

УДК 628.882

Розроблення методики дослідження мікроклімату опалювального приміщення із застосуванням теплофізичного моделювання та експериментальних даних

О. В. Приймак¹, М. Д. Очеретянко², А. М. Вінтонів³

¹д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, O2opriymak@gmail.com,
ORCID:0000-0002-3081-6057

²асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, nikita.ocheretyanko@gmail.com,
ORCID:0000-0001-6906-7180

³асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, m_vintoniv@icloud.com,
ORCID:0000-0003-2127-1224

Анотація. Дослідження комфортних умов мікроклімату в приміщеннях різного призначення залишається актуальною темою. Воно дозволяє спроектувати будівлю таким чином, аби забезпечити комфортне перебування людей і разом з цим уникнути надмірних перевитрат енергетичних ресурсів. У цій роботі пропонується нова методика дослідження параметрів мікроклімату приміщення, що поєднує теплофізичне моделювання повітряних потоків за допомогою комп'ютерного пакету програм OpenFOAM та експериментальні дані щодо опромінення внутрішніх огорожень кімнати. Дослідження мікроклімату за даною методикою дозволить знизити вірогідність прояву локального дискомфорту в окремих частинах приміщення за рахунок використання чисельних методів. Разом з цим забезпечується адекватна швидкість розрахунків шляхом заміни моделювання радіаційного перенесення теплових потоків експериментальними значеннями температури внутрішніх огорожень у часі.

Ключові слова: мікроклімат приміщень, теплофізичне моделювання, радіаційний теплообмін, системи опалення, OpenFOAM.

Вступ. Забезпечення комфортних температурних умов перебування людей та економія енергетичних ресурсів у приміщеннях адміністративного та житлового призначення – основна мета проектування систем опалення. Не менш важливим ніж усереднені параметри мікроклімату є нерівномірність розподілу цих параметрів у просторі. Останнє визначає локальний комфорт. На даний момент не існує прийнятної методики розрахунку локальних параметрів мікроклімату приміщень, яка би відповідала практичним вимогам:

- дозволяє визначати комфортність мікроклімату у всьому об'ємі приміщення з урахуванням опромінення від поверхонь опалювальних приладів та нагрітих поверхонь стін;
- не є занадто вимогливою до комп'ютерного оснащення;
- дозволяє отримувати результати за адекватний період часу.

Актуальність дослідження. На сьогодні актуальною задачею є розробка та впровадження методики, яка відповідатиме зазначеним вимогам. Вона дозволить розширити аналітичні можливості проектувальників, що позитивно вплине на прийняття найбільш ефективних проектних рішень. Особливо привабливим виглядає інтеграція даної методики з програмним забезпеченням, що використовують принципи

інформаційного моделювання будівель (Building Information Model – BIM).

Останні дослідження та публікації. На сьогодні міжнародна практика оцінювання теплового комфорту вживає загальноприйняті індекси [1]:

- PMV (predicted mean vote);
- PPD (predicted percentage dissatisfied);
- PD (percentage dissatisfied), що враховує наявність локального дискомфорту.

Усі зазначені індекси отримуються обробкою експериментальних даних і показують яка кількість людей задоволена чи незадоволена умовами мікроклімату залежно від значень параметрів теплового комфорту. Теплове середовище (мікроклімат) визначається п'ятьма основними параметрами [2], які використовуються при розрахунку зазначених індексів:

- температура, °C;
- відносна вологість повітря, %;
- швидкість руху повітря, м/с;
- температура твердих тіл у приміщенні (радіаційна температура), °C;
- інтенсивність турбулентності потоків повітря, %.

Значний вклад у радіаційну температуру приміщення, °C, вносять поверхні опалювальних приладів та внутрішніх огорожень. При цьому температуру поверхонь останніх прийнято брати рівною температурі повітря в

приміщенні [3]. Дане твердження справедливе якщо

- у приміщенні відсутні обігрівачі з високою температурою теплопередавальної поверхні, °С;
- різниця температури, °С, між відповідними суміжними приміщеннями незначна.

Аналіз попередніх результатів експериментальних досліджень [4] дозволив визначити, що поверхні наявних на сьогодні водяних опалювальних приладів мають вкрай низький коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К). Таким чином, можна знехтувати вторинним опроміненням нагрітих за їх допомогою стін.

