

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Науково-технічні та управлінські підходи до підвищення енергоефективності будівель

1. ШЕВЧЕНКО Олена Миколаївна – к.т.н., головний енергоменеджер, асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

2. СУХОДУБ Ірина Олегівна – к.т.н., доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

3. БУЯК Надія Андріївна – асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Реферат

Київ – 2018

Мета роботи – підвищення рівня ефективності енерговикористання будівель шляхом удосконалення існуючих і розробки нових наукових й управлінських методів оцінювання енергоефективності та впровадження системи енергетичного менеджменту на базі енергетичного рейтингу; урахування взаємозв'язку джерел енергії, теплового захисту, показників теплового комфорту і параметрів мікроклімату приміщень; розробки динамічних моделей теплового стану та інженерних систем будівель.

Наукова новизна роботи:

- запропоновано розширити поняття «енергетичний рейтинг будівлі» та вперше введено поняття «енергетичний рейтинг комплексу будівель», що виявляється доцільним при енергетичному оцінюванні, аналізі, порівнянні установ та організацій, що представлені комплексом будівель;

- удосконалено процедуру та запропоновано нову модель оцінювання енергоефективності, на прикладі вищих навчальних закладів (ВНЗ), з урахуванням вимог європейських стандартів, що дозволяє проводити узагальнену оцінку ефективності енергоспоживання комплексу будівель ВНЗ, беручи до уваги рівень комфорту, умови тепlopостачання, вплив погодних умов, за різними статтями енерговитрат, а також удосконалити систему рейтингового оцінювання якості надання освітніх послуг, шляхом введення показника рівня енергоефективності;

- удосконалено механізм приведення даних про фактичне енергоспоживання до стандартних умов з урахуванням рівня комфорту, умов тепlopостачання, теплонадходжень, впливу погодних умов та отримано питомі показники енерго- і водоспоживання ВНЗ України за галузевим спрямуванням, запропоновано нову процедуру побудови будівлі-еталону, що полягає в узагальненні даних про енергетичні та експлуатаційні показники комплексу будівель шляхом використання методів кластеризації та математичної статистики;

- вперше запропоновано та обґрунтовано врахування зміни умов комфортності при термомодернізації будівель шляхом застосування моделі теплового комфорту та розрахунку середньої радіаційної температури приміщення, що дає змогу знизити температуру повітря у приміщенні, а відповідно і знизити енергоспоживання;

- створено математичну модель для аналізу показників енергоефективності системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції», яка у порівнянні з відомими дає змогу враховувати вплив стандартних параметрів теплового комфорту на споживання енергії по ланцюгу до первинного палива;

- створено регресійну модель для розрахунку температури повітря у кімнаті і на її основі визначено впливовість внутрішніх та зовнішніх факторів, що в кінцевому підсумку зробить можливим регулювання роботи систем тепlopостачання відповідно до умов комфортності;

- розвинуто метод визначення інтегральної експлуатаційної вартості та показників енергоефективності системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції», побудований на базі енергетичної та ексергоекономічної моделей, які на відміну від існуючих є динамічними (тобто дають змогу враховувати зміну вартості грошей та енергоносіїв в часі), що дозволяє враховувати вартісні та теплотехнічні характеристики джерела теплоти та огорожень будівлі.

- створені динамічні моделі теплового стану громадської будівлі, що враховують теплову інерцію огорожувальних конструкцій, переривчасті режими роботи

системи опалення та різні типи системи вентиляції, включаючи природну та механічну збалансовану припливно-витяжну з теплоутилізатором, проведено аналіз отриманих результатів та порівняння з фактичними даними по енергоспоживанню;

- створені чисельні моделі процесів тепло- та масообміну в перехресно-плинному мембранному рекуперативному теплообміннику систем вентиляції за допомогою CFD та методу скінченних різниць, що враховують можливі режими конденсації та утворення інею на поверхні теплообмінника, проведений аналіз розрахункових та експериментальних значень енергетичної ефективності теплоутилізатора, досліджені розміри та розміщення зон конденсації та утворення інею та визначена максимальна товщина інею для різних моментів часу в залежності від параметрів моделі;

- удосконалена методика оцінювання енергетичної ефективності як власне теплообмінника, так і системи вентиляції з теплоутилізацією в цілому з використанням короткострокових та довгострокових показників для зимового та літнього режимів.

