

РЕФЕРАТ

наукової роботи

«Науково-технічні та управлінські підходи до підвищення енергоефективності будівель»

к.т.н. Шевченко Олени Миколаївни, к.т.н. Суходуб Ірини Олегівни, к.т.н. Буяк Надії Андріївни, к.т.н., с.н.с. Божка Ігора Костянтиновича, що висунута

Національним технічним університетом України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" для участі у конкурсі зі здобуття премії Президента України для молодих вчених 2019 року

Шевченко Олена Миколаївна – к.т.н., головний енергоменеджер, асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Суходуб Ірина Олегівна – к.т.н., доц., доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Буяк Надія Андріївна – к.т.н., асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Божко Ігор Костянтинович – к.т.н., старший науковий співробітник відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій Інститут технічної теплофізики НАН України.

Робота подається вдруге. В якості розвитку роботи додатково проведено дослідження та встановлено оптимальні режими експлуатації системи опалення громадської будівлі при застосуванні теплонасосних технологій.

Актуальність дослідження, представленого у науковій роботі: Сьогодні перед Україною гостро постала необхідність вжиття заходів з підвищення енергоефективності у всіх сферах народного господарства, в тому числі й у житловій і соціально-бюджетній сфері. Зменшення споживання та диверсифікація джерел енергії обмежують залежність від зовнішніх джерел енергоресурсів та є фактором національної безпеки держави. Необхідність розвитку та активізації процесів енергозбереження в Україні обумовлена наявністю стійких негативних тенденцій зростання валового внутрішнього продукту як основного показника ефективності використання енергоресурсів. Єдино правильним напрямком виходу із ситуації є тотальна енергомодернізація усіх сфер народного господарства, включаючи житлово-комунальний сектор, адже близько 40% світового енергоспоживання та третина викидів парникових газів припадає на будівлі. Комунальні витрати бюджетних установ в Україні є у 2–3 рази вищими, ніж подібні витрати в країнах Європейського Союзу (ЄС), причому це не гарантує дотримання санітарно-гігієнічних вимог у приміщеннях. Практично 90% будівель України не відповідають сучасним вимогам енергоефективності, що призводить до таких проблем як підвищені витрати теплової енергії на опалення та недотримання вимог

по мікроклімату приміщень. Це з одного боку є привабливим з точки зору економії енергоресурсів, а з іншого боку є непростю задачею для автоматизації обліку та управління енергоспоживанням таких об'єктів традиційними засобами. Вирішення цих задач потребує розгляду процесів енергоспоживання будівель як комплексної проблеми з застосуванням сучасних інструментів системи енергоменеджменту, моделювання динаміки процесів енергопостачання та енергоспоживання об'єктів у реальному часі.

Дослідження, представлені в роботі, виконані на прикладі об'єктів галузі освіти. Особливістю даної галузі є висока складова соціального та споживчого характеру, що пов'язана з використанням енергоресурсів. В той же час реалізація існуючого потенціалу енергозбереження у цій сфері пов'язана з впровадженням не лише заходів з енергоефективної модернізації, а й реалізації низки організаційних заходів, що спрямовані на створення відповідної організаційної структури, навчання користувачів усіх рівнів правилам раціонального витрачання енергоресурсів на засадах сучасних стандартів енергоменеджменту та підвищення енергоефективності.

Оптимальне управління процесами енергоспоживання та енергозбереження (ПЕЕ) окремих установ та галузі в цілому потребує розвитку та вдосконалення науково-технічних та управлінських методів. Запропонований підхід розбудови системи управління ПЕЕ галузі освіти створює методичні засади та алгоритмічну базу збору, обробки, аналізу інформації з енерговикористання, прийняття управлінських рішень та проведення енергетичного аудиту; контролю енергоспоживання; вдосконалення системи лімітування енергоспоживання; створення енергетичних паспортів та сертифікатів об'єктів. Нагальна необхідність створення ефективної системи управління ПЕЕ галузі освіти та недостатній ступінь розробки теоретико-методологічних підходів оцінки рівня енергоефективності, з одного боку, та важливість результатів даного дослідження для забезпечення сталого розвитку країни, з іншого, свідчать про особливу актуальність зазначеного наукового дослідження.

Ключова ідея дослідження представленої наукової роботи: створення науково-технічних засад для функціонування і розвитку багаторівненої системи енергетичного менеджменту на прикладі об'єктів галузі освіти, включаючи поглиблення методів та засобів аналізу енергетичної та ексергетичної ефективності окремих будівель та їх інженерних систем. Особливу увагу приділено систематизації, вдосконаленню і подальшому розвитку методів та засобів аналізу енерго- і ексерго-ефективності складної системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції будівлі» і одночасного забезпечення комфортних умов шляхом використання моделей теплового комфорту людини. Що у свою чергу забезпечить проектування та експлуатацію будівель нового покоління та є важливим кроком у напрямку сталого розвитку.

