DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-69-76
УДК 681.5:658.264

П.О. Качанов, д.т.н., проф.
О.М. Євсеєнко, к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Огляд потреби побудови енергоефективної системи керування вентиляцією та кондиціонуванням у торговельних центрах

Стаття присвячена аналізу особливостей проєктування та пошуку проблем із забезпеченням мікроклімату приміщень, які виникають при функціонуванні торговельних центрів.

Сформульовано основні тенденції розвитку торговельних центрів. Показано, що для оцінки комфортності людини у приміщенні використовуються індекси Фагнера та стандарти ISO 7730:2005, ISO 10551:2019. Встановлено, що неналежне використання вентиляції в торговельних центрах може привести до хвороб відвідувачів та працівників. З'ясовано, що параметри, які необхідно контролювати, не обмежуються типовими: температурою та вологістю. Пропонується регулювати показники таких параметрів: чадний газ (CO), частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10}, вуглекислий газ (CO_2), формальдегід (HCHO), летучі органічні сполуки (TVOC).

Показано, що створення комфорту людини в торговельному центрі є важливим завданням, яке необхідно вирішувати разом з енергозбереженням. Виокремлено основні параметри мікроклімату, на які варто звертати увагу під час побудови систем управління. Наведено основні компанії, контролери яких використовуються при автоматизації технологічних процесів. Визначено, що підходи до підвищення енергоефективності діляться на конструктивні та алгоритмічні. Реалізація конструктивних підходів можлива лише за умови, якщо торговельний центр було побудовано з виконанням усіх нормативних вимог до побудови приміщень.

Проведено огляд законів керування та методів моделювання, які використовуються для керування системами обігріву та вентиляції. Сформульовано основні принципи, використання яких дозволить отримати збереження енергоресурсів.

Визначено, що торговельний центр є об'єктом з розподіленими параметрами через його розміри та необхідність формування окремих умов для кожного приміщення. Показано, що класичні підходи, які пропонуються використовувати для керування температурно-вологими процесами об'єкта з розподіленими параметрами, не підходять для енергоефективного функціонування.

Ключові слова: *торговельний центр; енергозбереження; автоматизована система керування; мікроклімат; індекс комфорту.*

Актуальність теми. Проблема енергозбереження є ключовою не лише в Україні, а й у всьому світі. Глобальне потепління, викиди вуглекислого газу в атмосферу, підвищення тарифів за використання та транспортування енергоресурсів змушують уряди провідних країн створювати програми фінансування енергозберігаючих програм. Одним із напрямів цих програм є забезпечення фінансування підходів підвищення енергоефективності будівель, які збудовані за старими технологіями у XX столітті. Будівлі, збудовані в XXI столітті, також потребують підвищення енергоефективності. Це здійснюється за допомогою конструктивних заходів та за рахунок упровадження енергоефективних алгоритмів управління системами нагріву, вентиляції та кондиціювання повітря.

Особливої уваги заслуговують багатолюдні будівлі громадського використання великої теплоємності з великою площею, до яких належать адміністративні та промислові будівлі, торговельні центри. Оскільки існує тенденція до збільшення світового населення, то відбувається і зростання житлових будівель та інфраструктури. Сучасна тенденція веде до того, що, окрім будівництва житла, стоянок, шкіл, дитячих садків, будуються й торговельні центри, до яких люди приходять для відпочинку та за покупками [28].

Дослідження показують, що існує пряма залежність часу, який відвідувач проводить у торговельному центрі, від комфорту його приміщень. Власники торговельних центрів прагнуть затримати відвідувачів якомога довше, намагаються створити для них комфортні умови, припускаючи, що відвідувач залишить більше грошей у магазинах. Однак прагнення створити комфорт найчастіше зводиться до того, що взимку в приміщеннях дуже спекотно, а влітку дуже холодно. До того ж не ведеться облік вологості повітря в приміщенні. Такий підхід до формування мікроклімату навпаки відштовхує покупців, збільшуючи витрати на енергоресурси.

Підвищення енергоефективності за рахунок зниження рівня вентиляції приміщень не вважається ефективним засобом енергозбереження, оскільки це може спричинити хвороби та алергічні реакції у людей. Також окремі секції усередині приміщень торговельних центрів можуть вимагати особливих умов створення мікроклімату. Так для магазинів, що продають косметику та засоби побутової хімії, потрібна

© П.О. Качанов, О.М. Євсеєнко, 2022

підвищена вентиляція приміщення, порівняно зі звичайними магазинами. А для товару, що виставляється в торговельних залах та на вітринах, потрібне суворе дотримання температурних та вологісних умов повітря.

