

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ І КОНДИЦІОНУВАННЯ

¹Криворізький національний університет

Метою роботи є аналіз та розробка енергоефективних рішень для пристроїв утилізації теплоти витяжного повітря в системах вентиляції і кондиціонування з урахуванням динаміки кліматичних і внутрішніх характеристик експлуатації. Проведено аналіз науково-технічної та нормативної документації в області підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування. Показано вплив систем життєзабезпечення на енергоспоживання у світі. Подано опис методики техніко-економічної оцінки енергетичних характеристик активних утилізаторів, які працюють в умовах, що відрізняються від паспортних значень. Розглянуто вплив відхилення таких експлуатаційних факторів, як витрата повітря, температура зовнішнього повітря перед утилізатором, температура і вологість витяжного повітря. Проведено порівняльний аналіз способів підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування. У статті подано огляд основних технологічних та економічних бар'єрів, які запобігають переходу таких систем на якісно новий рівень енергоефективності. Обґрунтований вибір з усього різноманіття технічних рішень можливий тільки за умови введення критеріїв енергетичної та економічної ефективності, які можна застосувати для різних типів теплоутилізаторів в складі систем вентиляції та кондиціонування. Тому розробка нових підходів до аналізу показників довгострокової експлуатації, які дозволяють на ранніх етапах проектної діяльності прогнозувати економічний і екологічний ефект впровадження конкретних пристроїв в заданих умовах експлуатації систем вентиляції та кондиціонування, є актуальним завданням.

Ключові слова: енергоспоживання, системи опалення, вентиляція, кондиціонування, теплоутилізація.

Вступ

Постановка проблеми

Постійне зростання чисельності населення планети Земля разом з тенденцією до концентрації більшої частини населення розвинених країн у великих містах зумовлює постійне підвищення енергоспоживання будівель і споруд.

Приріст енергоспоживання за сучасного рівня застосування непоновлюваних джерел енергії неухильно призводить до суттєвих змін в екосистемі планети. За даними Міжнародного енергетичного агентства в 2018 році приріст попиту на первинну енергію склав 2,3 % — майже у два рази перевищивши середній приріст, який спостерігався у 2010 році [1]. При цьому підвищення темпу щорічного приросту стабільно спостерігається з 2015 р.

Збільшення виробництва енергії в умовах обмеженої кількості викопних ресурсів, впливу їх використання на такі процеси як глобальне потепління і руйнування озонового шару, а також наявності технологічних бар'єрів, що перешкоджають повсюдному переходу на відновлювану енергетику на сьогоднішній день не є ефективним рішенням. Для збереження сучасного вектору розвитку людства необхідний пошук шляхів зниження енергоспоживання в усіх сферах життєдіяльності.

Аналізуючи окремі складові зростання глобального енергоспоживання, відмічено динаміку збільшення частки споживання невикопного сектора — житлових і комерційних будівель. На сьогоднішній день на тлі прогнозованого зниження зростання індустриального енергоспоживання з 4,2 % в 2019 р. до 2,2 % в 2050 р. частка енергоспоживання житлових і комерційних будівель стабільно збільшується на 1,7 % в рік. В розвинених країнах енергоспоживання будівель сьогодні

оцінюється за даними різних джерел в діапазоні від 20 до 40 % від всієї споживаної енергії [2].

Серед основних інженерних систем будівель протягом багатьох років лідируючі позиції з енергоспоживання займає система опалення, вентиляції та кондиціонування. Статистичні оглядові дослідження показують, що частка енергоспоживання систем опалення, вентиляції та кондиціонування становить не менше 55 % від загального енергоспоживання будівель, а для деяких регіонів ця цифра може досягати 70 % [3].

Розвиток будівельних технологій дозволяє значною мірою знизити втрати енергії у разі підтримки мікроклімату в замкненому просторі сучасної будівлі за рахунок застосування ефективних ізоляційних матеріалів і енергозбережного скління [4]. Однак створення повністю замкнутої оболонки споруди неможливо — в будь-якому сучасному будинку необхідна наявність системи загальнообмінної вентиляції. При цьому зростаючі вимоги до якості життя встановлюють вищі стандарти продуктивності систем вентиляції, які застосовуються в сучасному будівництві. До цих характеристик можна віднести і фактори, що впливають не тільки на комфорт відвідувачів, але і на їх здоров'я. На сьогоднішній день доведено зв'язок між кратністю повітрообміну і кількістю випадків захворювання так званими «хворобами, пов'язаними з роботою в будівлі» [5].

Низка досліджень показала також збільшення продуктивності праці співробітників з підвищенням якості внутрішнього середовища в приміщенні [6].

Таким чином, поліпшення здоров'я, комфорту і безпеки людей в будівлях має потенціал для економічних і соціальних вигод за рахунок підвищеної продуктивності праці, зниження захворюваності та витрат на медичне обслуговування. Є доцільним і економічно обґрунтованим використанням досконаліших систем вентиляції, як в споруджуваних будівлях, так і в процесі модернізації наявних [7].