Практична значимість роботи полягає у вдосконаленні існуючих та розробці нових підходів, застосування, яких дасть можливість поліпшити систему управління процесами енергоспоживання та енергозбереження (ПЕЕ) галузі освіти, визначити енергетичний рейтинг та провести оцінювання рівня енергоефективності ВНЗ, визначити шляхи підвищення енергоефективності, планувати обґрунтовані обсяги витрат на енергоносії, підвищити об'єктивність і оперативність моніторингу та аналізу енерговикористання, процесів енергетичного обстеження, зокрема:

- запропоновано та надано рекомендації по впровадженню концептуальної моделі управління ПЕЕ галузі освіти, реалізацію моделі управління на другому (ВНЗ) та третьому (будівля ВНЗ) рівнях апробовано в КПІ ім. Ігоря Сікорського;

- розроблена математична модель визначення питомих показників електроспоживання на n -видах площ підрозділів, розосереджених в комплексі будівель ВНЗ передана та використовується службою енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського для планування потреби об'єктів університету в електроенергії;

- проведені дослідження по визначенню підходів з приведення фактичних даних по енергоспоживанню до стандартних умов, дослідження по встановленню рівня теплонадходжень до приміщень та рівнів питомого енергоспоживання будівель ВНЗ, процедура розробки будівлі-еталону та відповідні рекомендації передані до ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», що можуть бути використані для внесення доповнень до існуючих норм і стандартів;

- розроблена процедура, модель оцінювання енергоефективності ВНЗ та відповідні рекомендації по їх використанню передані до МОН;

- запропоновані підходи за рахунок використання моделі теплового комфорту, дозволять визначити потреби на опалення при різних умовах комфортності, знизити енергоспоживання будівлі без шкоди здоров'ю людини, а також оцінити можливість підвищення енергоефективності при термомодернізації за рахунок зміни умов комфортності, параметрів теплового захисту та мікроклімату приміщень;

- описані методи вибору теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі у комплексі з джерелом теплоти дають змогу системно підходити до економічного обґрунтування проектних рішень;

- запропонований енергетичний підхід до будівлі в цілому дає змогу аналізувати використання якості енергії як при проектуванні, так і при експлуатації;

- динамічні моделі теплового стану будівлі можуть використовуватися для оптимізації переривчастих режимів роботи системи опалення з точки зору економії теплової енергії та додаткових капіталовкладень на систему опалення з врахуванням форсованого нагріву приміщення;

- отримані експериментальні та розрахункові дані по інтегральним характеристикам теплоутилізаторів систем вентиляції можуть бути використані при виборі систем вентиляції, а визначені локальні умови для конденсації та розвитку процесу утворення інею в часі – для використання при проектуванні та експлуатації систем вентиляції. На основі енергетичного та ексергетичного методів виконано аналіз ефективності теплоутилізатора повної теплоти систем вентиляції.

Результати роботи впроваджені в нормативно-практичні документи: «Методика енергетичного аудиту закладів освіти. Загальні положення»; «Типове положення про запровадження енергетичного менеджменту в галузі освіти»; «Програма з енергоефективності НТУУ «КПІ» на 2012-2015 рр.», при підготовці ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 «Енергоефективність будівель. Настанова щодо застосування методу проведення енергетичної оцінки та енергетичної сертифікації будівель». Автори даної роботи спільно з співробітниками ДП НДІБК брали участь у впровадженні в Україні стандартів ДСТУ Б EN ISO 13790:2011, ДСТУ Б EN 15217:2012, ДСТУ Б EN 15603:2012, що гармонізовані з європейськими нормами і описують методики оцінки існуючих будівель з використанням як розрахункового, так і інструментального підходів.

Практичну цінність підтверджено відповідними актами впровадження, наданими Державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (м. Київ); Українським фондом соціальних інвестицій (м. Київ); Центром ресурсоефективного та чистого виробництва (м. Київ), Міністерством освіти та науки України (м. Київ), Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ), Кременчуцьким національним університетом ім. Михайла Остроградського (м. Кременчук). Теоретичні та експериментальні результати роботи впроваджені також у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми наукової роботи.