У приміщеннях, де знаходиться велика кількість людей, виникає завдання забезпечення якісного та здорового мікроклімату для відвідувачів та працівників. Тобто, системи вентиляції та кондиціонування повітря є життєвою необхідністю в проєктуванні та використанні торговельних центрів. Саме тому створення енергоефективних режимів управління системами кондиціонування, вентиляції та підігріву повітря з дотриманням заданих комфортних температурно-вологих умов є актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. Проблемі енергозберігаючого керування вентиляцією та кондиціонуванням присвячено низку публікацій, починаючи з 60-х рр. XX століття.

Серед підходів та законів управління до організації енергоефективних режимів керування температурно-вологими процесами пропонуються такі: управління системами охолодження за допомогою алгоритмів з прогнозуванням (model predictive control) [18–20, 32], адаптивного управління [19, 21] та керування на основі нейронних мереж [20, 23, 25], генетичних алгоритмів [20, 23, 25], ПІД-управління [21, 35], оптимального [21], нелінійного [21] та робастного управління [21], двопозиційного керування [31], а також використання нечіткої логіки [21].

У [21] вирізняються hard- і soft-техніки управління системами, наводиться система розподілу тепла та надається список сигналів автоматизації у вигляді переліку вхідних / вихідних сигналів. Також стверджується, що застосування нечіткої логіки дозволяє отримати високу точність регулювання, що складно застосовувати на практиці через необхідність навчання моделі об'єкта [21]. У цій роботі оптимальне налаштування параметрів системи керування для стаціонарного режиму будується тільки в одній точці простору. Тому об'єкт, що досліджується, має властивості об'єкта з зосередженими параметрами і опис його поведінки спрощується, що може позначитися на точності управління.

У [22] будується система реального часу, яка враховує поточну погодинну вартість за енергоносії та обчислює індекс дискомфорту в режимі реального часу. Ці дані є вхідними параметрами для методу побудови моделі з прогнозуванням, окрім поточного значення температури та вологості.

Автори [18–19] погоджуються з тим, що велике споживання енергії будинками підвищують викиди парникових газів. Для створення оптимального теплового комфорту обчислюється цільова функція. Ця функція мінімізує споживання теплової енергії.

У [24] пропонується до загальної вентиляції додавати персоналізовану вентиляцію, яка покращує якість повітря в приміщенні. За допомогою цього підходу покращується конструкція системи вентиляції, яку можна забезпечити індивідуальним контролем мікроклімату в приміщенні. По суті це є реалізацією загальновідомого методу грубого та точного налаштування [5].

Методи чисельного моделювання використовують у [26, 34] при моделюванні теплових процесів у приміщеннях торговельних центрів. Для проведення моделювання створюють окремі моделі приміщення і людей у приміщенні [33]. У [9, 33] показано, що температура і вологість є важливими показниками, які впливають на самопочуття людей.

У [26] визначено, що використання витісняючої вентиляції має більше переваг, ніж використання припливно-витяжної. За витісняючої вентиляції повітря подається в приміщення з малою швидкістю через отвори в підлозі, а витяжка розташовується біля стелі. Однак під час її використання існують недоліки у вигляді високих початкових інвестицій та складна технологія їх впровадження.

Результати, отримані у [28], показують, що можлива економія ресурсів за рахунок зниження інтенсивності вентиляції може складати від 33 до 50 % залежно від типу приміщення торговельного центру.

Як показує дослідження [30], наразі немає рекомендацій щодо мікроклімату в перехідних просторах, також уточнюється, що в літературі відсутні дослідження на цю тему.

Таким чином, результати аналізу публікацій свідчать при низку проблем, пов'язаних із вибором методу керування температурно-вологими режимами торговельних центрів. Окремі методи за їх використання обумовлюватимуть високу обчислювальну складність [34]. Ряд моделей не містить інформацію про кількість людей у приміщенні, температуру зовнішнього повітря, не враховує день тижня та час доби, поточний стан та кількість продукції, що зберігається у приміщенні.

Усе це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень, присвячених проблемі енергозбереження в системах підігріву, вентиляції та кондиціонування для забезпечення належного комфорту приміщень торговельного центру.

Метою статті є аналіз проблем, пов'язаних з енергоефективним використанням систем нагрівання, кондиціонування та вентиляції повітря під час побудови комфортного мікроклімату приміщень торговельного центру.

Викладення основного матеріалу. Торговельний центр – це великий за площею об'єкт, який складається з приміщень, де розміщуються різні товари та надаються послуги на площі загального користування. Там є фуд-корти, місця для шопінгу, для розваг дітей, перукарні, супермаркети тощо.

Тенденція показує, що побудова торговельних центрів є перспективним напрямом, який буде розвиватися і може бути привабливим для розвитку туризму. Так у Пекіні побудований торговельний центр Beijing Olympic Park Shopping Centre площею 0,173 млн м^2, а Dubai Mall у Дубаї – найбільший торговельний центр у світі, який займає площу 1,2 млн м^2. На противагу цьому, у світі може виникнути тенденція до зниження зацікавленості покупців до торговельних центрів через електронну комерцію [1].