Аналіз досліджень і публікацій

Підвищення ефективності вентиляційних систем протягом останніх десятиліть — актуальне завдання. Цим зумовлено наявність безлічі різних технічних рішень, запропонованих на сьогоднішній день вентиляційною промисловістю [8].

Техніко-економічна оцінка ефективності заходів щодо зниження енергоспоживання систем вентиляції та кондиціонування є складним багатофакторним завданням. По-перше, повноцінний аналіз вимагає розгляду декількох процесів обробки повітря: транспортування повітря, очищення, охолодження, нагрівання, осушення, зволоження, утилізація теплоти. По-друге, для перерахованих процесів існують такі технічні рішення, які відрізняються один від одного як технічним втіленням, так і фізичними принципами роботи. По-третє, пристрої, які розглядаються при спільному їх використанні впливають на характеристики роботи один одного, наприклад оцінка ефективності роботи роторного регенератора і теплового насоса, що працюють окремо, не буде актуальною для їх послідовного включення в реальний вентиляційний агрегат, а їх загальний аеродинамічний опір вплине на роботу вентиляторів і змінить їх характеристики енергоспоживання.

Ключову роль серед вищезазначених енерговитрат в системах вентиляції грає температурна обробка повітря. Саме за енергоефективність цього процесу відповідають більшість сучасних технічних засобів, які підвищують економічність систем опалення, вентиляції та кондиціонування [9]. Залежно від регіону і кліматичних умов середньорічна різниця температури усередині об'єкта, який обслуговується і температури зовнішнього повітря може бути як позитивною, так і негативною. Отже, методи підвищення ефективності процесу температурної обробки повітря можна розділити на вдосконалення способів охолодження і нагріву, а також способи в тій або іншій мірі ефективні для обох процесів.

Основним напрямком в цій галузі техніки можна з упевненістю назвати використання властивостей витяжного повітря для зниження енергоспоживання. Приведення у відповідність теплофізичних параметрів повітря, що видаляється з приміщення, і повітря, що забирається з вулиці за рахунок природних процесів теплообміну, обґрунтована вважається ефективним методом зниження загальних енерговитрат.

Серед засобів теплоутилізації, що застосовуються в системах вентиляції і кондиціонування можна виділити дві групи пристроїв: пасивного і активного типу. Пристрої пасивного типу характеризуються нульовим або дуже незначним енергоспоживанням по відношенню до переданої теплової енергії. До пасивного типу можна віднести пластинчасті рекуператори, роторні регенератори, теплові трубки, а також теплообмінні апарати з проміжним теплоносієм. Продуктивність даних пристроїв варіюється в залежності від конструкції.

На сьогодні найефективнішими є роторні регенератори, здатні, за деякими оцінками, на 85 % (в енергетичному вираженні) знизити витрату енергії, спрямовану на теплову обробку повітря, що подається в приміщення за рахунок теплоутилізації [10]. Однак конструктивні особливості таких регенераторів накладають технологічні, а в деяких випадках і нормативні обмеження на їх застосування [11]. Зумовлена конструкцією можливість змішування припливного і витяжного повітря не дозволяє використовувати їх на деяких об'єктах, де таке змішування неприпустимо. До таких об'єктів належать підприємства громадського харчування, установи охорони здоров'я та деякі виробничі приміщення [12].

Великі габарити роторних блоків також обмежують їх застосування — в більшості випадків поперечний переріз інших елементів вентиляційної мережі необхідно збільшувати до розмірів роторного регенератора, що в цілому збільшує габарити і вартість вентиляційного обладнання, а також створює додаткові технологічні та економічні труднощі під час модернізації наявних вентиляційних систем.

Розвиток методів вдосконалення роторних теплообмінних апаратів представлено переходом від аналітичного визначення ефективних геометричних параметрів набивання ротора [13] до методів дослідження, заснованих на математичному моделюванні. Сучасніші методи досліджень дозволяють крім теплофізичних параметрів оброблюваного повітря враховувати при моделюванні такі фактори як: аеродинамічний опір, ступінь забруднення повітря твердими фракціями, випадання конденсату і утворення льоду на теплопередавальних поверхнях [14].

В роботах [15], [16] розглянуто шляхи підвищення ефективності роботи пластинчастих теплообмінників та визначено незалежні змінні при їх оптимізації. Проаналізовано переваги структурно-модульного підходу в розробці алгоритмів та програм оптимізації. Розглянуто програму ОПТО-2010 для оптимізації пластинчастих теплообмінників, яка дозволяє вирішити низку завдань, а саме:

- підібрати оптимальний варіант теплообмінника, обчисливши всі можливі варіанти;
- впорядкувати отримані результати в порядку зростання або зменшення одного з критеріїв ефективності, оцінити вплив того чи іншого параметра на ефективність роботи теплообмінника в цілому;
- розрахувати не тільки найоптимальніший теплообмінний апарат, а й оптимальну схему розташування апаратів в теплообміннику;
- проводити оптимізацію не тільки конструкційних, але і режимних параметрів.