Електричні опалювальні прилади мають поверхні з температурою понад 70 °С. Нагрів поверхні опалювального приладу та внутрішніх огорожень стає значущим. Це може суттєво впливати на радіаційну температуру приміщень. За таких умов раніше згадане припущення [3] не може вживатися.

Для прикладу покажемо експериментальну термограму (рис. 1), отриману при опроміненні 23 датчиків температури, розташованих на стіні в шаховому порядку.

За рис. 1 майже 2/3 площі стіни нагрілися на 1...2 °С від початкового моменту часу. Отже, нехтування променевою складовою від вторин-

ного опромінення стін в середині опалюваного приміщення у даному випадку призведе до значних похибок при розрахунку індексів теплового комфорту.

Іншим відкритим питанням є локальні параметри повітря в опалювальному приміщенні. Сучасні нормативні документи [2] орієнтують на підтримання певних параметрів мікроклімату в середині приміщення, що розраховуються за балансовими рівняннями. Такий підхід раціонально застосовувати, наприклад, для визначення загальних теплових втрат будівлі. Вони необхідні для проектування котельні, теплових пунктів, теплових мереж тощо.

Натомість, визначення типу та кількості опалювальних приладів для кожного приміщення відповідно до їхніх балансових рівнянь призводить до створення некомфортних мікрокліматичних умов. Це особливо помітно у великих приміщеннях зі складною геометрично формою.

Таким чином, виникає потреба проведення ітераційних розрахунків, що дозволять підібрати доцільний тип, кількість і місце розміщення опалювальних приладів у приміщенні. Не існує простих методів і рекомендацій задля швидкого розв'язання цієї задачі.