Як показують дослідження, купівельна спроможність відвідувачів торговельних центрів залежить від часу, який вони там проводять. Тому є потреба затримати відвідувача на довший час. Для цього створюються комфортні умови, зокрема особливий мікроклімат. Орендар приміщень торговельного центру зацікавлений у великій кількості відвідувачів та низькій орендній платі, до складу якої входять витрати на вентиляцію та кондиціонування повітря, обігрів приміщень. Ефективне використання енергоносіїв є ключем до зниження витрат.

Кількість відвідувачів змінюється протягом доби. Відвідувач може проводити в торговельному центрі від кількох хвилин до кількох годин, тоді як персонал проводить не менше 8 годин. Існує потреба створення безпечних, комфортних умов економії ресурсів, витрат за обслуговування обладнання. У деяких випадках ці завдання суперечать одне одному.

Так у [1] виокремлюються такі аспекти привабливості торговельних центрів: комфортність (відповідність фізичним характеристикам навколишнього середовища), активізація діяльності (у бажанні чи необхідній взаємодії з іншими відвідувачами), пожвавлений, багатолюдний чи безлюдний характер приміщень торговельного центру, естетична артикуляція місця (атмосфера внутрішнього простору, архітектура та характерні деталі торговельного центру) та комерційна привабливість (визначається якістю послуг громадського харчування).

Будівництво більшості сучасних торговельних центрів здійснюється за системою shell & core. На етапі будівництва прокладаються лише основні комунікації вентиляційної системи в торговельних приміщеннях. Ця система зручна тим, що наперед невідомо, як буде використано орендовані приміщення [8].

Конкретну схему побудови системи вентиляції торговельного центру проєктувальники вибирають, виходячи із фактичних умов. Найчастіше в торговельних центрах системи вентиляції, опалення та кондиціювання об’єднуються в одну систему. Це дозволяє використовувати загальну мережу повітроводів та оперативно реагувати на зміну температури. Як обладнання для вентиляції в торговельних комплексах найчастіше використовуються центральні кондиціонери.

Автоматизація систем управління вентиляцією та кондиціонуванням повітря – це одна з підсистем управління торговельним центром, тому необхідний комплексний підхід до формування вимог щодо її управління. Окрім неї до загальної системи автоматизації торговельного центру належать:

– освітлення;
– котельня та індивідуальний тепловий пункт;
– холодильний центр;
– електропостачання;
– повітряні завіси вхідних груп;
– ліфти та ескалатори;
– пожежна сигналізація та димовидалення.

Торговельний центр є об’єктом із розподіленими параметрами. У ньому можуть бути секції різного призначення. Наприклад, для зберігання овочів потрібні певна температура і вологість, для продажу хімії та засобів для чищення необхідний особливий режим вентиляції. Торговельні центри обладнані повітряними системами вентиляції та кондиціонування повітря, які створюють мікроклімат для кожної окремої точки центру. Це призводить до того, що температура на вулиці, в окремих приміщеннях торговельного центру та в місцях загального користування може різнитися. Саме тому стоїть завдання в кожній секції торговельного центру створювати свій мікроклімат.

Це реалізується за рахунок побудови автоматизованих систем управління. Перелік обладнання, на якому реалізується управління мікрокліматом у торговельних центрах по всьому світу: Delta Controls ORCA, Johnson Controls, Honeywell, Sauter, Siemens [2], які налічують від 1000 до 18000 точок управління.

За даними [2] платежі за електроенергію для великого торговельно-розважального комплексу площею близько 50 000 м^2 можуть сягати понад 10 млн грн на рік. Для економії пропонується проста автоматизація за допомогою Smart grid систем з використанням лічильника-реєстратора якості електроенергії з цифровим інтерфейсом, вимірювальним трансформатором струму з безперервною реєстрацією енергоспоживання за групами обладнання та орендарями. Ця система вміє формувати звіти, будувати тренди, оптимізувати параметри системи [2].

Дослідження [3] показують, що більшість торговельних центрів, а саме 12 з 13, які брали участь у дослідженні, мають централізовані системи опалення, вентиляції та кондиціонування. Останнім часом вони обладнуються системами «повітря – вода» [23]. Торговельні центри з невеликою площею, зазвичай, мають більш високу інтенсивність споживання електроенергії порівняно з більшими [3]. У [4] вказується,

що в торговельних центрах роздрібні магазини опалюються та кондиціонуються окремо від центральних просторів торговельного центру [4]. Вимоги до цих просторів можуть бути різні [4].

Системи вентиляції та кондиціонування істотно впливають на відвідувачів: на їх здоров'я, комфорт і продуктивність. Для оцінки комфортності знаходження людини в приміщенні використовуються індекси комфортності, такі як індекс комфортності Фангера, що враховує вплив параметрів мікроклімату (температура, рух, вологість повітря, температура поверхонь) на тепловий баланс людини [12, 20] та стандарти ISO 7730:2005, ISO 10551:2019 [13].