Схожі симуляційні методи дослідження, застосовувані до пластинчастих теплоутилізаторів, а також застосування матеріалів дозволяють залучати до процесу теплообміну фазовий перехід, дозволяють підвищити їх розрахункову ефективність за певних умов до 65 % [17]. Водночас експериментальні дослідження застосування пластинчастих теплообмінних апаратів, проведені Расулі та ін. на прикладі експлуатації чотирьох 10-типоверхових офісних будівель оцінили фактичну річну економію енергії від застосування цих пристроїв в 20 % і 40 % для потреб охолодження і обігріву, відповідно [18]. Пояснення настільки значної розбіжності проектних показників з реальністю частково подається в роботі Белоногова [19], яка описує математично залежність термічної ефективності пластинчастих теплоутилізаторів від різниці температур припливного і повітря, що видаляється, за умови, що повітря, яке видаляється є вологим. Наведені розрахунки з деякими припущеннями демонструють значне зниження термічної ефективності за температурного перепаду на теплообмінних апаратах менше 15 К.

На відміну від наведених вище прикладів, утилізатори з проміжним теплоносієм або RAC (Run Around Coil) мають ширший потенціал модернізації. Крім вбудованих у вентиляційну мережу теплообмінних апаратів ці пристрої містять у своїй принциповій конструкції контур теплоносія, що дозволяє на додаток до інтенсифікації теплообмінних процесів забезпечити гнучкіше управління утилізованою енергією.

Включення в контур теплоносія теплоаккумуляторів, уможливило приведення у відповідність фактично утилізованих обсягів теплової енергії і реальної потреби системи вентиляції, а також використання альтернативних джерел теплової енергії для енергопостачання [20].

Застосування систем RAC практично нічим не обмежено. Такі системи дозволяють забезпечити повне розділення потоків припливного і витяжного повітря, при цьому габарити теплообмінних апаратів можна скоригувати для відповідності іншим компонентам вентиляційних мереж, і їх розташування можна змінювати в залежності від необхідної конфігурації обладнання. Однак інтерес наукової спільноти до цієї технології невисокий — зі 100 робіт про засоби пасивної теплоутилізації, опублікованих у 2018 році, лише у 3-х розглянуто системи RAC [21]. За показниками енергоефективності ці пристрої на сьогоднішній день також поступаються іншим пристроям пасивного

типу, демонструючи розрахункову економію енергії не більше 45 % [17].

Використання прихованої теплоти фазового переходу отримало новий виток розвитку в технології RAMEE (Run Around Membrane Energy Exchanger), дослідження якої останнім часом активно ведеться в області теплообмінних апаратів з проміжним теплоносієм. За різними джерелами з використанням цих технологій можна досягти економії споживаної енергії від 55 % до 65 % [22].

Серед загальних характерних властивостей систем теплоутилізації пасивного типу можна виділити неможливість забезпечення за їх рахунок повного обсягу температурної обробки повітря. Очевидно, що для зрівнювання температур на лініях припливної та витяжної вентиляції площа теплообмінного апарату, що забезпечує передачу теплової енергії, повинна бути нескінченною, а втрати на стадії перенесення енергії, наприклад в системах RAC повинні повністю бути відсутні. Кінцеве збільшення площі теплопередавальної поверхні так обмежено супутнім збільшенням аеродинамічного опору теплообмінного апарату, що приводить до збільшення енергоспоживання вентиляторів вентиляційної мережі. Оскільки повністю нагріти або охолодити повітря тільки за рахунок засобів пасивної утилізації на практиці неможливо, то в доповнення до їх використання неминуча установка нагрівачів або охолоджувачів, що також підвищує вимоги до потужності вентиляторів.

Дослідження впливу конструкції деяких компонентів системи вентиляції наприклад фільтрів, на потужності характеристики вентиляторів детально розглянуто як вітчизняними, так і зарубіжними авторами [23]. Однак питання негативного впливу підвищення ефективності теплообмінних апаратів за рахунок збільшення їх аеродинамічного опору широко в літературі не представлено.

Для наведених апаратів пасивного типу, що працюють на забезпечення нагрівання повітря за низьких температур зовнішнього повітря характерна можливість обмерзання. Дослідження процесів обмерзання, а також способів зменшення його впливу на ефективність систем вентиляції активно ведеться в нашій країні і за кордоном [24]. Наявність ризику обмерзання, що приводить до повного або часткового блокування каналів теплообмінного апарату, не дозволяє використовувати весь потенціал цих апаратів в період їх максимальної затребуваності. Для захисту різних типів утилізаторів необхідне застосування методів регулювання, що знижують їх продуктивність в період ризику обмерзання: циклічна робота для пластинчастих рекуператорів, зниження частоти обертання роторів регенеративних теплообмінних апаратів і регулювання витрат теплоносія за допомогою триходового клапана в схемах RAC і RAMEE.