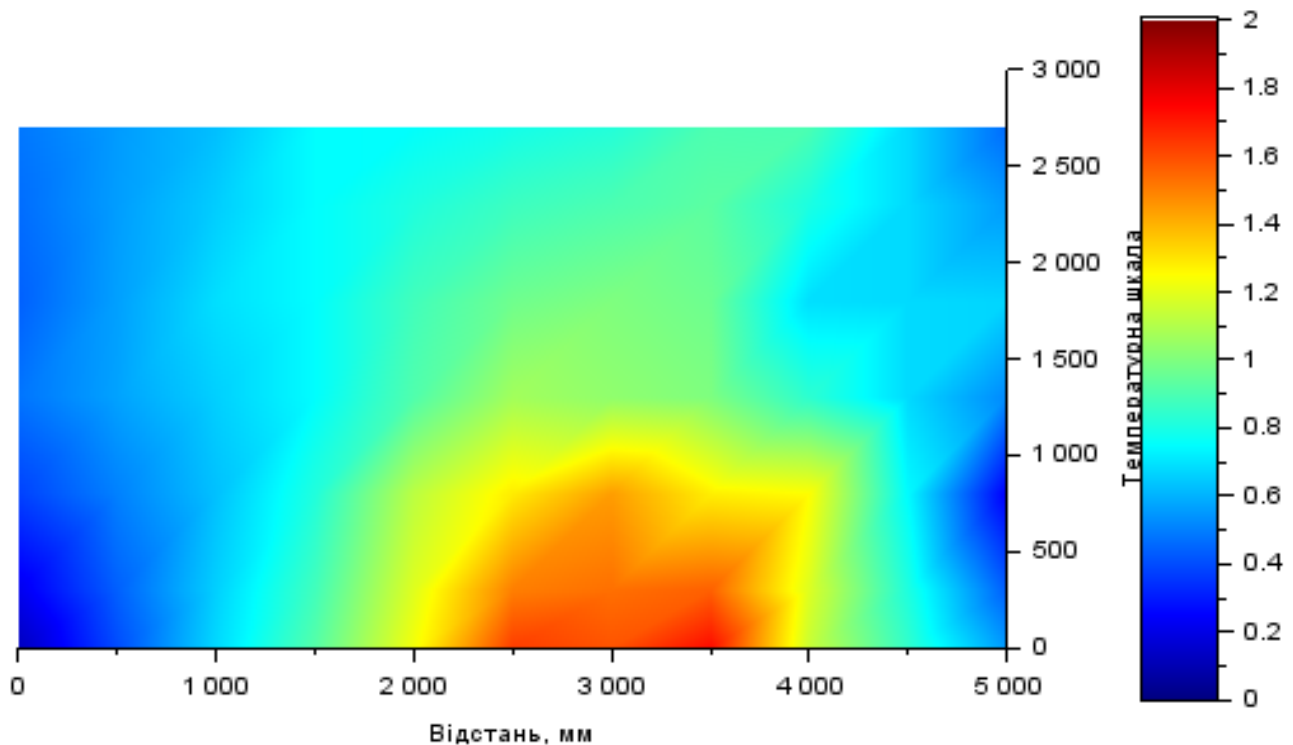


Рис. 1. Термограма опромінення стіни через 45 хв. після ввімкнення електричного інфрачервоного випромінювача: температурна шкала показує нагрів у °С окремих частин стіни відносно їхньої температури, °С, у початковий момент часу

В інженерній практиці вирішення подібних питань досягається за рахунок:

- застосування чисельних методів;
- проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах з подальшим перенесенням отриманих результатів на реальний об'єкт за допомогою теорії подібності.

Обидва методи мають свої позитивні та негативні сторони. Проведення експериментальних досліджень дозволяє найбільш точно описати теплофізичні процеси, проте вимагає значних затрат часу та грошей на їхнє проведення. Натомість, чисельні методи дозволяють суттєво знизити витрати на проведення розрахунків. Однак, отримані результати на відміну від експериментальних даних не висвітлюють реальні процеси, а лише надають деяке наближення до них. Тим не менш, можливо досягти допустимого відхилення від теплофізичного експерименту при виконанні умов:

- виборі (за наявності) адекватної математичної моделі;
- раціональному розбитті досліджуваного простору розрахунковою сіткою;
- правильному заданні граничних умов;
- виконанні коректних спрощень.

Таким чином, складність проведення розрахунків за допомогою чисельних методів полягає в правильному виборі та налаштуванні розрахункового пакету програм під даний конкретний теплофізичний процес. У більшості випадків це відбувається ітераційним шляхом та методом спроб і помилок. При цьому проводиться верифікація з експериментальними даними, отриманими під час лабораторних досліджень або моніторингу побудованих об'єктів. Метою є знаходження таких налаштувань, за яких досягається прийнятна точність розрахунків за якомога коротший проміжок часу.

При теплофізичному моделюванні параметрів мікроклімату з урахуванням променевого впливу внутрішніх огорожень та опалювальних приладів слід зважати на перебіг двох фізичних процесів, які впливають один на одного:

- течія стисливої рідини (повітря), що перш за все обумовлена дією сил гравітації, та різницею потенціалів теплофізичних параметрів (температури, тиску, концентрацій компонентів в повітряній суміші, тощо);
- променевий теплообмін між твердими тілами.

Більшість сучасних програмних пакетів об-

числювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamic – CFD) для проведення теплофізичних розрахунків дозволяють виконувати розрахунки течії стисливої рідини окремо або в поєднанні з променевим теплообміном. Також можливо отримання розв'язку нестационарної постановки зазначеної задачі. Це актуально при дослідженні мікроклімату приміщень, у яких встановлені опалювальні прилади періодичної дії. Однак, додаткове врахування променевого теплообміну та нестационарної постановки задачі збільшить час розрахунків у середньому у 2...3 рази. Це обмежує можливості використання даного методу в практичній інженерній діяльності.

Окрім зазначеного, у більшості пакетів обчислювальної гідродинаміки при розрахунках променевого теплообміну повітря розглядається як абсолютно прозоре середовище, хоча це не відповідає дійсності. Наявність триатомних газів (вуглекислого газу та водяної пари) у складі повітря зумовлюють часткове поглинання та подальше випромінювання окремих частин спектра повітряними об'ємами. Наявність пилу спричиняє розсіювання енергії випромінювання. Таким чином, будь-яке теплофізичне моделювання дає лише наближені розв'язки і не в змозі охопити всі особливості протікання реальних процесів.

Основні ідеї для створення методики були закладені при проведенні авторських експериментальних досліджень [4], а також при обробці наукових робіт, що безпосередньо пов'язані з питаннями оцінки параметрів мікроклімату опалюваних приміщень з використанням технологій обчислювальної гідродинаміки [6-9].

Формулювання цілей статті. Основними завданням даної роботи є розробка методики для дослідження теплового комфорту в приміщенні за рахунок використання теплофізичного моделювання повітряних потоків в опалюваному приміщенні за допомогою модуля buoyantPimpleFoam у складі пакета OpenFOAM та експериментальних даних про опромінення внутрішніх огорожувальних конструкцій. Дана методика дозволить максимально скоротити час, необхідний для проведення розрахунків, і одночасно забезпечити достатнє наближення до реального перебігу процесів.