Значимість одержаних результатів у порівнянні з кращими вітчизняними та світовими аналогами: Реалізація системи енергоменеджменту в галузі освіти на базі міжнародних підходів та відсутність аналогів подібних систем в Україні в поєднанні з системним підходом до питань управління енерговикористанням галузі, розвитком методів енергосертифікації та методів поглибленого енергоаудиту об'єктів, а також оцінювання енергетичних показників будівель на базі впровадження європейських стандартів забезпечує виконання роботи на світовому рівні. Також отримані наукові результати забезпечують розвиток існуючого рівня наукових досліджень теплового стану будівель, що проведені з використанням новітніх наукових технологій у програмному середовищі EnergyPlus та ENSI.

Мета дослідження – підвищення рівня енергоефективності будівель шляхом удосконалення існуючих і розробки інноваційних управлінських методів оцінювання енергоефективності та впровадження системи енергетичного менеджменту з урахуванням енергетичних, економічних та термoeкономічних параметрів об'єктів управління на базі енергетичного рейтингу; урахування взаємозв'язку джерел генерації енергії теплового захисту та обраного рівня теплового комфорту приміщень; розробки динамічних моделей теплового стану будівель та інженерних систем енергозабезпечення.

Об'єкт дослідження - процеси тепло- та масообміну в будівлях, енергоспоживання і енергозбереження та оцінювання ефективності енерговикористання об'єктами вищих навчальних закладів (ВНЗ), а також процеси перетворення енергії та ексергії у складній системі «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції будівлі».

Предмет дослідження – методи і показники оцінювання тепломасообмінних процесів, енергоспоживання, енергоефективності будівель в цілому та її окремих елементів/систем.

Наукова новизна одержаних результатів роботи. У представленій роботі вдосконалено існуючі та розроблені інноваційні підходи енергоменеджменту; створено систему оптимізації та управління процесами енергоспоживання та енергозбереження закладів освіти, вперше запропоновано та обґрунтовано врахування зміни умов комфортності при термомодернізації будівель шляхом застосування моделі теплового комфорту, розроблено математичні моделі для динамічного моделювання теплового стану будівлі та її інженерних систем, експериментально досліджено та доведено ефективність застосування теплонасосних технологій для опалення громадських будівель.

Найбільш вагомими результатами роботи, які відзначаються науковою новизною, є такі:

- розроблені інноваційні підходи енергоменеджменту; створено систему оптимізації та управління процесами енергоспоживання та енергозбереження закладів освіти; встановлено енергетичний рейтинг та проведено оцінювання рівня

енергоефективності 115 ЗВО; запропоновано заходи підвищення енергоефективності в ЗВО; запропоновано методики визначення обґрунтованих обсягів витрат на енергоносії;

- запропоновано нову модель оцінювання енергоефективності, на прикладі закладів вищої освіти (ЗВО), з урахуванням вимог європейських стандартів, що дозволяє проводити узагальнену оцінку ефективності енергоспоживання комплексу будівель ВНЗ, беручи до уваги рівень комфорту, умови теплопостачання, вплив погодних умов, за різними статтями енерговитрат; вперше введено поняття «енергетичний рейтинг комплексу будівель», що виявляється доцільним при енергетичному оцінюванні, аналізі, порівнянні установ та організацій, що представлені комплексом будівель;

- 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 теплофізичну модель для розрахунку температури повітря у кімнаті і на її основі визначено вплив внутрішніх та зовнішніх факторів, що в кінцевому підсумку зробить можливим регулювання роботи систем теплопостачання 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 рекуператором, 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, що враховують можливі режими конденсації та утворення інею на поверхні теплообмінника; проведено аналіз розрахункових та експериментальних значень енергетичної ефективності тепло- утилізатора; досліджено розміри та

розміщення зон конденсації та утворення інею та визначена максимальна товщина інею для різних моментів часу залежно від параметрів моделі; удосконалено методику оцінювання ексергетичної ефективності як власне рекуператора, так і системи вентиляції з рекуперацією в цілому з використанням короткострокових та довгострокових показників ефективності;

- на основі експериментальних даних отримані залежності теплового стану ґрунтового масиву та параметри роботи теплонасосної системи теплопостачання в різних режимах експлуатації;