Зворотна залежність температури ризику обмерзання від номінальної ефективності утилізатора і відносній вологості повітря, яке видаляється, показана в роботі С. М. Анісімова та ін. [25]. Разом зі зменшенням коефіцієнта термічної ефективності при зменшенні перепаду температур на теплообмінному апараті [18], стає очевидним що діапазон параметрів зовнішнього повітря, в якій можливе досягнення пасивними теплообмінними апаратами високих значень економічності вельми обмежений. В умовах реальної експлуатації невизначеність в оцінці продуктивності пасивних теплоутилізаторів призводить до необхідності резервування теплової або холодильної потужності на стадії проектування вентиляційних агрегатів. Цей недолік призводить до збільшення типорозмірів охолоджувачів/нагрівачів, їх аеродинамічного опору і капітальних витрат на їх закупівлю і складальні операції [26].

Нескладно простежити наслідки такого підходу у великих масштабах, прийнявши до уваги необхідність створення інфраструктури електро- і теплопостачання із завищеною потужністю [27].

Також в період опалювального сезону, коли температура зовнішнього повітря вже вимагає активного нагрівання на припливній лінії, а системи опалення ще не включено, спостерігається падіння температури повітря у вентилятованому приміщенні. У деяких випадках падіння температури настільки значне, що виникає необхідність повністю відключити систему вентиляції на цей період. Це призводить не тільки до зниження комфорту в будинку, але й до ризику поширення простудних захворювань.

Метою роботи є аналіз та розробка енергоефективних рішень для пристроїв утилізації теплоти витяжного повітря в системах вентиляції і кондиціонування з урахуванням динаміки кліматичних і внутрішніх характеристик експлуатації.

Результати дослідження

Виходячи з низької ефективності пасивних утилізаторів за малих перепадів температур припливного і витяжного повітря, їх застосування в процесах охолодження повітря не здатне забезпе-

чити необхідний ефект енергозбереження. При охолодженні повітря виникає необхідність надлишкового охолодження припливного повітря до температур, нижчих комфортного рівня для асиміляції теплопритоків [28]. У таких випадках перепад температур на пасивному утилізаторі може досягати від'ємних значень, приводячи до негативного ефекту від їх використання. У країнах з теплим і вологим кліматом, де температурний перепад як і раніше високий, застосування найефективніших способів пасивної теплоутилізації також обмежено.

Дослідження показують низьку ефективність їх застосування як в цілях температурної, так і вологості обробки повітря [29].

Для досягнення високих показників енергоефективності, коли основним завданням температурної обробки повітря є його охолодження, ключовим способом зниження енергоспоживання є модернізація конструкцій охолоджувачів.

Основними і найпоширенішим способом охолодження повітря в системах опалення, вентиляції та кондиціонування є випарне і парокompресійне охолодження. Як і для випадку нагрівання повітря для охолоджувачів існує низка можливостей безпосередньо понизити необхідну холодопродуктивність за рахунок пасивної утилізації, проте на додаток до них можливе зменшення кількості споживаної енергії за рахунок зміни конструкції самих охолоджувачів зі збереженням холодопродуктивності.

Пряме і непряме випарне охолодження повітря активно застосовується вже понад століття [30]. Цей спосіб забезпечує ефективне охолодження за мінімального енергоспоживання, низьких капітальних і експлуатаційних витрат, а також мінімізує шкоду екосфері, оскільки в ньому не потрібно застосування холодильних агентів, які негативно впливають на стан озонового шару і потенціал глобального потепління. Однак, в сучасному будівництві цей спосіб має обмеження, викликані насамперед зростаючими вимогами до комфорту приміщень. Випарним способом неможливо охолодити повітря до температур нижче температури мокрого термометра повітря, що забирається з вулиці. Таким чином, найчастіше параметри припливного повітря виявляються на границі зони комфорту і наявність внутрішніх факторів таких, до прикладу, як підвищення температури повітря у час його проходження через повітропровід здатне привести до порушення стану комфорту [31].

Удосконалення систем випарного охолодження безпосередньо пов'язано з рішенням двох завдань: зниження мінімальної температури охолодження і підвищення економічності. Досягнення першого завдання здійснюється за рахунок зменшення температури мокрого термометра шляхом передохолодження припливного повітря. У літературі наведено приклади конструкцій, які використовують пасивні ґрунтові теплообмінні апарати для попереднього охолодження повітря перед випарним охолоджувачем. Зокрема, в [32] описується конструкція, яка використовує для попереднього охолодження ґрунтовий теплообмінний апарат. За даними авторів публікації для системи з витратою повітря 1700 м³/год, вдалося досягти зниження температури мокрого термометра в передохолоджувачі, який охолоджується чотирма вертикальними свердловинами глибиною по 45 м в середньому на 8...10 °С. Це значно розширило діапазон регулювання охолоджувача і можливості підтримки комфорту, однак збільшило в рази капітальні витрати на його установку.