Існуючі стандарти встановлюють необхідні параметри мікроклімату приміщень: температуру, вуглекислий газ (CO_2), чадний газ (CO) [16], вологість, шум, $PM_{2.5}$, PM_{10}, THL [7], формальдегід (HCHO) [9, 10], летучі органічні сполуки (TVOC), швидкість повітря [9]. Нестача кисню може спричинити Sick Building Syndrome (SBS) [9], симптомами якого є головний біль, зниження здатності до мислення, запаморочення. З іншого боку, забезпечення повітрям хорошої якості підвищує продуктивність людей [25].

Тому необхідно підтримувати оптимальну чистоту повітря. Наприклад, фірма Robatherm надає рекомендації щодо проєктування систем вентиляції та надає параметри, які можна задавати для припливного повітря, та інші технічні параметри [6].

Так за надлишку чадного газу в приміщенні він зв'язується з гемоглобіном у клітинах крові, отже, зв'язування кисню з кров'ю порушується [16]. Як показують дослідження, рівні цих показників різняться протягом дня, днів тижня, сезону залежно від типів магазинів. Тому потрібно в кожній секції приміщень створювати необхідний мікроклімат [7].

У середньому за стандартом необхідно подавати повітря з продуктивністю 45 $м^3$ на годину на одну людину. Однак, якщо подавати це повітря рівномірно по усіх приміщеннях, це не дозволить забезпечити комфортний мікроклімат, оскільки існують різні вимоги для вентиляції секцій.

Деякі дослідження моделюють мікроклімат у житлових приміщеннях. Так у [11] будується модель, заснована на рівняннях збереження маси (рівняння нерозривності), рівняннях збереження кількості руху (Нав'є – Стокса), рівняннях енергії. Особливу увагу приділяють побудові моделей людини [29]. У різних дослідженнях під час моделювання тепловиділення людини вказується, що вона виробляє 75 Вт [15] або 100 Вт [27] енергії.

У [15] розроблена система, у якій датчики і виконавчі механізми об'єднані в єдину мережу на базі контролера Arduino Uno. Запропонована система відстежує параметри середовища в приміщенні: температуру, вологість та регулює систему опалення. Енергоефективність досягається за рахунок роботи системи опалення та охолодження з використанням інтелектуальних законів управління.

У [16] побудована система на основі концепції «Інтернет речей» та мобільного додатка на Андроїді. По суті це звичайна метеостанція Arduino з датчиками для контролю CO^2, CO, вологості і температури. Система моніторить параметри в житловому приміщенні, проте її можна розширити і використовувати для вимірювань показників повітря приміщень торговельних центрів.

У [17] описується комплексний підхід до будівництва споруд. Пропонується комплекс заходів, починаючи від підходу до будівництва, підбору обладнання, вибору закону управління, моделювання навантажень. Деяка увага приділяється побудові систем з розподіленими параметрам [37].

Через те, що торговельний центр є енергоємним об'єктом з розподіленими параметрами, варто розглядати можливість керування його температурою за допомогою алгоритмів з прогнозуванням. Саме такий підхід використаний у [36], проте для іншого об'єкта з розподіленими параметрами.

Таким чином, можна виокремити параметри, що забезпечують комфортне функціонування торговельного центру: температура та вологість повітря, рівень освітленості. Також необхідний моніторинг наявності у повітрі вуглекислого газу, частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10}, чадного газу, формальдегіду, летучих органічних сполук.

Вимоги, які висуваються до систем автоматизованого керування:

1) безпека;
2) надійність;
3) видалення з повітря домішок, смороду, пилу;
4) забезпечення обміну повітря;
5) забезпечення комфортної температури повітря;
6) своєчасне нагрівання припливного повітря або його охолодження;
7) подання очищеного від механічних забруднень повітря;
8) безпечний рівень шуму;
9) система вентиляції, яка відповідає всім заявленим вимогам. Для її побудови потрібно провести ретельні розрахунки, аналіз будівлі з огляду на її архітектурні, конструктивні та функціональні особливості.

Отже, можна вирізнити такі особливості під час побудови систем управління мікрокліматом торговельних центрів:

1) вимоги до кліматичних показників приміщень усередині торговельного центру можуть різнитися залежно від їх призначення;

2) вентиляція торговельних приміщень має бути зручною в обслуговуванні та простою в управлінні;

3) технічні норми передбачають, що на кожного співробітника торговельного центру має припадати не менше 45 м^3, а на кожного відвідувача – не менше 20 м^3 чистого повітря на годину;

4) для обчислення рівня вентиляції торговельного центру необхідно знати кількість людей у приміщенні або можна використовувати норму, що на кожну людину припадає 5–6 м^2 приміщення;

5) кожна будівля торговельного центру потребує індивідуального підходу до побудови системи керування. На особливості організації повітрообміну впливають місце розташування, площа і функціонал будівлі, кількість поверхів, призначення приміщень.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз основних проблем побудови комфортного мікроклімату в приміщеннях та енергозбереження в торговельному центрі підтвердив актуальність розробки та впровадження енергозберігаючих законів управління. Вирішення цих проблем можливе лише за рахунок чіткої постановки завдання, побудови моделей, формалізації, моделювання, упровадження нових рішень.