Основна частина. Як було зазначено раніше, при теплофізичному моделюванні параметрів мікроклімату з урахуванням променевого впливу внутрішніх огорожень та опалювальних приладів слід урахувати два фізичні процеси:

- течію стисливої рідини;
- променевий теплообмін.

Нижче представимо диференціальну систему рівнянь, що описує нестационарний процес течії стискуваної рідини з урахуванням променевого перенесенням теплових потоків, що зазнають розсіювання та згасання при їхньому поширенні в повітряному середовищі. Ця система поєднує рівняння з робіт [5,7,14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Dt}{\partial \tau} = a \nabla^2 t; \\ \frac{Dw}{\partial \tau} = -g \beta^* v - \frac{1}{\rho} \nabla (p - p_0) + v \nabla^2 w; \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla (\rho w) = 0; \\ \frac{dI(r, s)}{ds} = -\beta(r) \cdot I(r, s) + k(r) \cdot I_{\text{АЧТ}}(r) + \\ + \frac{\sigma(r)}{4\pi} \int_{\Omega} I(r, s') \Phi(s', s) d\Omega'; \\ \beta(r) = \sigma(r) + k(r), \end{array} \right. \quad (1)$$

де t – температура, °C; ∇^2 – оператор Лапласа; τ – час, с; a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; w – швидкість повітря, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; β^* – коефіцієнт об'ємного розширення повітря, К⁻¹; v – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с; ρ – густина повітря, кг/м³; ∇ – оператор градієнта; $(p - p_0)$ – різниця між дійсним і гідростатичним тиском в повітряному потоці, Па; $I(r, s)$ – інтенсивність випромінювання, Вт/м²; $I_{\text{АЧТ}}(r)$ – інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²; r – радіус вектор, м; s – кутовий напрямок; $\beta(r)$ – коефіцієнт згасання; $\sigma(r)$ – коефіцієнт розсіювання, м; $k(r)$ – коефіцієнт поглинання, м; Ω – тілесний кут, ср; Φ – індикатриса розсіювання.

Система рівнянь (1) дає найбільш повний теплофізичний опис процесів, що протікають в опалюваному приміщенні. Однак, проведення розрахунків у даній математичній постановці занадто вимогливе до комп'ютерного обладнання і потребує значного часу на його виконання.

Розглянемо частину системи диференціальних рівнянь (1), що відповідає за перенесення теплових потоків випромінюванням. При розрахунку параметрів мікроклімату в першу чергу слід отримати температурні поля на поверхні опалювального приладу та внутрішніх огороженнях, що нагрілися при їхньому опроміненні (див. рис.1). Ці поля будуть впливати на радіаційну температуру в примі-

щенні. Тому доцільно замінити розв'язання складного диференціального рівняння певною залежністю, яка би описувала дані температурні поля. Для отримання цієї залежності на поверхні стіни слід урахувувати основні фактори, що впливають на перенесення теплового потоку випромінюванням, а саме:

- модель опалювального приладу;
- відстань від стіни до паралельно розташованого опалювального приладу;
- концентрація водяної пари, вуглекислого газу та пилу в повітрі.

Концентрація вуглекислого газу та пилу в громадських і житлових приміщеннях є умовно сталою величиною. Тому доцільно вважати, що вплив даних факторів уже закладений в результати досліджень. Остаточна шукана емпірична залежність для кожного типу опалювального приладу набуває вигляду:

$$\bar{t}_F = f(\ell, x, y, d, \tau), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

де \bar{t}_F – середня температура поверхні, °C; ℓ – відстань від стіни до паралельно розташованого опалювального приладу, м; x, y – координати на поверхні стіни, м; d – вологовміст, г/кг.

Далі розглянемо аеродинамічну частину системи (1) диференціальних рівнянь (без рівняння перенесення радіаційних потоків). Розрахункові пакети, що виконують прямий розв'язок подібних систем рівнянь відомі як Direct Numerical Simulation (DNS) solvers і на даний момент є прерогативою лише окремих видів наукових досліджень [10]. Для інженерних розрахунків аеродинамічна частина системи рівнянь (1) спрощується. На даний момент є два основних підходи (інші є похідними або гібридними) до спрощення цієї системи рівнянь:

- розв'язання усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation – RANS)
- моделювання великих вихорів (Large-Eddy Simulation – LES).