Зарубіжними авторами описані способи підвищення ефективності випарного охолодження за рахунок комбінації пристроїв прямого і непрямого випаровування в одному агрегаті [32]. Концепція передбачає використання передохолоджувача непрямого випаровування, охолодження якого відбувається за рахунок випаровування води в потоці рециркуляційного повітря. Така схема за розрахунками авторів здатна знизити енергоспоживання будівлі на 15 %. В [33] описана комбінація прямого випарного охолодження і нічного радіаційного охолодження. За рахунок накопичення холодного теплоносія в баку акумулятора в нічний час запропоновано забезпечувати зниження температури мокрого термометра зовнішнього повітря перед його подачею в випарний охолоджувач.

Така схема крім розширення діапазону регулювання дозволяє значно підвищити продуктивність в порівнянні з традиційними апаратами прямого випарного охолодження. Серед способів модернізації агрегатів випарного охолодження крім схемних рішень пропонується також вдосконалення окремих компонентів системи. Наприклад, в роботі Рубцова та ін. описана конструкція коливальної розпилювальної форсунки, здатної забезпечити необхідний ступінь диспергування води при зниженні напору циркуляційного насоса з 30 до 16 бар, що значно знижує його енергоспоживання [34].

При парокompресійному способі охолодження здійснюється за рахунок термодинамічного циклу, енергетичні та економічні показники якого також можуть бути поліпшені і за незмінної продуктивності.

Показники енергоефективності парокompресійної системи охолодження безпосередньо залежать від значень температур випаровування і конденсації. Температура випаровування значною

мірою визначена вимогами до теплової обробки повітря. Занадто висока температура випаровування не дозволяє забезпечити необхідну зміну температури повітря, яке приймається з урахуванням можливості його нагрівання в повітродозподільних мережах, а також асиміляції теплопритоків. Занадто низька температура кипіння може своєю чергою призвести до надмірного випадання конденсату і подальшого його замерзання на поверхні випарника в разі прямого охолодження повітря. У разі використання систем з проміжним теплоносієм верхня планка допустимих за критеріями комфорту температур кипіння знижується ще сильніше за рахунок додаткових втрат при теплообміні в трубопроводах, а нижня — обмежена ризиком замерзання теплоносія. Останній фактор можна виключити шляхом застосування незамерзаючих водних розчинів, проте це тягне за собою подорожчання експлуатації таких систем і додаткові екологічні ризики.

Важливим напрямком удосконалення робочого циклу парокомпресійної машини на ділянці низького тиску можна назвати контроль величини корисного перегріву в випарнику. Для систем вентиляції та кондиціонування характерні значні перепади температур повітря, що подається на випарник, і супутні перепади теплового навантаження викликають коливання перегріву. Поширення електронних дросельних пристроїв розширило можливості контролю величини корисного перегріву в охолоджувачах систем опалення, вентиляції та кондиціонування, засноване як на традиційних співвідношеннях температур і тисків холодоагенту, так і на базі нових принципів обліку розмірних характеристик двофазного потоку в повітряних випарниках [35].

Зважаючи на наявність порівняно вузького діапазону доступних при охолодженні повітря температур кипіння в літературі часто наводяться приклади способів зниження температури конденсації. У традиційних схемах теплової обробки повітря з охолодженням, відведення теплоти від конденсатора здійснюється зовнішнім повітрям. Очевидно, що охолодження повітря потрібно за високих зовнішніх температур, причому чим вище ця температура, тим більше навантаження на систему охолодження. При цьому негативний вплив високих температур конденсації, що залежать в даному випадку від температури навколишнього середовища, на енергоефективність парокомпресійного циклу створює умови, за яких в період пікових навантажень система охолодження повітря працює найменш ефективно. Отже, за різних спроб досягнення високого ступеня забезпеченості параметрів мікроклімату в приміщенні збільшення потужності системи холодопостачання для подолання пікових навантажень буде нелінійним.

Наведена вартість 1 кВт холодопродуктивності з урахуванням умов роботи за пікових навантажень буде значно вище, ніж за усереднених умов роботи.

Наведені вище приклади способів зниження температури теплоносія для випарного охолодження знаходять своє застосування і в парокомпресійному охолодженні. За рахунок використання теплоаккумуляторних пристроїв і природних накопичувачів тепла, таких як ґрунт і ґрунтові води можливе накопичення низькотемпературного середовища. Це дозволяє у випадку з акумуляторами холоду задіяти парокомпресійний агрегат в «найкомфортніших» для нього умовах роботи, наприклад, в нічний час. Такий підхід забезпечує подвійний позитивний ефект: з одного боку виробництво холоду має місце за низьких температур зовнішнього повітря, що збільшує ефективність роботи парокомпресійної системи охолодження, з іншого боку — дозволяє споживати електроенергію за нічним тарифом, знижуючи тим самим експлуатаційні витрати [36].

Однак необхідно враховувати високі капітальні витрати на проведення наведених заходів, а також деякі обмеження, що накладаються на подібні рішення розташуванням і призначенням об'єкта. Крім зростання витрат на початкове устаткування можливість облаштування ґрунтових колекторів вельми обмежена розташуванням об'єкта [37], а установка баків акумуляторів вимагає збільшення площі основних приміщень, зайнятих обладнанням, що за даними [38] знижує інвестиційну привабливість проекту в цілому.