- запропоновано принципові рішення, проведено дослідження та встановлено оптимальний режим експлуатації системи опалення громадської будівлі при застосуванні теплонасосних технологій.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у вдосконаленні існуючих та розробці нових підходів, застосування, яких дає можливість поліпшити систему управління 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 концептуальну три-рівневу модель управління ПЕЕ в галузі освіти та надано рекомендації по її впровадженню, реалізацію моделі управління на другому (ЗВО) та третьому (будівля ЗВО) рівнях апробовано в КПІ ім. Ігоря Сікорського;

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

- 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;

- створена методика вибору теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі у комплексі з джерелом генерації теплової енергії, яка дає змогу системно підходити до економічного обґрунтування проектно-вишукувальних рішень;

- запропоновано ексергетичний підхід до будівлі в цілому, що дає змогу оптимізувати використання енергії для будівлі як при будівництві, так і при експлуатації, тобто впродовж всього життєвого циклу;

- 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;

- запропоновані методики щодо комплексного вибору джерела теплоти та огорожень із врахуванням зміни вартості грошей та енергоносіїв в часі та ексергетичні і ексергоекономічні показники для оцінювання енергоефективності системи «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі» можуть бути використані для розробки нових та доповнення існуючих стандартів;

- 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 подібних систем вентиляції;

- на основі двох теплонасосних установок досліджено процеси перетворення теплової енергії в них та вплив типу джерела низькопотенційної теплоти на тепловий режим приміщень адміністративної будівлі;

- проведено дослідження та отримано експериментальні дані роботи системи опалення адміністративної будівлі під час інтеграції теплонасосних технологій в її систему опалення, розраховано середній за опалювальний період коефіцієнт перетворення теплового насоса та економію теплової енергії при реалізації такої системи.

Зміст роботи. У роботі проведено структурний аналіз енергоспоживання об'єктів галузі освіти на основі даних про енергетичні та експлуатаційні показники 115 ЗВО України, що показав наявність суттєвих відмінностей їх питомих показників, що спричинено галузевим спрямуванням, температурною зоною розміщення тощо. Тому, для порівняння та оцінювання рівня енергоефективності доцільним є розподіл вибірки ЗВО на типи, для чого запропоновано відповідну модель з використанням кластерного аналізу. Проведено оцінювання відповідності існуючої системи управління ПЕЕ галузі освіти України міжнародним стандартам з енергоменеджменту та запропоновано побудову концептуальної моделі управління ПЕЕ. 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 ЗВО та їх будівель з подальшим формуванням вибірки об'єктів нераціонального енерговикористання та проведенням у них енергоаудиту.

Для деталізації завдань управління на першому (Міністерство освіти та науки України (МОН)) та другому (ЗВО) рівнях управління проведено дослідження та розроблено модель оцінювання рівня енергоефективності ЗВО, для чого використано поняття енергетичний рейтинг та модель визначення питомого електроспоживання за видами площ підрозділів ЗВО, що надає подальший розвиток підходам до планування енергоспоживання. Можливість використання результатів моделі показано для планування енергетичної потреби ЗВО, 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 ЗВО, що є комплексом будівель, і таким чином визначити його енергетичний рейтинг. Запропоновано та розроблено шкалу оцінювання енергоефективності ЗВО.

Для розбудови системи енергоменеджменту на третьому рівні управління (будівля ЗВО), запропоновано інтегральні математичні моделі зміни енергетичного стану об'єкту в часі та проведено моделювання процесів тепломасообміну в будівлях та/або їх окремих елементах для аналізу теплового стану, моніторингу та контролю енергоспоживання, порівняння варіантів енергозберігаючих заходів. Зокрема, у роботі описані методики обґрунтування термомодернізації будівлі в комплексі з вибором джерела теплоти із врахуванням тенденцій щодо зміни вартості грошей та енергоносіїв в часі, визначення показників енерго- та ексергоефективності системи, врахування моделі людини при оцінці енергоспоживання будівлі. Обґрунтовано доцільність застосування функції інтегральної вартості для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі.

Ексергетична модель теплового комфорту дає змогу враховувати процеси термогенезу та термолізу, бо побудована на базі енергетичної моделі Гага, що описує механізм терморегуляції людини. Саме тому для оцінки впливу суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива обрано ексергетичну модель теплового комфорту, доповнену можливістю врахування сонячного та власного теплового потоку випромінювання від

огорожень, шляхом розрахунку середньої радіаційної температури. Людське тіло розглядається як відкрита термодинамічна система за сталих умов, враховано втрати теплоти за рахунок дихання, випаровування вологи, а також втрати теплоти за рахунок конвекції та випромінювання. Розроблено алгоритм, що дає змогу інтегрувати керуючий вплив людини у складну систему «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі» (ДК). Особливість цього алгоритму полягає у тому, що вперше ексергетична модель людини включена у складну систему ДК шляхом визначення комфортної температури, що у свою чергу відповідатиме рівню комфорту, не нижчому за необхідний рівень очікувань PMV_n (прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини), який визначається категорією будівлі. Якщо комфортна температура відповідно до ексергетичного підходу забезпечує $PMV < PMV_n$, тоді розрахунок комфортних умов відбуватиметься згідно з енергетичним підходом.