Проведений огляд джерел засвідчив наявність великої кількості досліджень, присвячених розробці нових та впровадженню існуючих систем управління для керування температурно-вологими процесами. Натомість для об’єктів великої площі й різного призначення використовуються прості рішення, які не враховують характер, структуру та призначення приміщення.

Виявлено, що час перебування людей у торговельних центрах безпосередньо залежить від комфортного мікроклімату. Чим комфортніше почувають себе відвідувачі, тим потенційно більше часу вони проводять у торговельному центрі. Тому для побудови системи енергозберігаючого керування рекомендується впроваджувати нові енергоефективні алгоритми керування та за можливістю модернізувати обладнання, що використовується.

Список використаної літератури:

1. *Smolenska S.A.* The Modern Shopping Centers of Kharkiv in Visitors’ Perception / *S.A. Smolenska, A.S. Borysenko* // Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020). – 2020. – № 907. – P. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/907/1/012071.
2. Высокие технологии для розницы // S.M.A.R.T. – 2009. – № 4/5. – С. 21–24 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://soliton.com.ua/pr/SMART-2009-04-05-TRADE-CENTERS.pdf.
3. Energy performance of shopping centers in Germany / *M.Huang* et al. // Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC. – Brussels, Belgium, 2018. – P. 1–8.
4. Ventilation approaches for shopping malls – an examination of natural and hybrid strategies Germany / *D.Hamlyn* et al. // ASHRAE Transactions. – 2012. – Vol. 118. – P. 575–585.
5. *Huang S.J.* Gain-scheduling fuzzy temperature controller for one-way input system / *S.J. Huang, C.C. Wang* // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2008. – № 30 (5). – P. 451–469.
6. Системы кондиционирования воздуха для магазинов: хороший микроклимат для лучших продаж [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://docplayer.com/36158538-Sistemy-kondicionirovaniya-vozduha-torgovyh-centrov.html.
7. *Hu J.* Variation of PM2.5 Concentrations in Shopping Malls in Autumn, Changsha / *J.Hu, N.Li* // 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE) / Procedia Engineering. – Tianjin, 2015. – P. 692–698.
8. Системы вентиляции и кондиционирования торговых центров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ads-vent.ru/blog/ventilyaciya-torgovogo-centra.
9. Indoor Air Pollution and Human Perception in Public Buildings in Tianjin, China / *Y.Suna* et al. // Procedia Engineering. – 2015. – № 121. – P. 552–557.
10. Multi-tool formaldehyde measurement in simulated and real atmospheres for indoor air survey and concentration change monitoring / *L.Chiappini* et al. // Air Qual Atmos Health. – 2010. – № 4. – P. 211–220.
11. *Rao V.* Modeling of Room Temperature Dynamics for Efficient Building Energy Management / *V.Rao, A.Ukil* // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2008. – № 50 (2). – P. 716–725. DOI: 10.1109/TSMC.2017.2758766.
12. *Ekici C.* A review of thermal comfort and method of using Fanger’s PMV equation / *C.Ekici* // 5TH International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions. – Vancouver, Canada, 2013. – P. 61–64.
13. Room Temperature Based Automation on Air Conditioning / *S.P.A. Prabu* et al. // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2017. – Vol. 6, Issue 3. – P. 2032–2041.
14. *Andreasi W.A.* Thermal acceptability assessment in buildings located in hot and humid regions in Brazil / *W.A. Andreasi, R.Lamberts, C.Candido* // Building and Enviroment. – 2010. – № 45. – P. 1225–1235.
15. Effects of Specific Parameters on Simulations of Energy Use and Air Temperatures in Offices Equipped with Radiant Heating/Cooling Panels / *S.Jordan* et al. // Appl. Sci. – Vol. 9. –2019. – P. 1–17. DOI: 10.3390/app9214609.
16. *Adrianto C.C.* Design Of CO, CO2, Temperature, Humidity, And Weather Monitoring System Based On Internet of Things (IoT) & Android / *C.C. Adrianto, Y.Calvinus, P.B. Mardjoko* // Materials Science and Engineering. – 2020. – № 1007. – P. 1–8.