Надмірне зниження температури конденсації, що має місце за необхідності охолодження повітря в зимовий період в таких приміщеннях як серверні, центри обробки даних, деякі типи виробничих приміщень також неприпустимо. Зниження тиску конденсації нижче певного порогу зменшує пропускну здатність механічних дросельних пристроїв і призводить до відхилень у роботі випарника системи охолодження повітря.

На сьогодні виробниками кліматичного обладнання представлені пристрої контролю тиску конденсації, проте їх застосування створює перешкоду для подальшого зниження енергоспоживання компресора за рахунок зменшення перепаду тисків. Обійти це обмеження дозволяє установка в рідинну лінію насоса, що забезпечує стабільний тиск перед дросельним пристроєм [39]. Однак, специфіка завдання разом з можливістю застосування в подібних умовах фрікулінга не дозволили цій технології широко поширитися на практиці.

Висновки

Зростаючі вимоги до якості життя встановлюють вищі стандарти характеристик вентиляційних систем, які використовуються в сучасному будівництві. Ці характеристики впливають не тільки на комфорт людей, а й на їх здоров'я. Багатьма дослідженнями доведено залежності між кількістю подаваного свіжого повітря і кількістю випадків захворювання так званими «хворобами, пов'язаними з роботою в будівлі». Відзначається зростання рівня продуктивності праці співробітників з підвищенням якості внутрішнього середовища в приміщенні. Таким чином, поліпшення здоров'я, комфорту і безпеки людей в будівлях має потенціал для економічних і соціальних вигод за рахунок підвищеної продуктивності праці, зниження захворюваності і витрат на медичне обслуговування.

Є доцільним і економічно обґрунтованим використання досконаліших систем вентиляції, як в споруджуваних будинках, так і під час модернізації існуючих. Однак це призводить до підвищення капітальних і експлуатаційних витрат, зумовлених необхідністю обробки більшої кількості зовнішнього повітря і підтримки великої кількості його характеристик на притоці і всередині приміщення. На сьогоднішній день представлена велика різноманітність технічних рішень в області зниження експлуатаційних витрат, заснованих як на технології пасивної теплоутилізації, так і на термодинамічних циклах, а також на різних комбінаціях цих методів.

За результатами огляду сучасних технічних рішень в області зниження енергоспоживання систем життєзабезпечення, а також з урахуванням техніко-економічних показників впровадження теплоутилізуючого обладнання виявлено низку проблем в галузі створення і застосування пристроїв як активної, так і пасивної теплоутилізації. З існуючих на сьогодні технічних рішень, що дозволяють утилізувати теплову енергію витяжного повітря, за співвідношенням ціни і якості, лідирують роторні регенератори. Їх конструкція, проте, накладає деякі обмеження на їх застосування для модернізації існуючих систем. Великі габарити і неможливість підгонки під різні перетини вентиляційних каналів обмежує їх застосування в умовах обмеженого простору, а неминуче виникнення перетоків і змішання відпрацьованого повітря, що подається, не дозволяє використовувати їх на деяких об'єктах зі шкідливими середовищами, сторонніми запахами або можливістю бактеріологічного зараження.

Розуміння вищевикладених недоліків використання існуючих пасивних і комбінованих систем теплоутилізації, таких як нестабільність роботи і зниження ефективності за низьких температур зовнішнього повітря, зростання кількості теплообмінних апаратів припливної лінії і обмеження застосування деяких типів рекуператорів, призводить до необхідності створення універсальної системи теплоутилізації, що адаптується для нових і модернізованих систем вентиляції, використання якої дасть значний екологічний та економічний ефект.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] "Global Energy and CO₂. Status Report 2018," *IEA Publications*, 2019. [Electronic resource]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f9eb39-7493-4722-aced-61433cbffe10/Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf
- [2] L. Pérez-Lombard, et al., "HVAC systems energy comparisons for an office building," *Proceedings of the Climamed*, Lisbon, 2004, pp. 121-127.
- [3] H. El-Dessouky, H. Ettouney, and A. Al-Zeefari, "Performance analysis of two stage evaporative coolers," *Chemical Engineering Journal*, vol. 102, no. 3, pp. 255-266, 2004.
- [4] K. Biswas et al., "Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts," *Energy and Buildings*, vol. 112, pp. 256-269, 2016.
- [5] А. С. Горшков, «Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий», *Инженерно-строительный журнал*, № 1, с. 9-13, 2010.
- [6] Z. Bako-Biro, "Human perception, SBS symptoms and performance of office work during exposure to air polluted by building materials and personal computers," *International Centre for Indoor Environment and Energy*, 2004.
- [7] Z. Bakó-Biró, et al., "Ventilation rates in schools and pupils' performance," *Building and environment*, vol. 48, pp. 215-223, 2012.
- [8] И. А. Губина, и А. С. Горшков, «Энергосбережение в зданиях при утилизации тепла вытяжного воздуха», *Строительство уникальных зданий и сооружений*, № 4, с. 209-219, 2015.
- [9] V. Vakiloraya, et al., "A review of different strategies for HVAC energy saving," *Energy conversion and management*, vol. 77, pp. 738-754, 2014.
- [10] А. С. Табакова, и О. В. Новикова, «Повышение эффективности теплопотребления здания при применении современных систем вентиляции», *Неделя науки СПбПУ*, 2015, с. 135-138.
- [11] А. А. Бондарук, и Е. А. Голубева, «Системы вентиляции в жилых зданиях с рекуперацией тепла удаляемого воздуха», *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных*, с. 358-360, 2018.
- [12] *СП 118.13330.2012* Общественные здания и сооружения*. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009 (с Изменениями № 1, 2).