У **першому** розділі наведено аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду з питань оцінювання енергоефективності будівель та організації системи енергоменеджменту, що дозволило виявити відсутні складові в існуючій нормативній базі України з цих питань. Теоретичну та методологічну основу дослідження складають роботи провідних вчених в області підвищення ефективності управління енергоспоживанням, зокрема: Кириленка О.В., Кулика М.М., Бобрякова О.В., Гнатюка В.І., Ковалка М.П., Праховника А.В., Новосельцева О.В., Табунщикова Ю.А., Директора Л.Б., Денисюка С.П., Суходолі О.М., Розена В.П., Нікітіна Е.Е., Агеєвої Т.П., Сошникова О.Є., Юрченка Є. Л. та багатьох інших й енергоефективності будівель, зокрема: Богословського В.М., Богуславського Л.Д., Матросова Ю.А., Дешка В.І., Фаренюка Г.Г, Фіалко Н.М., Черних Л.Ф., Малярєнка В.А., Мхітаряна Н.М., Ливчака В.І., Гершковича В.Ф., Меркушова В.Т., Нікіфорової Т.Д. та багатьох інших. Однак, недостатньо дослідженими залишаються питання оцінювання енергоефективності будівель в т.ч. у частині визначення енергетичного рейтингу та розробки шляхів приведення фактичного енергоспоживання до

стандартних умов, враховуючи рівень комфорту, погодні умови, теплонадходження, умови теплопостачання, використовувані джерела енергії тощо, що підтверджується проведеним аналізом наукових праць та нормативної бази.

Також проведено аналіз розроблених підходів до підвищення енергоефективності будівлі, як енергетичної системи, в умовах теплового комфорту. Умотивовано необхідність комплексного підходу до аналізу будівлі на етапі проектування, експлуатації та вибору енергозберігаючих заходів. Проаналізовано різні праці, де рекомендовано вибирати енергозберігаючі заходи на основі лінійних моделей та функції граничної корисності. Встановлено, що за умови комплексного підходу до вибору енергозберігаючих заходів до будівлі в цілому доцільно використовувати моделі теплового комфорту, які враховують суб'єктивні та об'єктивні фактори. На основі проведеного огляду літератури з обраної теми зроблено висновок про необхідність поглибленого дослідження складної системи «джерело – людина - огорожувальні конструкції», що полягає у застосуванні методів енергетичного, ексергетичного, економічного та ексергоекономічного аналізів. А також показано суттєвий вплив середньої радіаційної температури на тепловідчуття людини, що обумовлює необхідність врахування цього фактору при термомодернізації будівлі, що дає змогу знизити температуру повітря у приміщенні і додатково енергоспоживання усієї системи. Серед існуючих підходів до енергетичного моделювання будівель наведені як стаціонарні та квазістаціонарні, так і динамічні моделі, що дозволяють враховувати теплову інерційність будівель та досліджувати переривчасті режими роботи інженерних систем. Енергоефективні системи вентиляції докладно описані в роботах Кокоркіна О.Я., Вишневецького Є.П., Гершковича В.Г. та ін. Бесант Р. та Сімонсон Ц. розглядають різні типи теплообмінників типу «повітря-повітря» та пропонують оптимальний спосіб їх інтеграції в систему забезпечення мікроклімату будівель. Інформацію про показники ефективності та розрахунок теплообмінників можна знайти в роботах Кейса В.М. та Лондона А.Л., Мак-Адамса В.Х., Крейта Ф. та Блека У., Товажнянського Л.Л., Хаузена Х. та ін. Нажаль, більшість вітчизняних робіт по утилізації теплоти присвячені теплообмінникам явної теплоти.