17. *Kumar S.* Energy Conservation building code tip sheet / *S.Kumar*, *R.Kappor*, *A.Bajpai* [Electronic resource]. – Access mode : bimmates.com/regulation/energy-conservation-building-code-tip-sheet-hvac-system.
18. Model Predictive Control for the Operation of Building Cooling Systems / *Y.Ma* et al. // IEEE Transactions on control systems technology, MD, USA. – 2011. – № 20 (3). – P. 796–803. DOI: 10.1109/TCST.2011.2124461.
19. Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review / *M.Gholamzadehmir* et al. [Electronic resource]. – Access mode : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307009?via%3Dihub.
20. *Ferreira P.M.* Model based predictive control of HVAC systems for human thermal comfort and energy consumption minimisation / *P.M. Ferreira*, *S.M. Silva*, *A.E. Ruano* // Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control – CESCIT. – Würzburg, Germany, 2012. – P. 236–241. DOI: 10.3182/20120403-3-DE-3010.00085.
21. *Naidu D.S.* Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems – An overview. Part I. Hard control / *D.S. Naidu*, *C.G. Rieger* // HVAC&R Research. – 2011. – Vol. 17, Issue 1. – P. 2–11.
22. *Avci M.* Demand Response-Enabled Model Predictive HVAC Load Control in Buildings using Real-Time Electricity Pricing : Dis. … Doctor of Philosophy / *M.Avci*. – Coral Gables, Florida, 2013. – 163 p.
23. A thermodynamic evaluation of chilled water central air conditioning systems using artificial intelligence tools / *J.C. Armas* et al. // Ingeniería e investigación. – 2011. – Vol 31. – № 2. – P. 134–142.
24. *Yakoob K.* Evaluation of Air Exchange Efficiency in Rooms with Personal Ventilation in Conjunction with Displacement Ventilation Systems / *A.K. Yakoob*, *A.A. Mahdi*, *Q.R. Al-Amir* // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS. – 2020. – Vol. 19, № 6. – P. 49–58.
25. A model toestimate the costeffectiveness of improving office work through indoor environmental control / O.Seppänen, W.J. Fisk, D.S. Naidu, C.G. Rieger // ASHRAE Transactions. – 2005. – Vol. 111. – P. 663–672.
26. *Li Y.* Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation / *Y.Li* // Health. – 2012. – Vol. 4. – P. 1352–1361. DOI: 10.4236/health.2012.412197.
27. Impact of indoor heat load and natural ventilation on thermal comfort of radiant cooling system: An experimental study / *K.Dharmasasthaa* et al. [Electronic resource]. – Access mode : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123322000319.
28. Energy efficient HVAC systems in shopping centers / *P.Mathis* et al. // Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC. – Brussels, Belgium, 2018. – P. 1–10.
29. *Takada S.* Thermal model of human body fitted with individual characteristics of body temperature regulation / *S.Takada*, *H.Kobayashi*, *T.Matsushita* // Building and Environment. – Vol. 44. – 2009. – P. 463–470.
30. Unlocking thermal comfort in transitional spaces: A field study in three Italian shopping centres / *M.Avantaggiato*, *A.Belleri*, *U.F. Oberegger*, *W.Pasut* // Building and Enviroment. – 2021. – Vol. 188. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107428.
31. *Popescu D.* Modelling and Simulation of the Temperature Control System in the Heating Installations from Nonresidential Buildings / *D.Popescu*, *I.Borza* // Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS 2016). – Rome, Italy, 2016. – P. 454–461.
32. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control / *F.Oldewurtel* et al. // Energy and Building. – 2012. – Vol. 45. – P. 15–27.
33. *Foda E.* A thermal manikin with human thermoregulatory control: Implementation and validation / *E.Foda*, *K.Siren* // Int J Biometeorol. – 2012. – Vol. 56. – P. 959–971. DOI: 10.1007/s00484-011-0506-6.
34. *Erickson V.L.* Occupancy Based Demand Response HVAC Control Strategy / *V.L. Erickson*, *A.E. Cerpa* // BuildSys '10 : Proc. of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building. – Zurich, Switzerlan, 2010. – P. 7–12. DOI: 10.1145/1878431.1878434.
35. *Benndorf G.* Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control / *G. Benndorf*, *D.Wystrcil*, *N.Réhault* // Applied Physics Reviews. – 2018. – Vol. 5. – P. 5–19. DOI: 10.1063/1.5053110.
36. *Kachanov P.* Devising a Method To Improve the Accuracy of Maintaining the Pre-Set Temperature and Humidity Conditions at a Vegetable Storage Facility Under a Food Storing Mode / *P.Kachanov*, *O.Yevseienko*, *N.Yevsina* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 110. – Issue 2. – P. 89–98. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229844.
37. *Liu S.* A distributed-parameter-model approach to optimal comfort control in air conditioning systems / *S.Liu*, *X.He* // Proceedings of the American Control Conference. – Baltimore, MD, 1994. – P. 3454–3458.