- [13] L. Z. Zhang, and J. L. Niu, "Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1347-1367, 2002.
- [14] De Antonellis S. et al., "Experimental analysis and practical effectiveness correlations of enthalpy wheels," *Energy and buildings*, vol. 84, pp. 316-323, 2014.
- [15] Г. Е. Каневец, А. В. Кошельник, С. Д. Суима, и О. В. Алтухова, «Повышение эффективности работы пластинчатых теплообменников путем оптимизации конструктивных и режимных параметров,» *Энергетика. Экология. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ»*, ІЕЕ, с. 133-138, 2011.
- [16] Г. Е. Каневец, А. В. Кошельник, О. В. Алтухова, С. Д. Суима, и Л. М. Коваленко, «Разработка алгоритма оптимизационного расчета пластинчатых теплообменников на основе структурно-модульного подхода,» *Энергетика. Экология. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ»*, ІЕЕ, 398 с, с. 126-132, 2011.
- [17] Fernández-Seara J. et al. "Experimental analysis of an air-to-air heat recovery unit for balanced ventilation systems in residential buildings," *Energy conversion and management*, vol. 52, no. 1, pp. 635-640, 2011.
- [18] M. Rasouli, C. J. Simonson, and R. W. Besant, "Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 9, pp. 1376-1385, 2010.
- [19] Н. В. Белоногов, «Утилизация теплоты в перекрестноточных пластинчатых рекуператорах,» *Сантехника, отопление, кондиционирование*, № 2, с. 75-83, 2012.
- [20] C. Li, and J. Zhao, "Experimental study on indoor air temperature distribution of gravity air-conditioning for cooling," *Energy Procedia*, no. 17, pp. 961-967, 2012.
- [21] Q. Xu, S. Riffat, and S. Zhang, "Review of Heat Recovery Technologies for Building Applications," *Energies* (19961073), vol. 12, no. 7, 2019.
- [22] H. B. Hemingson, C. J. Simonson, and R. W. Besant, "Steady-state performance of a run-around membrane energy exchanger (RAMEE) for a range of outdoor airconditions," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 54, no. 9-10, pp. 1814-1824, 2011.
- [23] A. B. Sulin, and A. S. Marchenko, "Simulation modeling of processes in life support systems," *AIP Conference Proceedings*. – *AIP Publishing LLC*, vol. 2007, no. 1, pp. 65, 2018.
- [24] S. K. Padhmanabhan, et al., "Modeling non-uniform frost growth on a fin-and-tube heat exchanger," *International journal of refrigeration*, vol. 34, no. 8, pp. 2018-2030, 2011.
- [25] С. М. Анисимов и др., «Утилизация теплоты вытяжного воздуха в перекрестноточном рекуператоре,» *Сантехника, отопление, кондиционирование*, № 7, с. 79-83, 2014.
- [26] О. Д. Самарин, и Ю. В. Ильинский, «Обоснование применения утилизации теплоты вытяжного воздуха с учетом её влияния на систему теплоснабжения,» *Вестник МГСУ*, № 7, 2011.
- [27] V. Vakiloroaya, B. Samali, and K. Pishghadam, "A comparative study on the effect of different strategies for energy saving of air-cooled vapor compression airconditioning systems," *Energy and Buildings*, no. 74, pp. 163-172, 2014.
- [28] О. Д. Самарин, «О соотношении температурной эффективности теплоутилизаторов и снижения энергопотребления в системах вентиляции,» *Энергосбережение и водоподготовка*, № 2, с. 40-42, 2009.
- [29] S. Tafelmeier, G. Pernigotto, and A. Gasparella, "Annual performance of sensible and total heat recovery in ventilation systems: Humidity control constraints for European climates," *Buildings*, vol. 7, no. 2, pp. 28, 2017.
- [30] Y. Jiang, and X. Xie, "Theoretical and testing performance of an innovative indirect evaporative chiller," *Solar Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 2041-2055, 2010.
- [31] V. Khalajzadeh, M. Farmahini-Farahani, and G. Heidarinejad, "A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler," *Energy and Buildings*, no. 49, pp. 604-610, 2012.
- [32] A. Khandelwal, P. Talukdar, and S. Jain, "Energy savings in a building using regenerative evaporative cooling," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 581-591, 2011.
- [33] G. Heidarinejad, M. F. Farahani, and S. Delfani, "Investigation of a hybrid system of nocturnal radiative cooling and direct evaporative cooling," *Building and Environment*, vol. 45, no. 6, pp. 1521-1528, 2010.
- [34] А. К. Рубцов, Е. Г. Парахина, и Н. А. Гурко, «Форсунка для систем испарительного охлаждения и увлажнения воздуха,» *Научный журнал НИУИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*, № 1, 2016.
- [35] M. S. Elliott, and B. P. Rasmussen, "On reducing evaporator superheat nonlinearity with control architecture," *International journal of refrigeration*, vol. 33, no. 3, pp. 607-614, 2010.
- [36] О. Б. Цветков, и Ю. А. Лаптев, «Энергосбережение в холодильной технике и проблемы экологии – развитие и перспективы,» *Вестник Международной академии холода*, № 2, 2011.
- [37] А. А. Никитин, *Теплонасосные системы как источник тепло- и хладоснабжения зданий*. София, 2012, т. 1, с. 207-212.
- [38] R. Bunn, «Системы кондиционирования воздуха, предпочитаемые инвесторами,» *АВОК*, № 5, с. 16-29, 2001.
- [39] O. M. Al-Rabghi, and M. M. Akyurt, "A survey of energy efficient strategies for effective air conditioning," *Energy conversion and management*, vol. 45, no. 11-12, pp. 1643-1654, 2004.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.07.2021