У **другому** розділі проведено структурний аналіз енергоспоживання об'єктів галузі освіти на основі даних про енергетичні та експлуатаційні показники 115 ВНЗ України. Первинна інформація оброблялася шляхом приведення фактичних величин енергоспоживання до стандартних умов клімату та нормалізувалася до середніх умов по Україні. На рисунку 1 наведено порівняння ВНЗ України в 2008 році за показником питоме загальне нормалізоване енергоспоживання, середній показник - 172,5 кВт·год/м². Структурний аналіз енергоспоживання ВНЗ показав наявність суттєвих відмінностей їх питомих показників, що можуть бути спричинені галузевим спрямуванням, температурною зоною розміщення тощо. Тому, для порівняння та оцінювання рівня енергоефективності ВНЗ доцільним є розподіл вибірки ВНЗ на типи, для чого запропоновано відповідну модель з використанням кластерного аналізу. За результатами структурного аналізу енергоспоживання визначено особливості об'єктів галузі та процесів їх енергоспоживання, за результатами аналізування стандартів з енергоменеджменту проведено оцінювання відповідності їм існуючої системи управління ПЕЕ галузі освіти України та запропоновано побудову концептуальної моделі управління ПЕЕ (рисунок 2).



Рисунок 1 – Питоме загальне нормалізоване енергоспоживання ВНЗ України

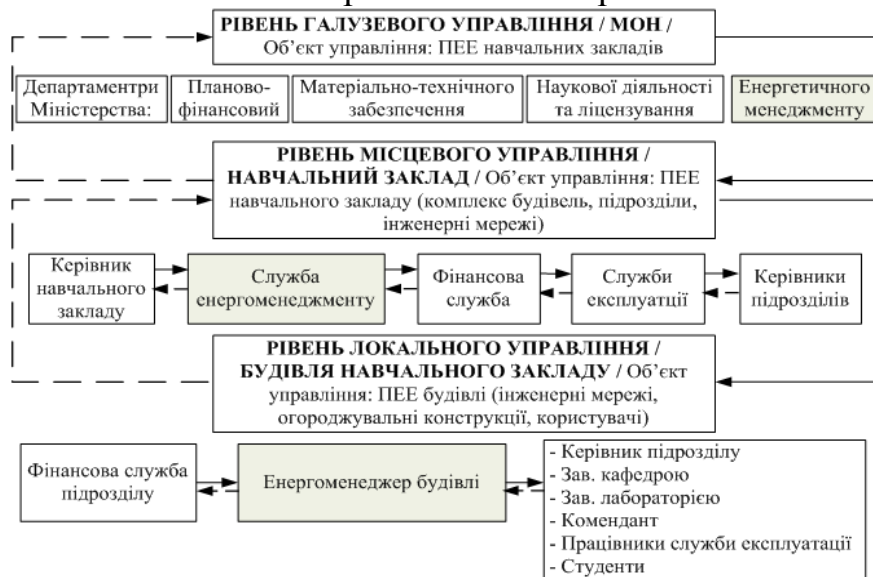


Рисунок 2 – Концептуальна модель управління ПЕЕ галузі освіти

Процес управління пропонується розглядати на трьох рівнях: галузевий (рівень Міністерства, об'єкт управління (ОУ) – ПЕЕ комплексу навчальних закладів); місцевий (рівень навчального закладу, ОУ – ПЕЕ комплексу будівель окремого навчального закладу); локальний (рівень будівлі, ОУ – ПЕЕ окремої будівлі навчального закладу). Виділення трьох рівнів управління зумовлене великою кількістю підпорядкованих об'єктів та необхідністю проведення своєчасного аналізу та реагування на тенденції змін енергоспоживання, моніторингу впровадження заходів з енергозбереження тощо. Однією з основних властивостей системи управління ПЕЕ є необхідність аналізу та синтезу показників енергоспоживання з переходом від інтегральних до деталізованих і назад. Економічну ефективність реалізації концептуальної моделі управління підтверджено результатами діяльності дворівневої системи енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського (служба енергоменеджменту – енергоменеджер будівлі). Функціонування системи енергоменеджменту на виділених рівнях, передбачає: розробку енергетичної політики, забезпечення діяльності підрозділів енергоменеджменту, визначення цільових показників, аналіз та порівняння об'єктів з іншими, оптимізацію планування витрат на оплату енергоносіїв та їх раціоналізацію з урахуванням обмежень на понаднормативні витрати, визначення енергетичного рейтингу ВНЗ та їх будівель з подальшим формуванням вибірки об'єктів нераціонального енерговикористання та проведенням у них аудиту енерговикористання та менеджменту. Для виконання моніторингу, аналізу та оцінювання рівня енергоефективності об'єктів в роботі запропоновано коефіцієнти для приведення та нормалізації вибірки даних до стандартних умов, серед яких:

