

Хованський С. О.,  
Колісниченко Е. В.,  
Панченко В. О.

## РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПРИМІЩЕНЬ

Проведено моделювання аеродинамічних та тепломасообмінних процесів у приміщенні, на основі розробленої розрахункової моделі його теплового стану за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Здійснено дослідження впливу нестационарних процесів у внутрішньому об'ємі приміщення на його загальний тепловий стан. Отримані залежності зміни температури від часу прогрівання приміщення.

**Ключові слова:** теплозабезпечення, моделювання, тепловий стан приміщення.

### 1. Вступ

На сьогоднішній день актуальною задачею для України є забезпечення підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, в тому числі і теплової енергії. Згідно даних [1] Україна виробляє 53 % енергії від загальної потреби, імпортує 75 % необхідного обсягу природного газу та 85 % сирової нафти і нафтопродуктів. Майже 30 % всієї одержуваної теплової енергії в Україні використовують приватні домовласники, при цьому більше 80 % цієї енергії витрачається на опалення приміщень [1]. Забезпечення в приміщеннях будівлі певного теплового режиму передбачає узгодження взаємодіючих і взаємопов'язаних теплових потоків у складній архітектурно-конструктивній системі, яка характеризується різноманіттям складових її елементів огорожувальних конструкцій та інженерного обладнання, причому кожна з цих складових може бути як енергоносієм, так і енергопередавачем. Принциповою особливістю даної системи є те, що будівля як єдина енергетична система представляє не просто сукупність цих елементів, а певне їх поєднання, що додає всій системі в цілому нових якостей, відсутніх у кожного окремого елемента [2]. Вирішення задачі підвищення ефективності використання теплової енергії вимагає врахування великої кількості факторів і потребує удосконалення методів оцінювання та контролю рівня ефективності функціонування систем теплозабезпечення.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В даний час для побудови та реалізації математичних моделей складних енергетичних об'єктів, до яких може бути віднесена будівля, використовується методологія системного підходу [3]. Декомпозиція будівлі як єдиної енергетичної системи може бути представлена трьома основними енергетично взаємопов'язаними підсистемами [4]: енергетичним впливом зовнішнього клімату на оболонку будівлі; енергією, що міститься в оболонці будівлі, тобто в зовнішніх огорожувальних конструкціях будівлі; енергією, що міститься всередині об'єму будівлі (у внутрішньому повітрі, внутрішньому обладнанні, внутрішніх огорожувальних конструкціях тощо). Отже математична модель будівлі як єдиної енер-

гетичної системи буде складатися з трьох підмоделей: математичної моделі зовнішнього клімату, математичної моделі теплопередачі через оболонку будівлі та математичної моделі променистого і конвективного теплообміну у приміщеннях будівлі [5]. Моделі теплового режиму використовуються для розрахунку термодинамічних параметрів будівельних конструкцій з урахуванням теплопровідних включень, вологісного стану, оцінки теплоспоживання, вибору оптимальної теплоізоляції [6]. Але повне врахування зазначених факторів призводить тільки до ускладнення розрахунків, тому для моделей застосовують спрощення та припущення [7].

Першим етапом впровадження системи збереження теплової енергії в будівлях є енергетичний аудит, який, передусім, передбачає проведення значної кількості трудомістких вимірювань, розрахунків, порівняння різних варіантів та вибору найбільш раціонального. Проведення таких робіт передбачає наявність дорогого обладнання для вимірювань і може супроводжуватися труднощами, а іноді, навіть, неможливістю проведення вимірювань та технічних розрахунків [8]. Тому, у світовій практиці широко використовується чисельне комп'ютерне моделювання, яке дозволяє розглянути значну кількість варіантів під час проектування та обрати оптимальний із точки зору енергоефективності, комфорту та безпеки [7]. Також даний метод дозволяє змоделювати вже існуючий об'єкт, оцінити його ефективність роботи та знайти шляхи модернізації.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Проведений аналітичний огляд тенденцій розвитку, технічного рівня систем теплозабезпечення дозволив сформулювати *мету даної роботи* – підвищення ефективності використання теплової енергії будівель на основі аналізу їхніх теплових режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичні та чисельні моделі теплового стану приміщення;
- провести моделювання процесів аеродинаміки та тепломасообміну в будівлях та/або їх окремих елементах для аналізу теплового стану будівель;
- на основі розробленої моделі оцінити тепловий стан приміщення;

– дослідити вплив нестационарних процесів у внутрішньому об'ємі приміщення на його загальний тепловий стан.

Об'єктом дослідження є термодинамічні параметри теплового стану приміщення, яке обігрівается опалювальними приладами радіаційно-конвективного типу.