Літовко Борис Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: ltvko.bm@knu.edu.ua ;

Лідер Марина Юрївна — старший викладач кафедри теплоенергетики, e-mail: lder.myu@knu.edu.ua .

Криворізький національний університет, Кривий Ріг

B. M. Litovko¹
M. Yu. Lider¹

Analysis of Ways to Increase Energy Efficiency of Ventilation and Air Conditioning Systems

¹Kryvyi Rih National University

The aim of the work is the analysis and development of energy efficient solutions for devices for utilization of exhaust air heat in ventilation and air conditioning systems, taking into account the dynamics of climatic and internal operating characteristics. There has been carried out the analysis of scientific, technical and regulatory documentation in the field of improving the energy efficiency of ventilation and air conditioning systems. The influence of life support systems on energy consumption in the world is shown. The description of a technique of technical and economic estimation of power characteristics of active utilizers which work in the conditions different from passport values is given. The influence of deviations of such operational factors as air consumption, outside air temperature before the utilizer, temperature and humidity of exhaust air is considered. A comparative analysis of ways to improve the energy efficiency of ventilation and air conditioning systems has been conducted. The article provides an overview of the main technological and economic barriers that prevent the transition of such systems to a qualitatively new level of energy efficiency. A reasonable choice from a variety of technical solutions is possible only with the introduction of energy and economic efficiency criteria that can be applied to different types of heat recovery systems in ventilation and air conditioning systems. Therefore, the development of new approaches to the analysis of long-term operation, which allow in the early stages of project activities to predict the economic and environmental effects of specific devices in the given conditions of operation of ventilation and air conditioning, is an urgent task.

Keywords: energy consumption, heating systems, ventilation, air conditioning, heat utilization.

Litovko Borys M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: ltovko.bm@knu.edu.ua ;

Lider Maryna Yu. — Senior Lecturer of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: lder.myu@knu.edu.ua

Б. М. Литовко¹
М. Ю. Лидер¹

Анализ способов повышения энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования

¹Криворожский национальный университет

Целью работы является анализ и разработка энергоэффективных решений для устройств утилизации теплоты вытяжного воздуха в системах вентиляции и кондиционирования с учетом динамики климатических и внутренних характеристик эксплуатации. Проведен анализ научно-технической и нормативной документации в области повышения энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования. Показано влияние систем жизнеобеспечения на энергопотребление в мире. Дано описание методики технико-экономической оценки энергетических характеристик активных утилизаторов, которые работают в условиях отличных от паспортных значений. Рассмотрено влияние отклонения таких эксплуатационных факторов, как затраты воздуха, температура наружного воздуха перед утилизатором, температура и влажность вытяжного воздуха. Проведен сравнительный анализ способов повышения энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования. В статье представлен обзор основных технологических и экономических барьеров, которые предотвращают переход таких систем на качественно новый уровень энергоэффективности. Обоснованный выбор из всего многообразия технических решений возможен только при введении критериев энергетической и экономической эффективности, которые можно применить для разных типов теплоутилизаторов в составе систем вентиляции и кондиционирования. Поэтому, разработка новых подходов к анализу показателей долгосрочной эксплуатации, которые позволяют на ранних этапах проектной деятельности прогнозировать экономический и экологический эффект внедрения конкретных устройств в заданных условиях эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования, является актуальной задачей.

Ключевые слова: энергопотребление, системы отопления, вентиляция, кондиционирование, теплоутилизация.

Литовко Борис Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: ltovko.bm@knu.edu.ua ;

Лидер Марина Юрьевна — старший преподаватель кафедры теплоэнергетики, e-mail: lder.myu@knu.edu.ua