1) врахування погодних умов та температурної зони розміщення (рисунок 3):

$$k_{прив} = \frac{ГД^n}{ГД^\phi}, \quad (1)$$

$$k_{нормаліз} = \frac{q_n^{середУ}}{q_n^{темн зони} \cdot \frac{ГД^{норм}_{середУ}}{ГД^{норм}_{темн зони}}}, \quad (2)$$

де $ГД^n, ГД^\phi$ - нормативна та фактична кількість градусо-днів (ГД) опалювального періоду (ОП) для місця розміщення об'єкту, відповідно; $ГД^{норм}_{середУ}$,

$ГД^{норм}_{темн зони}$ - нормативні середня по Україні та для конкретної температурної зони кількості, ГД ОП; $q_n^{середУ}, q_n^{темн зони}$ - нормативні середня по Україні та для конкретної температурної зони величини максимальних витрат на опалення будівель, відповідно, кВт·год/(м²·рік).

2) характеристика умов тепlopостачання: $k = \frac{(t_1^\phi - t_2^\phi)}{(t_1^p - t_2^p)}, \quad (3)$

де $t_1^p, t_2^p, t_1^\phi, t_2^\phi$ - температури теплоносіїв у подавальному та зворотному трубопроводах, що відповідають температурному графіку та фактичним температурам на веденні до будівлі, відповідно, °С.

3) врахування рівня комфорту та теплонадходжень: $k_{n-k_1} = \frac{ГД^n}{ГД^\phi}$, (спрощений)

$$k_{n-k_2} = \frac{ГД^n}{ГД^\phi} + \frac{Q_\phi^{mn} \cdot v \cdot \zeta}{Q_\phi^{om} + Q_\phi^{oe}} \cdot \frac{ГД^n}{ГД^\phi} - \frac{Q_n^{oe} + Q_n^{mn} \cdot v \cdot \zeta}{Q_\phi^{om} + Q_\phi^{oe}}, \quad (4)$$

де $ГД^\phi$ - кількість ГД ОП, розрахована по фактичній температурі навколишнього t_n^ϕ та внутрішнього t_e^ϕ повітря; Q_ϕ^{om} - кількість теплоти, отриманої від системи тепlopостачання, кВт·год; Q_ϕ^{oe} - кількість енергії, використаної для електричного догрівання приміщень, кВт·год; Q_ϕ^{mn} - теплонадходження від офісної техніки, сонячної радіації, людей, кВт·год

4) планування потреби будівлі в тепловій енергії:

$$k_{n факт 1} = \frac{(t_1^\phi - t_2^\phi)}{(150 - 70)}, \quad k_{n факт 2} = \frac{(t_e^\phi - t_n^\phi)}{(t_e^n - t_{po})}, \quad (5)$$

де t_e^n - нормативна температура внутрішнього повітря протягом ОП для більшості приміщень будівлі, °С; t_{po} - розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування систем опалення.

5) оцінювання за первинною енергією:

$$k_n = k_{вирп} + k_{втрп}, \quad (6)$$

де $k_{вирп}$ - коефіцієнт питомих витрат первинної енергії на одиницю відпущеної енергії; $k_{втрп}$ - коефіцієнт втрат при розподілі відпущеної енергії.

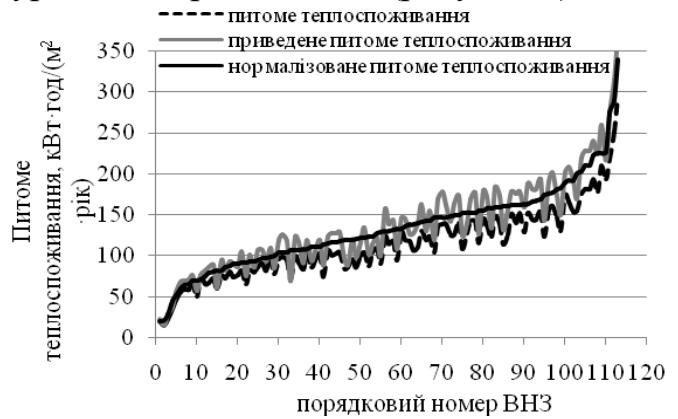


Рисунок 3 – Порівняння питомих величин теплоспоживання ВНЗ до та після нормалізації