#### 4. Матеріали та методи дослідження теплового стану приміщень

Для досягнення поставленої мети використовувалася програмний комплекс ANSYS CFX університетської ліцензії (дослідження проводилися у Сумському державному університеті). Для проведення чисельного експерименту була створена тривимірний модель приміщення, наближена до реальних умов, з габаритними розмірами (10×6×3 м). При цьому враховувалася наявність меблів (шафи, дивану, стола, книжкової полиці, тумбочки), вікон (1,6×1,4 м), дверей (2,1×0,9 м) та опалювальних приладів. Під час створення тривимірної моделі приймалися наступні спрощення (ідеалізація моделі): не враховувалася вплив дрібних об'єктів інтер'єру, не враховувалася наявність підвіконня та підводів до опалювальних приладів. У якості опалювальних приладів було спроектовано два восьмисекційні опалювальні прилади радіаційно-конвективного способу передачі теплоти.

Розрахунковою областю в даній розрахунковій задачі є внутрішній об'єм у приміщенні, який займає повітря (рис. 1), виключаючи його заповнення об'єктами (меблями, опалювальними приладами). При створенні розрахункової області були виділені дві характерні зони: роз'ємна зона вікна та зовнішніх дверей. Відокремлення цих зон пов'язано з тим, що вихідні дані для них відрізняються порівняно з іншими місцями розрахункової області.

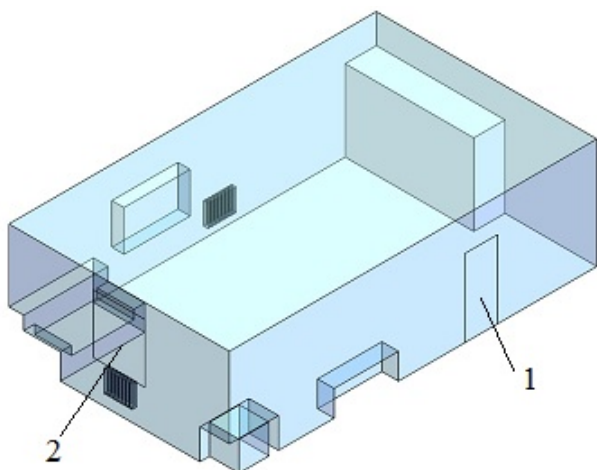


Рис. 1. Розрахункова область: 1 – роз'ємна зона зовнішніх дверей; 2 – роз'ємна зона вікна

Для отриманої розрахункової області була побудована блочно-структурована гексаедрна сітка, яка нараховувала 1,7 мільйонів комірок. Вибір такого типу сітки пояснюється тим, що дана геометрична модель розрахункової області представляє собою сукупність достатньо правильних елементарних об'ємів, для яких прийнятна впорядкована блочна структура [9].

Для математичного визначення поставленої задачі задавалися умови однозначності (крайові умови), що містять: геометричні умови, які характеризують фор-

му і розміри розрахункової області; фізичні умови, які характеризують фізичні властивості тіла (густина, в'язкість, теплопровідність тощо); часові умови, які формують особливості перебігу процесу в часі (задаються для нестационарного процесу); граничні умови, що характеризують умови протікання процесу на кордонах розрахункової області [10]. У якості граничних умов задавалися граничні умови першого роду (розподіл температур на поверхні твердих стінок розрахункової області). Температура стелі, підлоги та стін приймалася 18 °С, опалювальних приладів – 45 °С, вікон і дверей – 15 °С.

Для вирішення задачі використовувалася модель теплообміну в постановці (Thermal Energy) [10], що включає сукупність транспортних рівнянь нерозривності, імпульсу, повної енергії. Під час розрахунку використовувалася модель гравітації, яка дозволяє врахувати процес вільної (природної) конвекції в замкнутому об'ємі, що обумовлена дією масових (об'ємних) сил. Модель переміщення повітря в розрахунковій області описувалася рівняннями Нав'є-Стокса осередненими за числом Рейнольдса.

#### 5. Аналіз результатів чисельного моделювання теплового стану приміщення

В результаті чисельного дослідження теплового стану приміщення були отримані основні термодинамічні параметри в розрахунковій області. На рис. 2 наведений розподіл температур в об'ємі приміщення (стан теплової рівноваги).

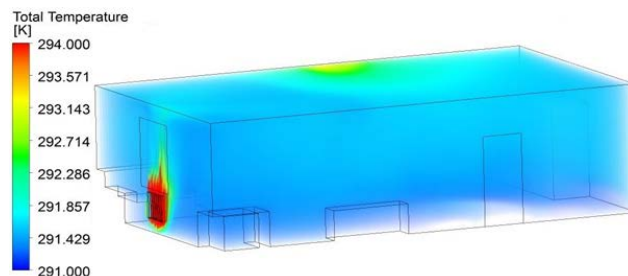


Рис. 2. Розподіл температури по об'єму приміщення

Аналіз отриманих даних показує: по-перше, температура повітря зростає з висотою приміщення, що обумовлено термогравітаційною конвекцією; по-друге, температура повітря знижується поблизу твердих стінок, що мають порівняно нижчу температуру (вікно, стеля, стіни).