References:

1. Smolenska, S.A. and Borysenko, S.A. (2020), «The Modern Shopping Centers of Kharkiv in Visitors' Perception», *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*, Vol. 907, pp. 1–9, doi: 10.1088/1757-899X/907/1/012071.
2. «Vysokie tekhnologii dlya roznitsy» (2009), *S.M.A.R.T.*, No. 4/5, pp. 21–24, [Online], available at: https://soliton.com.ua/pr/SMART-2009-04-05-TRADE-CENTERS.pdf
3. Huang, M. et al. (2018), «Energy performance of shopping centers in Germany», *Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC*, Brussels, Belgium, pp. 1–8.
4. Hamlyn, D. et al. (2012), «Ventilation approaches for shopping malls – an examination of natural and hybrid strategies Germany», *ASHRAE Transactions*, Vol. 118, pp. 575–585.
5. Huang, S.J. and Wang, C.C. (2008), «Gain-scheduling fuzzy temperature controller for one-way input system», *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 30, № 5, pp. 451–469.

6. Sistemy konditsionirovaniya vozdukha dlya magazinov: khoroshii mikroklimat dlya luchshikh prodazh, [Online], available at: https://docplayer.com/36158538-Sistemy-kondicionirovaniya-vozduha-torgovyh-centrov.html
7. Hu, J. and Li, N. (2015), «Variation of PM2.5 Concentrations in Shopping Malls in Autumn, Changsha», *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), Procedia Engineering*, Tianjin, China, pp. 692–698.
8. Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya torgovykh tsentrov, [Online], available at: https://www.ads-vent.ru/blog/ventilyaciya-torgovogo-centra
9. Suna, Y. et al. (2015), «Indoor Air Pollution and Human Perception in Public Buildings in Tianjin, China», *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), Procedia Engineering*, Tianjin, China, pp. 552–557.
10. Chiafppini, L. et al. (2010), «Multi-tool formaldehyde measurement in simulated and real atmospheres for indoor air survey and concentration change monitoring», *Air Qual Atmos Health*, Vol. 4, pp. 211–220.
11. Rao, V. and Ukil, A. (2008), «Modeling of Room Temperature Dynamics for Efficient Building Energy Management», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 50, Issue 2, pp. 716–725, doi: 10.1109/TSMC.2017.2758766.
12. Ekici, C. (2013), «A review of thermal comfort and method of using Fanger's PMV equation», *5TH International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions*, Vancouver, Canada, pp. 61–64.
13. Prabu, S.P.A. et al. (2017), «Room Temperature Based Automation on Air Conditioning», *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 6, Issue 3, pp. 2032–2041.
14. Andreasi, W.A., Lamberts, R. and Candido, C. (2010), «Thermal acceptability assessment in buildings located in hot and humid regions in Brazil», *Building and Enviroment*, Vol. 45, pp. 1225–1235.
15. Jordan, S. et al. (2019), «Effects of Specific Parameters on Simulations of Energy Use and Air Temperatures in Offices Equipped with Radiant Heating/Cooling Panels», *Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 9, pp. 1–17, doi: 10.3390/app9214609.
16. Adrianto, C.C., Calvinus, Y. and Mardjoko, P.B. (2020), «Design Of CO, CO2, Temperature, Humidity, And Weather Monitoring System Based On Internet of Things (IoT) & Android», *Materials Science and Engineering*, Vol. 1007, pp. 1–8.
17. Kumar, E.S., Kappor, R. and Bajpai, A. (2011), «Energy Conservation building code tip sheet», *HVAC systems*, [Online], available at: bimmates.com/regulation/energy-conservation-building-code-tip-sheet-hvac-system
18. Ma, Y. et al. (2011), «Model Predictive Control for the Operation of Building Cooling Systems», *IEEE Transactions on control systems*, Vol. 20, Issue 3, pp. 796–803, doi: 10.1109/TCST.2011.2124461.
19. Gholamzadehmir, M. et al. (2020), «Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review», *Sustainable Cities and Society*, Vol. 63, [Online], available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307009?via%3Dihub
20. Ferreira, P.M., Silva, S.M. and Ruano, A.E. (2012), «Model based predictive control of HVAC systems for human thermal comfort and energy consumption minimisation», *Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control – CESCIT*, Würzburg, Germany, pp. 236–241, doi: 10.3182/20120403-3-DE-3010.00085.
21. Naidu, D.S. and Rieger, C.G. (2011), «Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems – An overview: Part I: Hard control», *HVAC&R Research*, Vol. 17, Issue 1, pp. 2–11.
22. Avci, M. (2013), *Demand Response-Enabled Model Predictive HVAC Load Control in Buildings using Real-TimeElectricity Pricing*, D. Sc. Thesis of dissertation, Coral Gables, Florida, 163 p.
23. Armas, J.C. et al. (2011), «A thermodynamic evaluation of chilled water central air conditioning systems using artificial intelligence tools», *Ingeniería e investigación*, Vol. 31, Issue 2, pp. 134–142.
24. Yakoob, A.K., Mahdi, A.A. and Al-Amir, Q.R. (2020), «Evaluation of Air Exchange Efficiency in Rooms with Personal Ventilation in Conjunction with Displacement Ventilation Systems», *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, Vol. 19, Issue 6, pp. 49–58.
25. Seppänen, O., Fisk, W.J., Naidu, D.S. and Rieger, C.G. (2005), «A model toestimate the costeffectiveness of improving office work through indoor environmental control», *ASHRAE Transactions*, vol. 111, pp. 663–672.
26. Li, Y. (2012), «Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation», *Health*, Vol. 4, pp. 1352–1361, doi: 10.4236/health.2012.412197.
27. Dharmasastha, K. et al. (2022), «Impact of indoor heat load and natural ventilation on thermal comfort of radiant cooling system: An experimental study», *Energy and Built Environment*, [Online], available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123322000319.
28. Mathis, P. et al. (2018), «Energy efficient HVAC systems in shopping centers», *Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC*, Brussels, Belgium, pp. 1–10.
29. Takada, S., Kobayashi, H. and Matsushita, T. (2009), «Thermal model of human body fitted with individual characteristics of body temperature regulation», *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 463–470.
30. Avantaggiato, M., Belleri, A., Oberegger, U.F. and Pasut, W. (2021), «Unlocking thermal comfort in transitional spaces: A field study in three Italian shopping centres», *Building and Enviroment*, Vol. 188, pp. 1–11, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107428.
31. Popescu, D. and Borza, I. (2016), «Modelling and Simulation of the Temperature Control System in the Heating Installations from Nonresidential Buildings», *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS 2016)*, Rome, Italy, pp. 454–461.
32. Oldewurtel, F. et al. (2012), «Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control», *Energy and Building*, Vol. 45, pp. 15–27.

