

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Місюри Тимофія Олексійовича  
на тему «Енергоефективність комбінованих схем опалення, вентиляції та  
кондиціонування на основі повітряних теплових насосів»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 – електрична інженерія  
за спеціальністю 144 – теплоенергетика

### **Актуальність теми дисертації.**

У роботі пропонуються методи збереження вичерпних енергетичних ресурсів і зменшення навантаження на традиційні системи виробництва теплоти шляхом включення теплових насосів у об'єкти вентиляції, опалення та кондиціонування повітря. Теплонасосні системи здатні утилізувати низькопотенційну теплоту відновлюваних природних джерел енергії та низькотемпературних вторинних ресурсів для перетворення її в енергію практичного використання. Глобальна поширеність теплових насосів, мільйони установок різного призначення демонструють енергоефективність і практичність впровадження даних систем. Понад 75 % теплонасосних установок працюють у системах тепlopостачання житлових і комунальних будинків, що призводить до значної економії дефіцитного органічного палива, зменшення забруднення навколишнього середовища та покращення умов проживання. Однак успішне впровадження таких систем має ряд проблем, які потребують вирішення.

Новизна даної роботи полягає в енергоефективному проектуванні систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря, інтегруючи низькопотенційне джерело енергії, наприклад, вентиляційні викиди, в установки з тепловим насосом. Цей підхід спрямований на зменшення споживання зовнішньої енергії, зниження необхідної одиничної потужності та узгодження з сучасною енергетичною стратегією використання «безкоштовної» відновлюваної енергії для практичних цілей.

З урахуванням викладеного, теоретичне дослідження енергоефективності теплонасосних систем для цілей опалення, вентиляції та кондиціонування є перспективним, а робота Т. О. Місюри є актуальною.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Проведені дослідження із забезпечення вологісного режиму всередині приміщень теплонасосними системи. На практиці температура є основним параметром для припливного повітря, а додаткове осушення або зволоження відбуваються за допомогою інших пристроїв. У той час як теплові насоси за правильної організації потоків повітря можуть забезпечувати параметри припливного повітря не тільки за температурою, але і за відносною вологістю.

2. Проведений термодинамічний аналіз ефективності теплонасосної системи повітряного опалення та вентиляції виробничого приміщення з урахуванням видалення зайвої вологи. Встановлено, що коефіцієнт рециркуляції для підтримання заданих параметрів повітря в приміщенні має змінюватись в залежності як від температури, так і відотної вологості атмосферного повітря.

3. Проведено аналіз енергоефективності теплонасосних систем з різними способами утилізації низькопотенційної енергії витяжного повітря для вентиляції та кондиціонування приміщень. Розглянуто випадки роботи систем за умов, коли потреби в кондиціонуванні зросли вдвічі, коли в приміщенні присутні надлишкові вологовиділення.

Дисертація містить обґрунтовані результати. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації, підтверджується достатньою кількістю проведених теоретичних досліджень з використанням сучасних методів, які базуються на загальноприйнятих підходах щодо аналізу процесів теплопереносу. Отримані результати не суперечать висновкам відомих теорій. Результати досліджень пройшли апробацією на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях.

Достовірність результатів досліджень забезпечується коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням оригінальних математичних моделей; використанням сучасних методів обробки отриманих теоретичних даних, а також аналізом отриманих даних та даних інших дослідників.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що додаткове комбінування повітряних теплових насосів з іншими низькопотенційними джерелами теплоти веде не тільки до підвищення ефективності роботи перших, але може давати економію капіталовкладень за використання останніх (наприклад, зменшення площі сонячних колекторів, теплообмінних поверхонь випарників або конденсаторів контуру теплового насоса). Варіанти таких комбінацій залежать від призначення та розташування будівлі, але в більшості випадків вони присутні та завжди дають економічний ефект у довгостроковій перспективі.

Крім того, застосування теплових насосів для кондиціонування виробничих приміщень дозволяє поєднувати в одній установці процеси кондиціонування та

осушення припливного та утилізації відпрацьованого повітря, що робить систему більш простою, моноблочною та економічною. Використання теплового насоса в системах вентиляції виробничих приміщень дозволяє забезпечити комфортні умови праці з достатньо високою термодинамічною ефективністю.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Місюри Т. О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 – теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям енергозбереження та підвищення ефективності теплоенергетичних систем.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Місюри Тимофія Олексійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Зміст дисертації викладено послідовно, логічно та доступно. Дисертаційна робота написана коректною технічною мовою з використанням сучасної наукової термінології. Текст дисертації у достатньому для розуміння обсязі проілюстрований графічним матеріалом.