Розподіл температури в об'ємі приміщення тісно пов'язаний із характером руху повітря, його швидкістю, зонами вихроутворення тощо. Аналіз розподілу швидкостей руху повітря в об'ємі приміщення в стаціонарному режимі (рис. 3) свідчить про існування застійних зон, в яких швидкість повітря знаходиться в межах 0...0,1 м/с, що в свою чергу є причиною тривалого прогрівання приміщення. В реальних умовах опалювальні прилади частково можуть бути загороджені декоративними панелями, меблями, елементами декору, що призводить до зниження швидкості руху повітря від опалювальних пристроїв та погіршення умов теплообміну у приміщенні в цілому.

Розподіл температур повітря з висотою приміщення є також нерівномірним (рис. 4). По висоті приміщення можна виділити декілька температурних зон, розміри

та параметри яких обумовлюються впливом окремих конструктивних елементів та часом прогрівання приміщення.

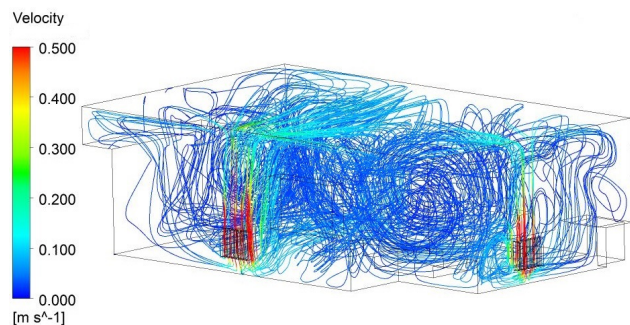


Рис. 3. Розподіл швидкостей руху повітря в об'ємі приміщення

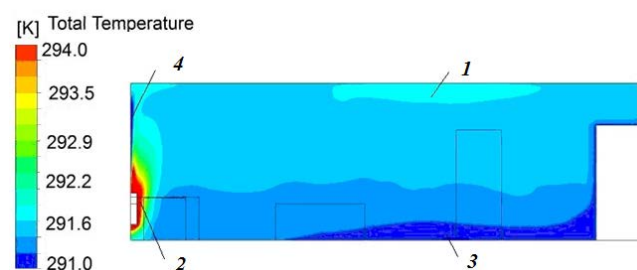


Рис. 4. Розподіл температури з висотою приміщення:

1, 2 – зона впливу опалювальних приладів; 3 – зона впливу вхідних дверей; 4 – зона впливу віконного отвору

Моделювання теплового стану приміщення здійснено також у нестационарній постановці задачі, тобто були отримані основні термодинамічні параметри в розрахунковій області під час прогрівання приміщення. Залежність осередненої по об'єму приміщення температури від часу прогрівання приміщення (рис. 5) можна апроксимувати логарифмічною залежністю типу:

$$T^V = C \cdot \ln(\tau) + T_n^V, \quad (1)$$

де  $T^V$  – осереднена по об'єму температура повітря в приміщенні в момент часу прогрівання  $\tau$ , К;  $C$  – константа, що залежить від геометричних розмірів приміщення;  $\tau$  – час прогрівання приміщення, с;  $T_n^V$  – осереднена по об'єму температура в приміщенні до початку його прогрівання, К.

Для досліджуваного об'єкту залежність (1) набуває вигляду  $T^V = 0,0586 \cdot \ln(\tau) + 291,25$  (достовірність апроксимації складає  $R^2 = 97,42\%$ ).

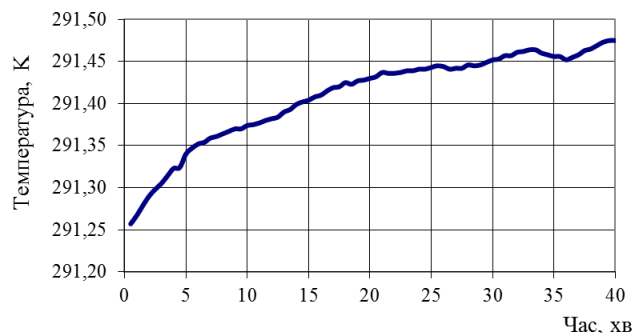


Рис. 5. Прогрівання приміщення у часі

За допомогою розробленої моделі можна оцінювати дотримання санітарно-гігієнічних норм і забезпечення умов для комфортної життєдіяльності людей, а також спрогнозувати найбільш доцільний варіант проектування системи опалення з точки зору енергоефективності. Також отримані результати та подальші дослідження нестационарних процесів прогрівання приміщень можуть бути в майбутньому використані під час розробки систем автоматичного регулювання систем опалення (чергового опалення, пофасадного опалення тощо).

