

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

к.т.н., доцента **Жихаревої Наталії Віталіївни**

на дисертаційну роботу **Гарасима Дмитра Ігоровича**

на тему **«Ексергетичне обґрунтування та підвищення енергоефективності роботи систем кондиціонування повітря для чистих приміщень»**, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

### **Актуальність теми.**

Актуальність розв'язання питання інтенсифікації роботи СКП (систем кондиціонування повітря) з метою впровадження енергоощадних (ексергоощадних) режимів їх роботи, зниження енергетичних витрат на роботу СКП шляхом підвищення їх ексергетичного ККД.

Підвищення ефективності використання енергоємного обладнання є важливою умовою успішної реалізації програми енергозбереження в нашій державі. Для оцінки енергоефективності обладнання СКП останнім часом застосовують один із загальних термодинамічних методів аналізу – ексергетичний. Ексергетичний аналіз дозволяє не тільки врахувати кількість енергії, яка витрачається і відводиться від системи, але й якість цієї енергії, тобто її здатність бути перетвореною у корисну роботу.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідних бюджетних та госпдоговірних робіт, які виконувались і виконуються за основними напрямками наукової діяльності Національного університету «Львівська політехніка».

Дисертація виконана згідно пріоритетного напрямку науково-дослідної держбюджетної роботи кафедри «Теплогазопостачання і вентиляція» Національного університету «Львівська політехніка» з проблем «Ексергетичний

аналіз інженерних систем» відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0110U007106) і «Ексергетичний аналіз систем кондиціонування повітря та холодопостачання» – (№ держреєстрації 0115U004223) та госпдоговірних робіт за власною ініціативою № 0408 «Розроблення методу дослідження параметрів мікроклімату в чистих приміщеннях» (№ держреєстрації 0112U004517), № 0437 «Ексергетичне обґрунтування та підвищення енергоефективності роботи систем кондиціонування повітря для чистих приміщень» (№ держреєстрації 0113U005263), № 0475 «Дослідження енергоефективності центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення» (№ держреєстрації 0114U000884) і відповідає Закону України від 1 липня 1994 року № 74/94-ВР «Про енергозбереження».

**Мета і задачі дослідження.** Дисертантом кваліфіковано визначено мету та сформульовано завдання досліджень відповідно до поставленої мети.

Метою роботи є розроблення ексергоощадних режимів роботи СКП чистих приміщень і на цій основі підвищення енергоефективності роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень.

**Розв'язано такі задачі:**

– проведений критичний аналіз використання методу ексергетичного дослідження процесу роботи СКП, зокрема чистих приміщень, та навести вимоги до якості повітря та мікроклімату чистих приміщень різного призначення;

– використаний метод ексергетичного аналізу для оцінювання роботи СКП, який в подальшому розвинути його для ексергетичного дослідження процесу роботи СКП так, щоб він став основою для створення математичних моделей роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень та їх комп'ютерного програмування;

– розроблені дослідницькі комп'ютерні програми ексергетичного аналізу процесу роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень для виконання розрахунково-кількісних експериментів та ексергетичного

обґрунтування і підвищення енергоефективності роботи центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень;

– вивчений вплив різних факторів, а саме: температури і вологовмісту навколишнього середовища, внутрішньої температури і вологовмісту чистого приміщення, різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям у чистих приміщеннях, коефіцієнта трансформації *EER* холодильної машини на процес роботи і ексергетичну ефективність центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень та втрати ексергії в основних їх елементах на основі діаграми Грассмана;

– отримані відповідні узагальнюючі залежності ексергетичного ККД центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень від факторів, які впливають на процес їх роботи;

– підтверджена достовірність отриманих у роботі результатів для центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень з експериментальними дослідженнями.

– надані рекомендації щодо вдосконалення роботи центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень.