Метод RANS базується на декомпозиції компонентів вихідного рівняння на усереднену та флуктуаційну частини. Це спрощує систему рівнянь, але потребує додаткового математичного опису моделі турбулентності. Найбільш розповсюдженими є k - ϵ та k - ω моделі.

Метод LES розраховує флуктуаційну частину напряму, але ігнорує вихори, розміри яких є меншими ніж розмір розрахункової сітки. Такий підхід дає результати, близькі до DNS моделювання, за умов додаткового моделюван-

ня вихорів з використанням низькодисипативних схем в областях потоку, що контактують з твердими тілами. За складністю обчислень та точністю отриманих результатів метод LES займає проміжне положення між DNS та RANS.

Для моделювання течії стисливої рідини пропонується використовувати модуль `buoyantPimpleFoam`, що входить до складу програмного пакету `OpenFOAM` і добре себе зарекомендував у дослідженнях пов'язаних з оцінкою мікроклімату в приміщеннях [11]. Система диференціальних рівнянь модуля `buoyantPimpleFoam` дозволяє вирішувати задачі нестационарної турбулентної течії стискуваної рідини. Даний модуль використовує спрощення Буссинеска-Обербека. Головною ідеєю є те, що залежність густини рідини від температури враховується лише в члені, що враховує силу тяжіння. Для всіх інших членів густина приймається сталою величиною визначеною за деякою характерною температурою. Слід зазначити, що дане спрощення допустимо приймати лише за умови малих перепадів температур рідини. Оскільки в переважній більшості приміщень перепад температури повітря не перевищує 2...3 °С, дане припущення є прийнятним. Математична модель у модулі `buoyantPimpleFoam` [12, 13]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \nabla(\rho w h) + \frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \nabla(\rho w k) - \frac{\partial \rho}{\partial \tau} &= \\ &= \nabla(a_{ef} \nabla h) + \rho w g; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \nabla(\rho w w) &= -\nabla p + \rho g + \\ &+ \nabla(2\mu_{ef} D(w)) - \nabla\left(\frac{2}{3}\mu_{ef}(\nabla w)\right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho w) &= 0; \\ k &= \frac{|w|^2}{2}; \\ a_{ef} &= \frac{\rho \nu_m}{Pr_m} + \frac{\lambda}{C_p}; \\ \mu_{ef} &= \mu + \mu_m; \\ D(w) &= \frac{1}{2}(\nabla w + (\nabla w)^T), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

де h – ентальпія, Дж/(кг·К); k – питома кінетична енергія, Дж/кг; p – тиск, Па; a_{ef} – ефективна теплова дифузія, кг/(с·м); ν_t – коефіцієнт турбулентної кінематичної в'язкості, м²/с; Pr_m – турбулентне число Прандтля; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); C_p – питома ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); μ_{ef} – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; μ , μ_m – фізичний та турбулентний коефіцієнт динамічної в'язкості відповідно, Па·с; $D(w)$ – тензор швидкості деформації, м/с².

Висновки. Оцінка мікроклімату за допомогою методики, що використовує теплофізичне моделювання повітряних потоків у поєднанні з експериментальними даними про опромінення внутрішніх огорожувальних конструкцій та даними про температурні поля на поверхні опалювальних приладів дозволяє мінімізувати час та вимоги до комп'ютерної техніки для проведення розрахунків і може бути застосована в практичній інженерній діяльності.

Перспективи подальших досліджень. Необхідно провести верифікацію поданої методики з повноцінними експериментальними дослідженнями, а також обґрунтовано вибрати налаштування модуля `buoyantPimpleFoam`, що будуть забезпечувати проведення розрахунків з точністю, прийнятною для оцінки параметрів мікроклімату приміщень різного призначення і одночасно не будуть занадто вимогливими до оснащення комп'ютерної техніки і дозволить отримувати результати за адекватний період часу.

Література

1. Fabbri K. Indoor Thermal Comfort Perception / K. Fabbri. – Cesena: Springer, 2015. – xi.301 p.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинні від 01.01.2014. – Київ: Укрархбудінформ, 2013. – V, 141 с.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): навч. посіб. / В. Н. Богословский. – Москва: Высшая школа, 1982. – 415 с.