## 6. Висновки

1. Розроблена розрахункова модель приміщення дозволяє оцінити його тепловий стан, а саме: отримати розподіл температурних полів, полів швидкостей руху повітря; визначити значення теплових потоків на поверхнях конструкцій; встановити наявність застійних зон та зон вихроутворення в процесі прогрівання приміщення.
2. Отримані аналітичні залежності зміни температури від часу прогрівання приміщення дозволяють проводити оцінку дотримання санітарно-гігієнічних норм будівлі та забезпечення умов для комфортної життєдіяльності людей.
3. Розроблена модель дозволяє проводити оцінювання дотримання комфортних умов у приміщенні, здійснювати аналіз теплового балансу приміщення, а також розрахунки ефективності застосування різних енергозберігаючих заходів.

## Література

1. Олехнович, Л. І. Статистичний щорічник Сумської області за 2013 рік [Текст] / за ред. Л. І. Олехнович. – Суми: Головне управління статистики у Сумській обл., 2014. – 568 с.
2. Єнін, П. М. Теплопостачання [Текст]. Ч. 1: Теплові мережі та споруди: навч. посіб. / П. М. Єнін, Н. А. Швачко. – К.: Кондор, 2007. – 244 с.
3. Хованський, С. О. Системний аналіз комплексу подачі і розподілу води в житлово-комунальному господарстві [Текст] / С. О. Хованський, В.Г. Неня // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/4 (46). – С. 56–59. – Режим доступу: \www/URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/29>
4. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
5. Baldvinsson, I. A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method [Text] / I. Baldvinsson, T. Nakata // Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 537–554. doi:10.1016/j.energy.2014.07.019
6. Дешко, В. І. Розробка нестационарної моделі теплового стану огороджень будівлі [Текст] / В. І. Дешко, М. М. Шовкалюк // Вісник СумДУ. Серія: Технічні науки. – 2009. – № 4 – С. 218–225.
7. Rohdin, P. Numerical modelling of industrial indoor environments: A comparison between different turbulence models and supply systems supported by field measurements [Text] / P. Rohdin, B. Moshfegh // Building and Environment. – 2011. – Vol. 46, № 11. – P. 2365–2374. doi:10.1016/j.buildenv.2011.05.019
8. Чернишов, С. О. Математичне моделювання теплового стану приміщень [Текст]: матеріали Науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 14-17 квітня 2015 р. / С. О. Чернишов, С. О. Хо-

ванський // Сучасні технології у промисловому виробництві. – Суми: СумДУ, 2015. – Ч. 2. – С. 96.

9. ANSYS CFX Solver Theory [Electronic resource]. – Release 11.0. – ANSYS, Inc., December 2006. – 302 p. – Available at: \www/URL: <http://product.caenet.cn/Uploadfiles/12872437250986625020081129090050986.pdf>
10. ANSYS CFX Solver Modeling Guide [Electronic resource]. – Release 12.0. – ANSYS, Inc., April 2009. – 486 p. – Available at: \www/URL: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/CFX/xmod.pdf>

#### РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Проведено моделювання аеродинамічних і теплообмінних процесів в приміщенні, на основі розробленої розрахункової моделі його теплового стану з допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Проведено дослідження впливу нестационарних процесів во внутрішньому об'ємі приміщення на його загальне теплове стану. Отримані залежності зміни температури від часу прогріву приміщення.

**Ключевые слова:** теплоснабження, моделювання, теплове стану приміщення.

*Хованський Сергій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра прикладної гідроаеромеханіки, Сумський державний університет, Україна, e-mail: [serg\\_83@ukr.net](mailto:serg_83@ukr.net).*

*Колісниченко Едуард Васильович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра прикладної гідроаеромеханіки, Сумський державний університет, Україна.*

*Панченко Віталій Олександрович, асистент, кафедра прикладної гідроаеромеханіки, Сумський державний університет, Україна.*

-----  
*Хованский Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной гидроаэромеханики, Сумский государственный университет, Украина.*

*Колисниченко Эдуард Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной гидроаэромеханики, Сумский государственный университет, Украина.*

*Панченко Виталий Александрович, ассистент, кафедра прикладной гидроаэромеханики, Сумский государственный университет, Украина.*

-----  
*Khovanskyi Sergey, Sumy State University, Ukraine, e-mail: [serg\\_83@ukr.net](mailto:serg_83@ukr.net).*

*Kolishnichenko Eduard, Sumy State University, Ukraine. Panchenko Vitalii, Sumy State University, Ukraine*