Для деталізації завдань управління на другому (ВНЗ) та першому (Міністерство освіти та науки України (МОН)) рівнях управління проведено дослідження та розроблено модель визначення питомого електроспоживання за видами площ підрозділів ВНЗ, що надає подальший розвиток підходам до планування енергоспоживання, та модель оцінювання рівня енергоефективності ВНЗ, для чого використано поняття енергетичний рейтинг. Можливість використання результатів моделі показано для планування енергетичної потреби ВНЗ, в процесі розрахунку складової енергетичного рейтингу, що визначає потребу в енергії для освітлення та інших потреб. Визначення енергетичної потреби для опалення здійснено з використанням проектних значень теплового навантаження будівель з урахуванням фактичних умов їх експлуатації. Показано, що знаючи енергетичну потребу кожної окремої будівлі можна визначити енергетичну потребу ВНЗ, що є комплексом будівель, і таким чином визначити його енергетичний рейтинг.

При розробці шкали оцінювання енергоефективності використано три підходи: кластерний аналіз (рисунок 4а); частотний розподіл енергоспоживання; підхід за європейським стандартом EN 15217 (рисунок 4б), що поєднує нормативні та середньостатистичні дані про енергоспоживання. Для застосування даного підходу використано запропоновану процедуру розробки будівлі-еталону ВНЗ.

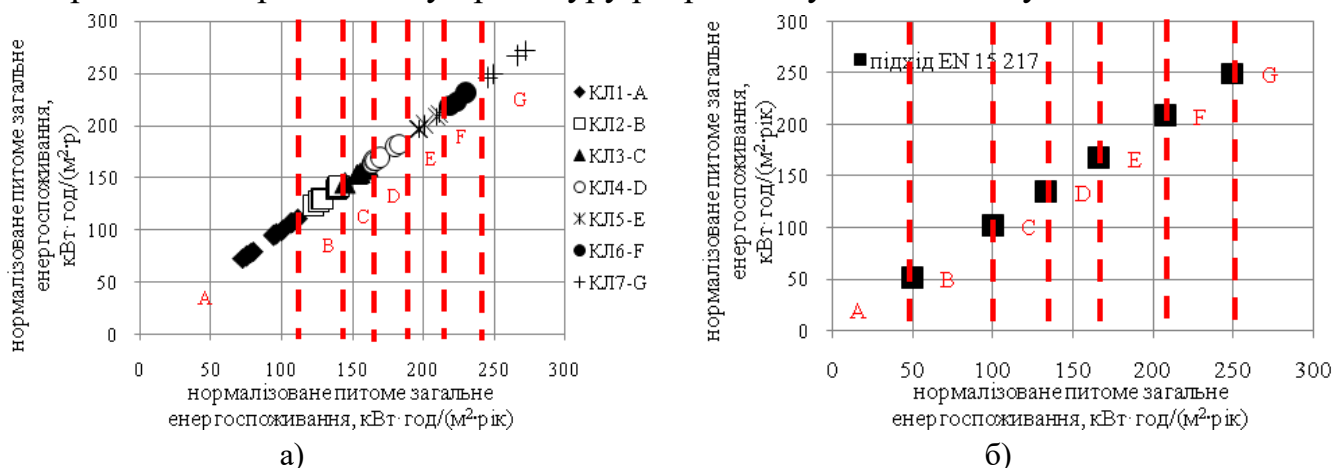


Рисунок 4 – Побудова шкали оцінювання енергоефективності з застосуванням а) методики кластерного аналізу (*k-means*) та б) європейського підходу

У третьому розділі обґрунтовано доцільність застосування функції інтегральної вартості для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі:

$$B = \sum_{\tau=1}^n \frac{B_{\tau}^{\text{обслг}}}{(1+E)^{\tau}} + \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{\text{енерг}}(1+l \cdot \tau)}{(1+E)^{\tau}} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}}, \quad (7)$$

де $B_{\tau}^{\text{енерг}}$ – річні затрати за спожиті енергоносії, євро; $B_{\tau}^{\text{обслг}}$ – інші затрати, євро; I_0 – капітальні затрати на придбання теплогенеруючого обладнання, євро; $I_{\text{із}}$ – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, євро; $I_{\text{із}}$ – витрати на придбання приладів опалення, євро; l – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії євро/рік; n – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, роки; E – ставка дисконтування.