4. Приймак О. В. Экспериментальна оцінка мікроклімату приміщення, що опалюється комбінованим використанням електричного випромінювача та секційного опалювального приладу / О. В. Приймак, М. Д. Очеретянко // Энергоэффективность в строительстве та архітектурі: Наук.-техн. зб. – 2019. – №12. С.50-56.
5. Полежаев В. И. Математическое моделирование тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Верезуб. – Москва.: Наука, 1987. – 272 с.
6. Архангельская Л. А. Использование метода глобальных итераций по давлению для решения уравнений Навье-Стокса / Л. А. Архангельская, Л. И. Скурин // Вестник СПбГУ. – Сер. 1. – 1994. – Вып. 3. – с. 70-75.
7. Бухмиров В. В. Математическое моделирование микроклимата в помещении общественного здания / В. В. Бухмиров, А. К. Гаськов // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов II Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.). – 2018. – с. 33-37.
8. Юн А. А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе FASTEST-3D: учебное пособие / А. А. Юн, Б. А. Крылов. – Москва: МАИ, 2007. – 116 с.
9. Попов М. И. Приближенное аналитическое решение внутренней задачи кондуктивно-ламинарной свободной конвекции / М. И. Попов, Е. А. Соболева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 4. – с. 78-84.
10. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications / J. Blazek. – Elsevier Science Ltd., Kidlington. – 2001.
11. Peltola J. Validation and Adaptation of OpenFOAM® Solvers for Heat Transfer and Bubbly Two-phase Flows / J. Peltola, T. Pättikangas. – CSC, Espoo, 2011.
12. Fumiya Nozaki's. buoyantPimpleFoam and buoyantSimpleFoam in OpenFOAM. CFD Blog. <https://caefn.com/openfoam/solvers-buoyantpimplefoam>. Accessed 7 June 2019.
13. Energy Equation in OpenFOAM. CFD Direct: веб-сайт. URL: <https://cfdirect.com/openfoam/energy-equation>. Accessed: 07.06.2019.
14. Siegel R. Thermal radiation heat transfer / R. Siegel, J. R. Howell – Washington.: Hemisphere publishing corporation, 1992. – 1088 с.

References

1. Fabbri K. *Indoor Thermal Comfort Perception*. Springer, 2015
2. *Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia*. DBN V.2.5-67:2013, Ukrarkhbuildinform, 2013.
3. Bohoslobvskii V. N. *Stroitelnaia teplofizika Teplofizicheskie osnovy otopleniia, ventilyatsii i konditsionirovaniia vozdukhha*. Visshaia shkola, 1982.
4. Pryimak O. V., Wesolowski M., Ocheretianko M. D. “Eksperymentalna otsinka mikroklimatu prymyshchennia, shcho opaliuetsia kombinovanim vykoristanniam elektrychnoho vyprominiuvacha ta sektsiinoho opaliuvalnogo prykladu.” *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Nauk.-tekhn. zb.*, 2019. №12. P. 50-56.
5. Polezhaev V. I., Bunie A.V., Verezub N.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplomassoobmena na osnove uravnenii Nave-Stoksa*. Nauka, 1987.
6. Arkhangel'skaya L. A., Skyrin L.I. “Ispolzovanie metoda globalnykh iteratsii po davleniiu dlia reshenia uravnenii Nave-Stoksa.” *Vestnik SpbGU*. Ser. 1. 1994. Vyp. 3. P. 70-75.
7. Bykhmirov V. V. “Matematicheskoe modelirovanie mikroklimata v pomeshchenii obshchestvennogo zdaniia.” *Sovremennyye nauchnyie dostizheniia metallurgicheskoi teplotehniki i ikh realizatsiia v promyshlennosti: sbornik dokladov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 18–21 sentiabria 2017*. 2018. pp. 33-37.
8. Yun A. A., Krylov B. A. *Raschet i modelirovanie turbulentnykh techenii s teploobmenom, smesheniem, khimicheskimi reaktsiiami i dvukhfaznykh techenii v programnom komplekse FASTEST-3D*. MAI, 2007.
9. Popov M. I., Soboleva E. A. “Priblizhennoe analiticheskoe reshenie vnutrennei zadachi konduktivno-laminarnoi svobodnoi konveksii.” *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*, 2016. № 4. P. 78-84..
10. Blazek J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier Science Ltd., Kidlington, 2001.
11. Peltola J., Pättikangas T. “Validation and Adaptation of OpenFOAM® Solvers for Heat Transfer and Bubbly Two-phase Flows”, *OpenFOAM User's Day*, 17.5.2011, CSC, Espoo, 2011.
12. Fumiya Nozaki's “buoyantPimpleFoam and buoyantSimpleFoam in OpenFOAM” *CFD Blog*. <https://caefn.com/openfoam/solvers-buoyantpimplefoam>. Accessed 7 June 2019.
13. Energy Equation in OpenFOAM. *CFD Direct*. <https://cfdirect.com/openfoam/energy-equation>. Accessed 7 June 2019.
14. Siegel R., Howell J. R. *Thermal radiation heat transfer.*, Washington.: Hemisphere publishing corporation, 1992.