**Об'єкт дослідження.** Це є процеси роботи центральних прямоотечійних СКП, зокрема для чистих приміщень.

**Предмет дослідження.** Автором дисертаційної роботи вивчена ексергетична ефективність процесів роботи центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень, включаючи процеси втрат ексергії під час дисипації енергії, з метою підвищення їх енергоефективності.

**Методи дослідження.** Автором використано такі основні методи досліджень для аналізу ефективності процесів роботи центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень: ексергетичний метод термодинамічного дослідження інженерних систем; закони термодинаміки та методи теорії тепломасообміну; методи математичного моделювання роботи центральних прямоотечійних СКП; методи комп'ютерного програмування; комп'ютерне

опрацювання результатів досліджень; експериментальні методи – для експериментальних досліджень процесів роботи СКП.

**Наукова новизна.** Автор роботи одержав подальший розвиток методу ексергетичного аналізу і вперше поширено його в частині оцінювання центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником.

Дисертантом створено алгоритми та розроблено математичні моделі роботи СКП на прикладі центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником для проведення їх енергетичного та ексергетичного аналізу та, відповідно, розроблені комп'ютерні програми для здійснення досліджень.

Автор виконав розрахунково-кількісні експерименти на математичних моделях роботи СКП на прикладі центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником та розв'язано завдання розроблення ефективних ексергоощадних режимів роботи цих СКП.

Вперше досліджено вплив температури і вологовмісту навколишнього середовища, внутрішніх температури і вологовмісту повітря чистого приміщення, різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям у чистому приміщенні та коефіцієнта трансформації *EER* холодильної машини на процес роботи СКП на прикладі центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником та виявлено характер цього впливу на ексергетичний ККД і втрати ексергії в їх елементах.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність запропонованих математичних моделей центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень та можливість підвищити ексергетичний ККД вказаних СКП на 13,7...48%, а також покращити їх економічні показники до 8...12%.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у реалізації досліджень у вигляді інженерних методів, алгоритмів, комп'ютерних програм

для розрахунку і прогнозування ефективних процесів роботи центральних прямоотечійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним теплообмінником, які є базою для розроблення високоєфективних та ексергоощадних СКП. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготування фахівців за спеціальністю “Теплогазопостачання і вентиляція” під час викладання дисциплін: «Кондиціонування повітря та холодопостачання», «Проектування систем кондиціонування повітря та холодопостачання», виконання магістерських кваліфікаційних робіт, а також впроваджені для функціонування ТОВ «Полікор» (м. Львів), що дозволило зменшити споживання електричної енергії в експлуатованих СКП залежно від зовнішніх температурних умов на 8-12% та отримати очікуваний економічний ефект у розмірі 82 тис. грн., операційних чистих кімнат у кардіохірургічному відділенні ЛОКЛ у м. Львові, що дало можливість створити оптимальний мікроклімат та антибактеріальне середовище у цих операційних кімнатах, посприяло проведенню успішних операцій, а значить отримати соціальний ефект від впровадження центральної прямоотечійної системи кондиціонування повітря.

#### **Обґрунтованість і достовірність наукових висновків і рекомендацій.**

Наведені в роботі наукові висновки і рекомендації не суперечать відомим законам і підтверджені математичними дослідженнями та їх співставленням з даними експериментів з дослідження ексергетичного ККД СКП.. Висновки і рекомендації, що стосуються - використанням фундаментальних положень термодинаміки з ексергетичного аналізу інженерних систем; масштабністю комплексних розрахунково-кількісних, експериментальних досліджень та натурних спостережень, їх повторюваністю і передбачуваністю.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи та окремих розділів доповідались, обговорювались та отримали позитивну оцінку на: науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу та Національного університету «Львівська політехніка» у період з 2013 до 2017 року; Четвертій міжнародній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві», Київ, 2014; II-ій міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Енергетика, екологія,

компьютерные технологии в строительстве», Дніпропетровськ, 2014; Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення», Рівне, 2015; XV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності», Одеса, 2015; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів: «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», Одеса, 2015; XV International Scientific Conference: «Current Issues of Civil and Environmental Engineering and Architecture», Rzeszow (Польща), 2015; X Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2015; Шостій міжнародній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві», Київ, 2016; Міжнародній науково-технічній конференції «ЕкоКомфорт», Львів, 2016; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів: «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», Одеса, 2017; Сьомій міжнародній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві», Київ, 2017.