Представлено результати розрахунків інтегральної вартості системи ДК (джерело теплоти – огорожувальні конструкції). Для аналізу обрано модель віртуальної кімнати в м. Києві, побудованої в 1981 році з однією зовнішньою стіною.

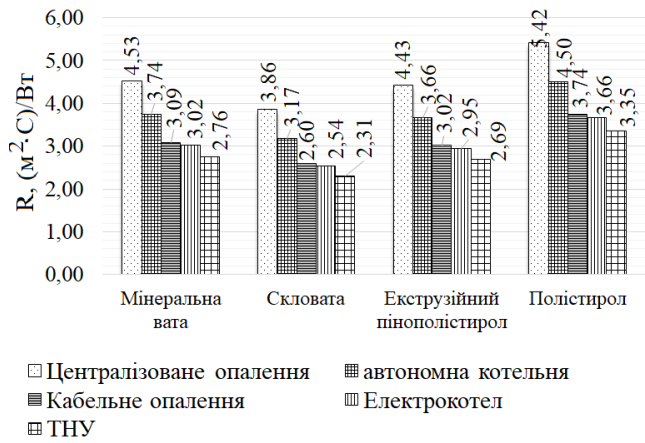
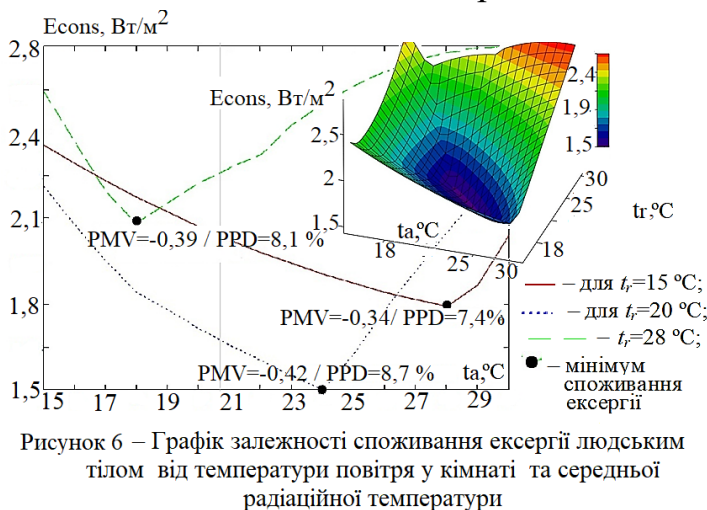


Рисунок 5 – Залежність оптимального термічного опору від типу ізоляційного матеріалу та джерела теплоти

приміщенні, що відповідає енергетичним та ексергетичним умовам комфортності, для аналізу впливу суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива, проаналізовано втрати енергії та ексергії через елементи системи ДК із різними варіантами джерел теплоти, на базі чого оцінено вплив показників комфорту на споживання ексергії/енергії системи в цілому. Графік залежності споживання ексергії людським тілом $E_{x_{cons}}$ від температури повітря у



кімнаті t_a та середньої радіаційної температури t_r , представлено на рисунку 6 для точок, що відповідають мінімуму споживання ексергії, визначено показники PMV та PPD – це прогнозований процент незадоволених таким середовищем, основні показники тепловідчуттів людини відповідно до $EN ISO 7730$. Значення PMV знаходиться в межах від $(-0,34)$ та $(-0,42)$, що кореспондується з іншими дослідженнями.

Також у розділі досліджено вплив категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов на t_r та на потребу на опалення до термомодернізації та після, представлено. При цьому, зміна від I-ї до II-ї категорії будівлі обумовлює різницю в потребі на опалення на 9,4 та на 9,7% для будівлі до термомодернізації та після відповідно. Термомодернізація у свою чергу обумовлює зміну потреби на опалення на 53%. А їх сумісний вплив забезпечує зміну потреби на опалення на 68 %.

