

Сучасні підходи до створення та підтримки мікроклімату в сакральних спорудах: виклики та інноваційні рішення

Володимир Вахула, асистент¹ (ORCID: 0000-0001-7973-6421),
Олексій Дудніков, асистент¹ (ORCID: 0009-0000-2656-2683)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Забезпечення стабільного та керованого мікроклімату в сакральних спорудах становить складну інженерно-культурну задачу, що передбачає необхідність балансування між тепловим комфортом, збереженням елементів культурної спадщини та дотриманням сучасних вимог енергоефективності. У роботі систематизовано наявні підходи до проектування та експлуатації систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) у храмах і соборах з урахуванням їх специфічних архітектурних і режимних особливостей. Наведено порівняльний аналіз ефективності різних типів теплопостачання (конвективних, променевих, підлогових, комбінованих) та систем повітрообміну (природних і механічних), зокрема з урахуванням сезонної динаміки експлуатаційного навантаження. Визначено критичні чинники ризику для збереження внутрішнього оздоблення (конденсація, біокорозія, осідання сажі) та обґрунтовано доцільність застосування інноваційних технічних рішень: електроосмотичного осушення, локалізованої вентиляції, високоефективних ізоляційних матеріалів.

Ключові слова: сакральна архітектура, мікроклімат, опалення, вентиляція, збереження культурної спадщини, CFD-моделювання, енергоефективність, конденсація, аеродинаміка.

ВСТУП

Забезпечення належного мікроклімату в сакральних спорудах, таких як православні храми та собори, є складним багатограним завданням. Ці об'єкти характеризуються унікальними архітектурними особливостями: великим внутрішнім об'ємом, значною висотою, масивною конструкцією та специфічним режимом експлуатації з періодами низької та високої відвідуваності. Основна мета полягає в досягненні балансу між трьома ключовими аспектами: створенням теплового комфорту для парафіян, збереженням культурної спадщини (фресок, ікон, дерев'яних артефактів, органів) та дотриманням сучасних вимог енергоефективності. Неправильно спроектовані системи опалення та вентиляції можуть призвести до непоправної шкоди, зокрема до конденсації вологи, біологічної корозії, руйнування фресок через осідання сажі та деформації дерев'яних елементів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізувати та систематизувати сучасні методи та інженерні рішення для оптимізації систем опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК) у сакральних спорудах різного типу на основі наявних теоретичних, експериментальних та практичних даних.

Методи дослідження Аналіз базується на результатах, отриманих за допомогою комплексу методів, що включають:

- Числове моделювання (CFD) для аналізу повітряних потоків, розподілу температур та вологості при різних сценаріях опалення та вентиляції [4].

- Натурний моніторинг мікрокліматичних параметрів (температура повітря, відносна вологість, температура поверхні) за допомогою сучасних приладів для оцінки реального стану об'єктів та ефективності впроваджених заходів.

- Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі на фізичних моделях храмів для визначення аеродинамічних коефіцієнтів, необхідних для розрахунку природної вентиляції (аерації).

- Розрахунок енергетичних показників (первинної, кінцевої та корисної енергії) для оцінки ефективності запропонованих заходів з термомодернізації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Системи опалення: Аналіз різних систем опалення показав їхні переваги та недоліки в контексті сакральних будівель.

- Традиційні конвективні системи (статичні радіатори) часто призводять до нерівномірного розподілу температури, інтенсивних конвективних потоків, що спричиняють заповнення стін та фресок сажею від свічок, та низької відносної вологості, шкідливої для дерев'яних елементів [2].

- Теплоповітряні системи дозволяють швидко досягти комфортних параметрів, але можуть посилювати проблеми з осіданням сажі та пересушуванням повітря, якщо не поєднуються з системами зволоження та фільтрації.

- Підлогове опалення забезпечує високий рівень теплового комфорту ("теплі ноги"), рівномірний прогрів та естетично прийнятним ("невидима" система). Однак при переривчастому режимі роботи може викликати руйнування кладки через цикли кристалізації солей та надмірне зниження вологості.

- Промєневе опалення (газове або електричне) є ефективним для локального обігріву зон перебування людей, що дозволяє економити енергію при низькій відвідуваності.

У великих соборах також набувають поширення комбіновані рішення із застосуванням **геотермальних систем** та **теплових насосів повітря-вода**, які дозволяють підтримувати базовий рівень температури без різких коливань. Такі системи мають високий коефіцієнт ефективності (COP > 3) і забезпечують зниження кінцевої

енергії споживання, хоча первинна енергія може залишатись високою через електричну складову живлення

- Комбіновані системи виявляються найбільш ефективними для великих соборів. Наприклад, у Кафедральному соборі в Бухаресті застосовано базове променеве опалення для підтримки температури $+12^{\circ}\text{C}$ та пікове конвективне опалення для швидкого підняття температури до $+18^{\circ}\text{C}$ під час богослужінь [1].

