received data on the heat load of the room, the internal average volume and average radiation temperatures, as well as the temperature in the working area, the coefficients that take into account the influence of “over temperature” and specific heat losses through external enclosing structures were calculated for over-temperature of 29 K.

Scientific novelty. The approach to determination of coefficients that take into account the influence of over temperature and specific heat losses through external enclosing structures was proposed. Therefore, the heat losses and the part efficiencies of the heat emission system coefficients given in DSTU B A.2.2-12:2015 can be specified using CFD-modeling.

The practical significance. The given research results prove the feasibility of using CFD models to clarify heat losses when calculating heating system losses and, in particular, the heat-emitting component of this system. The presented results also make it possible to carry out a scientific justification of a number of values given in the tables of the standard DSTU B A.2.2-12:2015 (Annexes of the Standard EN 15316-2-1), which characterize the efficiency of the heat emission system.

Keywords: heat emission system; BEM; CFD; building energy modelling; Ansys Fluent.