Наведено результати апробації ексергетичної моделі терморегуляції людини, показано вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту, розроблено регресійну модель визначення температури повітря у 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. 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 термо-модернізації 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%. 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 2017р.

Також у роботі 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 скінчених різниць (MCP) та CFD і проаналізовані результати локальних умов конденсації та утворення інею з розвитком в часі для мембранного перехресноплинного рекуператора. Також в роботі приводяться результати експериментальних досліджень енергетичної ефективності та ексергетичного аналізу як всієї системи вентиляції з рекуперацією, так і власне теплообмінника.

На рівні будівлі досліджена можливість інтеграції теплонасосної системи теплопостачання на основі теплового насоса «повітря-вода» в існуючу систему опалення адміністративної будівлі. В якості об'єкта дослідження обрано корпус №1 ІТТФ НАН України який представляє собою будівлю каркасно-панельного типу. Розроблено принципову схему експериментальної системи теплопостачання частини адміністративної будівлі в якій використано тепловий насос типу «повітря-вода». Розроблено три режими роботи теплонасосної системи теплопостачання та отримано оригінальні експериментальні дані

На основі експериментальних досліджень, був розрахований середній за опалювальний період, коефіцієнт перетворення теплового насоса «повітря-вода» при його інтеграції в існуючу систему теплопостачання адміністративної будівлі енергії, який склав $COP = 1,82$. Середня за опалювальний період економія теплової енергії при встановленні теплового насосу становить 15 %.

Науково-технічні результати та впровадження. 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), ТОВ Завод енергетичного обладнання «ДАН» (м. Київ), ТОВ «Центр водоочищення» (м. Київ). Теоретичні та експериментальні результати роботи впроваджені також у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Економічний та соціальний ефект, що мають та будуть мати результати роботи. Запровадження ефективної багаторівневої системи енергоменеджменту в галузях, що включають в себе об'єкти соціальної сфери, такі як дитячі садочки, школи, лікарні, навчальні заклади тощо, забезпечить не тільки економію коштів державного бюджету, а і призведе до підвищення рівня теплового комфорту користувачів будівель, що буде мати значний соціальний ефект. Динамічне моделювання теплового стану будівель дозволить оптимізувати переривчасті режими роботи системи опалення, що в свою чергу дозволить заощаджувати до 10% теплової енергії на потреби опалення. Комплексний аналіз системи джерело теплової енергії – огорожувальні конструкції – людина дозволяє ще на етапі проектування приймати оптимальні рішення, що призведуть до значного економічного ефекту протягом всього життєвого циклу будівлі.

Висновки. Авторами розвинуто методологічні аспекти енергоаудиту будівель на прикладі об'єктів закладів освіти, враховуючи їх особливості; вдосконалено існуючі та розроблені інноваційні підходи енергоменеджменту; створено систему оптимізації та управління процесами енергоспоживання та енергозбереження закладів освіти; запропоновано методику оптимального вибору джерела теплоти в поєднанні із різноваріантними огорожувальними конструкціями будівлі на основі критерію інтегральної вартості; створено динамічні моделі теплового стану будівлі; досліджено ефективність систем вентиляції повітря з теплорекуперацією та відновленням нормативної вологості; розглянуто доцільність інтеграції теплонасосних технологій у існуючу систему опалення адміністративної будівлі.

За результатами досліджень захищено чотири кандидатські дисертації. Основні результати відображено у 107 наукових працях, з яких 5 – монографії, 57 – в періодичних спеціалізованих фахових виданнях (з них 8 – у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus і 14 – у іноземних виданнях), отримано 5 свідоцтв про реєстрацію авторського права на науковий твір. Загальна кількість цитувань 27 згідно баз даних Scopus та 163 згідно Google Scholar, h-індекс = 3 згідно баз даних Scopus та 7 згідно Google Scholar.

_____	/ О. М. Шевченко/
(підпис)	
_____	/ І. О. Суходуб/
(підпис)	
_____	/ Н. А. Буяк/
(підпис)	
_____	/ І. К. Божко/
(підпис)	