Дисертація складається з вступу, сімох розділів, висновків та списку літератури. Загальний обсяг дисертації 168 сторінок. Робота містить 62 рисунки, список використаних джерел з 105 найменувань.

У вступі розглянуті актуальність, мета та задачі дослідження, наукова новизна та практична значущість роботи.

У першому розділі проведено огляд та аналіз сучасних даних щодо ефективного застосування систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря на базі повітряних теплових насосів з додатковим використанням різних низькопотенційних джерел теплоти або холоду. Проаналізовано сучасні підходи та актуальні тенденції до збільшення енергоефективності теплонасосних систем, наведено літературний огляд з питань організації цих

заходів. На основі проведеного огляду встановлено перелік питань, які потребують більш глибокого дослідження.

У другому розділі розглянуто принципову теплонасосну систему вентиляції та повітряного опалення виробничого приміщення з надлишковим вологовиділенням, у якій застосовано часткову рециркуляцію відпрацьованого повітря для підтримання заданих комфортних умов всередині приміщення. Проведено термодинамічний аналіз роботи системи для визначення необхідних режимів її роботи в холодний період року. Показано, що для підтримання заданих температури та вологовмісту повітря в приміщенні за різних параметрів довкілля коефіцієнт рециркуляції має змінюватись в залежності від температури і відносної вологості атмосферного повітря.

У третьому розділі досліджуються можливості застосування системи вентиляції та кондиціювання з тепловим насосом для підтримки комфортних умов усередині виробничої зони в теплу пору року. У зв'язку з цим було проведено термодинамічний аналіз теплонапосної системи з частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря та змінною часткою свіжого зовнішнього повітря. Потім було проведено чисельний аналіз для оцінки впливу змін температури та відносної вологості навколишнього середовища та характеристик об'єкта вентиляції та кондиціювання на параметри системи. Це дозволило визначити потенційні можливості цієї системи підтримувати комфортні умови у виробничій зоні.

У четвертому розділі проведено термодинамічний аналіз теоретичної моделі теплонапосної установки вентиляції та кондиціювання повітря з рециркуляцією холоду в залежності від параметрів зовнішнього повітря для підтримання температурних і вологісних умов у виробничому приміщенні в теплий період року. За допомогою чисельного аналізу методом послідовних наближень визначено параметри повітря в вузлових точках схеми та оцінено її енергетичну ефективність. Це дозволило встановити режими роботи установки в залежності від параметрів зовнішнього повітря, характеристик об'єктів вентиляції та кондиціювання та надходжень теплоти.

У п'ятому розділі досліджено ефективність та режими роботи моделі теплонапосної системи вентиляції та кондиціювання повітря з рекуперацією холоду вентиляційного повітря в залежності від параметрів зовнішнього повітря, ефективності рекуперації та характеристик приміщення. Проведено розрахунки методом послідовних наближень для оцінки параметрів повітря у вузлових точках системи. Це дозволило визначити теоретичну холодильну ефективність системи та довело переваги рекуперації в порівнянні з рециркуляцією для зменшення споживання енергії тепловим насосом.

У шостому розділі викладено результати термодинамічного аналізу моделі теплонапосної системи вентиляції, кондиціювання та осушення виробничого

приміщення за змінних величин внутрішніх надходжень вологи та теплоти у період перехідної та теплої пори роки. Встановлено та оцінено вплив рекуперації енергії відпрацьованого повітря на ефективність системи. Встановлено теоретичну холодильну ефективність даної системи та показало переваги рекуперації енергії для зниження енергозатрат на роботу системи.

У цьому розділі міститься порівняльний термодинамічний аналіз двох найбільш популярних рішень загальної вентиляції та кондиціювання повітря: припливно-витяжних установок, що базуються на вбудованих контурах теплових насосів або зовнішніх компресорно-конденсаторних блоках як основних джерел енергії. Досліджені теоретичні моделі двох систем можна використовувати для оцінки доцільності тієї чи іншої схеми в залежності від проекту, а також під час проектування припливно-витяжних установок.

У висновках наведено узагальнення отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 21 науковій публікації здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 1 стаття у науковому виданні іноземних держав.

Також результати дисертації були апробовані на 13 наукових фахових конференціях.