33. Foda, E. and Siren, K. (2012), «A thermal manikin with human thermoregulatory control: Implementation and validation», *International Journal of Biometeorology*, Vol. 56, pp. 959–971, doi: 10.1007/s00484-011-0506-6.
34. Erickson, V.L. and Cerpa, A.E. (2010), «Occupancy Based Demand Response HVAC Control Strategy», *BuildSys'10*, pp. 7–12, doi: 10.1145/1878431.1878434.
35. Benndorf, G.A., Wystrcil, D. and Réhault, N. (2018), «Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control», *Applied Physics Reviews*, Vol. 5, pp. 5–19, doi: 10.1063/1.5053110.
36. Kachanov, P., Yevseienko, O. and Yevsina, N. (2021), «Devising a Method To Improve the Accuracy of Maintaining the Pre-Set Temperature and Humidity Conditions at a Vegetable Storage Facility Under a Food Storing Mode», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 110, Issue 2, pp. 89–98, doi: 10.15587/1729-4061.2021.229844.
37. Liu, S., He, X. and He, X. (1994), «A distributed-parameter-model approach to optimal comfort control in air conditioning systems», *Proceedings of the American Control Conference*, Baltimore, MD, pp. 3454–3458.

Качанов Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

http://orcid.org/0000-0002-0781-0853.

Наукові інтереси:

– електромеханічні системи (регульований електропривід, структури та системи керування ним);
– автоматизація електротехнічних комплексів (системи автоматичного керування та регулювання).

E-mail: kpa@kpi.kharkov.ua.

Євсеєнко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

http://orcid.org/0000-0001-5432-1211.

Наукові інтереси:

– розробка автоматизованих систем керування технологічними процесами.

E-mail: olegyevseienko@gmail.com.

Kachanov P.O., Yevseienko O.M.

Overview of shopping malls ventilation and air conditioning energy-efficient system control needs

The article is devoted to the analysis of design-specific features and microclimate control problems searching of the shopping malls.

The main trends of shopping malls development are formulated. It is shown that Fagner indices and ISO 7730: 2005, ISO 10551: 2019 standards are used to evaluate human comfort indoors. It has been established that improper usage of shopping malls ventilation can be a cause of visitors' and employees' illnesses. It was found that parameters that need to be controlled are not limited to typical like temperature and humidity. It is proposed to make measurements of the following parameters: carbon monoxide, $PM_{2.5}$ and PM_{10} particles, carbon dioxide (CO_2), formaldehyde (HCHO), volatile organic compounds (TVOC).

It is shown that human comfort in the shopping mall creation is an important task that needs to be solved in conjunction with energy saving. The main parameters of the microclimate that should be used in system control synthesis are given. The main shopping malls devices of technological processes automation control manufacturers are presented. It is emphasized that energy efficiency approaches are divided into constructive and algorithmic. The constructive approaches implementation is possible only if the shopping center was built in compliance with all regulatory requirements of premises construction.

A review of control laws and modeling methods that are used in heating and ventilation systems control is provided. The basic principles of energy resources saving are formulated.

It is determined that shopping center is an object with distributed parameters due to its size and separate conditions for each room creation needs. It is shown that classical approaches that are proposed to be used for temperature and humidity processes of the object with distributed parameters control are not suitable for its energy efficiency.

Keywords: shopping center; energy saving; automated control system; microclimate; comfort index.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2022.