Розрахунок потреби на опалення з урахуванням моделі теплового комфорту людини дає змогу визначити за допомогою перевідних коефіцієнтів для різних джерел теплоти споживання первинного палива системою ДЛК, із врахуванням сучасних вимог до мікроклімату в приміщеннях. Застосування ексергетичного підходу до забезпечення комфортних умов у порівнянні з енергетичним дасть середньорічну економію для 9-и поверхового житлового багатоквартирного будинку (спорудженого у 2016 році) у розмірі 60 тис.грн., а зміна категорії будівлі з I-ої до II-ої – 120 тис.грн за умови використання тарифів централізованого опалення у м. Києві 2017 року.

У четвертому розділі проведений аналіз розрахунку енергоспоживання громадської будівлі з використанням динамічного моделювання в програмі EnergyPlus та порівняння отриманих результатів з фактичним енергоспоживанням на потреби опалення. В якості об'єкта дослідження було обрано будівлю «Київського центру енергоефективності», для якого створено модель теплового стану приміщення, водяної системи опалення та механічної системи вентиляції з теплоутилізатором. Показано, що в енергетичному балансі зони з природною вентиляцією більше 40% тепловтрат пов'язані з нагріванням зовнішнього повітря, а для зони зі збалансованою припливно-витяжною вони складають до 18% (з врахуванням інфільтраційного повітря). Саме тому для теплообмінника систем вентиляції були розроблені математичні моделі для аналізу ефективності та розрахунку процесів тепломасообміну методом скінченних різниць (MCP) та CFD.

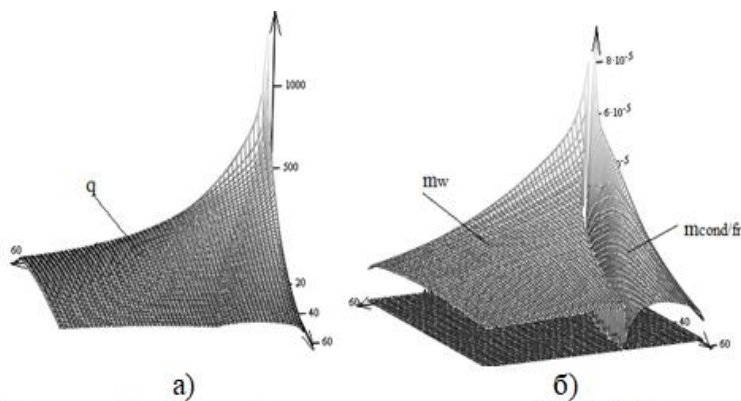


Рисунок 7 – Розподіл теплового потоку (а) (Вт/м^2), потоку маси, яке передається через мембрану і конденсується / заморожується (б) ($\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$)

При цьому, були проаналізовані результати локальних умов конденсації та утворення інею з розвитком в часі для мембранного перехресно-плинного рекуператора (рисунок 7). Також в даному розділі приводяться результати експериментальних досліджень енергетичної ефективності та ексергетичного аналізу як всієї системи вентиляції з теплоутилізацією, так і власне мембранного теплообмінника.

ВИСНОВКИ

Авторами надано розвитку методичних аспектів, методів та моделей енергетичного оцінювання комплексу будівель на прикладі об'єктів галузі освіти; обґрунтовано методику вибору джерела теплоти в комплексі з огороджувальними конструкціями будівлі на базі функції інтегральної вартості, що дає змогу враховувати зміну вартості енергоносіїв та грошей у часі; розглянуто енергетичну та ексергетичну ефективність складної системи ДЛК з врахуванням теплового комфорту; створено динамічні моделі теплового стану та інженерних систем будівлі та досліджено енергетичну та ексергетичну ефективність систем вентиляції з теплоутилізацією.

За результатами досліджень захищено три кандидатські дисертації. Основні результати відображено у 87 наукових працях, з яких 3 – монографії, 43 – в періодичних спеціалізованих фахових виданнях (з них 6 – у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus і 7 – у іноземних виданнях), отримано 5 свідоцтв про реєстрацію авторського права на науковий твір. Загальна кількість цитувань 13 згідно баз даних Scopus та 125 згідно Google Scholar, h-індекс = 2 згідно баз даних Scopus та 6 згідно Google Scholar.

/ О. М. Шевченко/
(підпис)

/ І. О. Суходуб/
(підпис)

/ Н. А. Буяк/
(підпис)