2. Вентиляція та якість повітря: Правильно організований повітрообмін є ключовим для видалення надлишкової вологи, продуктів горіння свічок (CO_2 , сажа) та тепловиділень від людей.

- Природна вентиляція (аерація) є традиційною, але її ефективність нестабільна і сильно залежить від зовнішніх умов (напрямку та сили вітру, температури). Для її розрахунку необхідно знати аеродинамічні коефіцієнти будівлі, які визначаються шляхом продування моделей в аеродинамічній трубі.

- Механічна вентиляція, особливо з регульованою подачею повітря (VAV), є обов'язковою для великих соборів, будівель з підземними рівнями та в умовах забрудненого міського повітря, яке потребує фільтрації.

- Запропоновано ефективні локальні рішення, такі як місцева вентиляція у вежах для усунення конденсату, що особливо дієво в поєднанні з теплоповітряним опаленням. У дуже високих приміщеннях ефективною є дифузія повітря "зверху-вниз" за допомогою спеціальних сопел [3].

3. Збереження конструкцій та предметів мистецтва: Головною загрозою є конденсація вологи на холодних поверхнях (вікна, стіни, куполи), що призводить до біопшкоджень, корозії та руйнування оздоблення.

- Проблема надмірної вологості стін, особливо у старовинних будівлях, пропонується вирішувати за допомогою інноваційного методу електроосмотичного осушення, який обов'язково має поєднуватися з ефективною вентиляцією.

- Для підвищення теплоізоляційних властивостей тонких стін (наприклад, у шатрових храмах) та зменшення осідання сажі застосовується рідка надтонка теплоізоляція, яка наноситься як фарба.

- Важливою рекомендацією для зменшення забруднення фресок є використання традиційних дерев'яних віконних рам замість герметичних пластикових, оскільки вони забезпечують мінімальний природний повітрообмін.

4. Енергоефективність та модернізація: Історичні церкви, як правило, мають дуже низьку енергоефективність. Проведення термомодернізації ускладнюється охоронним статусом будівель [5].

- Утеплення зовнішніх фасадів є неприйнятним, оскільки змінює історичний вигляд та пропорції будівлі.

- Оцінка ефективності заходів проводиться шляхом розрахунку показників первинної (PE), кінцевої (FE) та корисної (UE) енергії. Порівняльний аналіз показав, що при заміні централізованого теплопостачання на теплові насоси показник кінцевої енергії (FE) значно знижується, але показник первинної енергії (PE) може зрости через високий коефіцієнт первинної енергії для електроенергії.

Порівняльні дослідження церков у Польщі (Лодзь, поч. XX ст.) показали, що впровадження теплових насосів та рекупераційних систем вентиляції може знизити експлуатаційні витрати, але потребує ретельного аналізу джерела енергії.

ВИСНОВКИ

Оптимізація мікроклімату в сакральних спорудах вимагає комплексного, індивідуального підходу, що враховує архітектурні, історичні, кліматичні та експлуатаційні особливості кожного об'єкта. Не існує універсального рішення; найчастіше ефективним є поєднання різних систем (наприклад, променеве та конвективне опалення, природна та механічна вентиляція). Застосування сучасних інструментів, таких як CFD-моделювання та аеродинамічні дослідження, дозволяє спроектувати ефективні системи, що забезпечують комфорт для людей та належні умови для збереження безцінної культурної спадщини. Постійний моніторинг параметрів мікроклімату є необхідною умовою для грамотної експлуатації та своєчасного реагування на можливі проблеми.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням довгострокового впливу різних систем ОВК на стан настигнних розписів, дерев'яних елементів і металевих деталей. Доцільним є розвиток систем автоматизованого моніторингу (BMS) для постійного відстеження температури, вологості та рівня CO_2 .

Окремого вивчення потребують нові матеріали внутрішньої теплоізоляції, здатні забезпечувати мікропористий теплообмін без утворення конденсату. Комбінація локалізованої вентиляції, низькотемпературного променевого обігріву та інтелектуального управління дає підстави розглядати такі підходи як оптимальні для сакральних споруд XXI століття.

Список літератури

- [1] Comparative analysis of heating systems used in Orthodox churches / S. V. Hudîşteanu et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 586. P. 012035. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/586/1/012035>.
- [2] Contemporary Challenges for Heating Historic Church Buildings from the Late 19th and Early 20th Centuries / R. Cichowicz et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 889. URL: <https://doi.org/10.3390/en18040889>.
- [3] Numerical analysis of the thermal comfort in a church building / F. E. Ţurcanu et al. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 85. P. 02008. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198502008>.
- [4] Thermal comfort assessment for different heating system using CFD-modelling inside of an orthodox church / V. Ciocan et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 586. P. 012042. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/586/1/012042>.
- [5] Varas-Muriel M. J., Fort R. Microclimatic monitoring in an historic church fitted with modern heating: Implications for the preventive conservation of its cultural heritage. *Building and Environment*. 2018. Vol. 145. P. 290–307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.060>.