УДК 628.882

Разработка методики исследования микроклимата отапливаемого помещения с применением теплофизического моделирования и экспериментальных данных

А. В. Приймак¹, Н. Д. Очеретянко², А. М. Винтонив³

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02oprymak@gmail.com,
ORCID:0000-0002-3081-6057

²асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина nikita.ocheretyanko@gmail.com,
ORCID:0000-0001-6906-7180

³асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, m_vintoniv@icloud.com,
ORCID:0000-0003-2127-1224

Аннотация. Исследование комфортных условий микроклимата в помещениях различного назначения остаётся актуальной темой. Оно позволяет спроектировать здание таким образом, чтобы обеспечить комфортное пребывание людей и вместе с этим избежать чрезмерных перерасходов энергетических ресурсов. В данной работе предлагается новая методика исследования параметров микроклимата помещения, сочетающая теплофизическое моделирование воздушных потоков с помощью компьютерного пакета программ OpenFOAM и экспериментальные данные об облучении внутренних ограждений комнаты. Исследование микроклимата по данной методике позволит снизить вероятность проявления локального дискомфорта в отдельных частях помещения за счёт использования численных методов. Вместе с этим обеспечивается адекватная скорость расчётов за счёт замены моделирования радиационного переноса тепловых потоков экспериментальными значениями температуры внутренних ограждений во времени.

Ключевые слова: микроклимат помещения, теплофизическое моделирование, радиационный теплообмен, системы отопления, OpenFOAM.

UDC 628.882

Development of a Method for Heating Room Indoor Microclimate Study which Includes Thermophysical Modelling and Experimental Data

A. Pryimak¹, N. Ocheretianko², A. Vintoniv³,

¹Sc.D, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02oprymak@gmail.com,
ORCID:0000-0002-3081-6057

²Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, nikita.ocheretyanko@gmail.com,
ORCID:0000-0001-6906-7180

³Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, m_vintoniv@icloud.com,
ORCID:0000-0003-2127-1224

Abstract. Research on behalf of comfort indoor microclimate conditions in premises with different assignment is still relevant, as soon as it helps to design of buildings in a way that ensure comfortable occupancy for people and eliminate unnecessary energy excesses. Nowadays, comfort conditions are estimated with PMV, PPD and local PD indices, which, in turn, calculated from local thermal parameters such as air temperature [°C], relative humidity [%], air velocity [m/s], the temperature of solid bodies [°C] and turbulence intensity [%]. All above-mentioned local thermal parameters can only be calculated through Computational Fluid Dynamics (CFD) technology. This article provides a system of differential equations that fully govern indoor microclimate thermophysical processes (air-flow convection and solid body radiation) and explains the possibility of its simplifications for practical engineering applications. A new methodology is proposed for indoor microclimate study, which combines air flow thermophysical simulation in OpenFOAM software and experimental data for thermal radiation. For air-flow simulation, it is suggested to use buoyantPimpleFoam solver (governing differential equations system is provided), which shows good results. Experimental data should be obtained in series of laboratory test for every single heating device with following variable parameters: distance from the wall to parallel positioned heating device [m], time [s], the concentration of water vapour and dust in the air. Implementation of this methodology will reduce the likelihood of local discomfort in every single part of a room due to precise numerical computation of air-flows while ensuring an adequate calculation rate replacing differential equation for radiative heat transfer with experimental data that represents time-dependent temperature [°C] of internal enclosures.

Keywords: indoor microclimate, thermophysical simulation, radiation heat exchange, heating systems, OpenFOAM.

Надійшла до редакції / Received 07.10.2020