Всі представлені публікації виконані на високому рівні з усіма необхідними складовими, згідно з умовами видавництва.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

Незважаючи на загальне позитивне враження від розглянутої дисертаційної роботи, вона містить деякі зауваження та дискусійні твердження, які наведено нижче.

1. Прийняття в якості холодильного коефіцієнта  $\epsilon$  відношення кількості теплоти, відібраної за цикл від джерела (холодильної камери), до витраченої в циклі роботи системи вентиляції та кондиціювання, не означає можливості

ототожнювати будь-яке значення  $\varepsilon$  з відношенням температури  $T_2$  “холодного” джерела до різниці температур  $T_1 - T_2$  (“гарячого” та “холодного” джерел, що відповідає зворотному циклу Карно. Причиною є втрати енергії (теплоти) з огляду на необоротність та недосяжність адіабатності процесів. Реальні теплові двигуни на відміну від ідеальних (внаслідок необоротності) мають ККД  $\eta'_{\text{необ}} < \eta_{\text{об}}$ . За цих умов важко оцінювати підхід автора щодо визначення холодильного ефекту  $\varepsilon$  через відповідні зовнішні за теплообміном до холодильного агента температури повітряного теплоносія.

Тобто будь-які попередні розрахунки характеристик холодильного процесу та окремих тепломасообмінних процесів, стадій реалізації проекту потребують верифікації результатів шляхом експериментальних досліджень або/та суворих розрахунків.

2. Недостатньо відображені у вихідних положеннях до роботи та в ході її викладання фундаментальні засади (термодинаміка та процеси перенесення (тепломасообмін в окремих апаратах розглянутої системи)), які забезпечують заданий стан повітря (кондиціювання). Чисельним варіантним розрахункам, проведеним в рамках наданих результатів, у тому числі графічних, не передують теплофізичні обґрунтування або пояснення. Необхідно мати на увазі, що тільки при розгляді в цілому кожної з наданих схем слід керуватись напряду балансом енергії вхідних та вихідних потоків повітряного теплоносія  $G_0$  з відповідними параметрами, з одного боку, та витратами електроенергії на установку вентиляції та кондиціювання, з іншого боку, з урахуванням ККД системи.

3. У роботі досліджені математичні моделі припливно-витяжних установок із встановленим контуром теплового насоса. У будь-якому контурі теплового насоса присутній випарник для конденсації холодильного агента. У даному випадку конденсація відбувається за рахунок потоку повітря. Я припускаю, що в випарнику утворюється водяний конденсат, коли повітряний потік охолоджується до температури точки роси. Яким чином цей конденсат видаляється з повітряного потоку, що йде далі, наприклад, до камери змішування? Чи враховується ентальпія конденсату в розрахунках систем?

4. Для теплонасосних систем вентиляції та кондиціювання існують критичні значення температур зовнішнього повітря, за яких можлива роботи цих систем. Автор це враховує під час своїх розрахунків. Проте на графічних залежностях обмеження роботи систем наведені тільки для температур повітряних потоків на виході з конденсатора та випарника теплового насоса. Для більшої наочності та більш легкого орієнтування в результатах дослідження потрібно було б вказувати граничні межі застосування теплонасосних систем у кожній графічній залежності: для частки свіжого зовнішнього повітря, холодильних коефіцієнтів теплового насоса та схеми, тощо.

5. У розділі 4 досліджується теплонасосна система вентиляції та кондиціювання, в якій використовується рекуператор для нагрівання припливного повітря до заданої температури  $t_1$ . При цьому автор зазначає, що потоки холодного та гарячого повітря є рівними та незмінними при протіканні через рекуператор. Змінними є лише температури потоків на вході до рекуператора. Не зрозуміло, як при цьому досягається необхідне постійне значення температури  $t_1$  припливного повітря. Адже температури повітряних потоків є змінними, а їх масові потоки та сам рекуператор, тобто його поверхня теплообміну, залишаються постійними.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

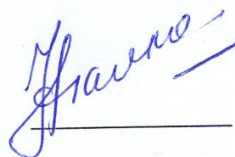
### Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Місюри Тимофія Олексійовича на тему «Енергоефективність комбінованих схем опалення, вентиляції та кондиціювання на основі повітряних теплових насосів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 – електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Місюра Тимофій Олексійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – електрична інженерія за спеціальністю 144 – теплоенергетика.

### Офіційний опонент:

завідувач відділу теплофізики  
енергоефективних теплотехнологій  
Інститут технічної теплофізики  
НАН України  
доктор технічних наук, професор



Наталія ФІАЛКО

М.П.

« 11 » січня 2024 року