У повному обсязі дисертація доповідалася на розширеному засіданні кафедри «Теплогазопостачання і вентиляція» Національного університету «Львівська політехніка».

**Мова і стиль роботи.** Дисертаційна робота та автореферат написані українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Виклад матеріалу дисертації є логічним і відповідає вимогам до наукових праць, а зміст роботи висвітлює основні результати наукових досліджень. Суттєвих зауважень щодо пропущених орфографічних та друкарських помилок немає.

**Публікації та автореферат.** Результати дисертації опубліковано у 27 наукових працях. З них 14 статей у наукових фахових виданнях (зокрема 4 – з Index DOAJ, EBSCO, Copernicus), 2 статті у закордонних виданнях (зокрема 1 – з Index Copernicus), 11 у тезах та матеріалах доповідей на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях.

Автореферат за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 170 найменувань, 22 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 249 сторінок, зокрема 170 сторінок основного тексту, 26 рисунків, 13 таблиць. Додатки складають 38 сторінок.

### **Аналіз дисертаційної роботи**

**Вступ** містить загальну характеристику дисертації, а саме актуальність роботи, ступінь її обґрунтованості, мету і завдання досліджень, наукову новизну та інші характеристики, передбачені положенням ДАК МОН України.

У **першому розділі** (стор. 38 – 72) дисертантом виконано огляд джерел літератури, у якому наведено вимоги до якості повітря та мікроклімату чистих приміщень.

Наведено та проаналізовано 6 схемних рішень СКП, що застосовують для чистих приміщень та вказано вимоги до них.

Здійснено загальний аналіз щодо використання поняття «ексергія», призначення та проведення ексергетичного методу аналізу центральних СКП, енергоспоживання та шляхів енергозбереження у СКП.

Автором встановлено, що використання ексергетичного методу термодинамічного аналізу для проведення детального аналізу функціонування СКП чистих приміщень та підвищення енергоефективності їх роботи наразі є недостатнім.

На основі аналітичного вивчення літературних джерел автором сформульовано основні завдання і напрямки досліджень: створення енергоощадних (ексергоощадних) режимів роботи центральних прямотечійних СКП з метою підвищення їх енергоефективності на основі їх ексергетичного аналізу.

У другому розділі (стор. 73 – 108) дисертант обґрунтовує вибір об'єктом дослідження процесів роботи центральних прямотечійних систем кондиціонування повітря чистих приміщень на прикладі вивчення процесів роботи СКП з камерою зрошення та з рекуперативним повітроохолодником, наводить їх характеристику та описує процес їх роботи.

Здобувач зобразив процеси роботи досліджуваних СКП на  $I-d$  – діаграмі та визначив температуру, питому ентальпію, вологовміст і відносну вологість у характерних точках цих процесів.

Автор наводить методи складання енергетичного та ексергетичного балансів досліджуваних СКП та подає ексергетичний баланс досліджуваних СКП у вигляді ексергетичних діаграм потоків Грассмана.

Дисертант провів розрахунок ексергії у характерних точках процесів роботи досліджуваних СКП.

Виконано значну кількість розрахунково-кількісних експериментів на розроблених математичних моделях досліджуваних СКП, які відтворювали процеси їх роботи за допомогою комп'ютерної техніки і відповідного програмного забезпечення, що відображено у подальших розділах дисертації.

У третьому розділі (стор. 110 – 161) дисертант застосовує метод ексергетичного аналізу центральних прямотечійних СКП чистих приміщень та досліджує вплив різних факторів на їх ексергетичний ККД. Дослідження здійснено за допомогою розробленої автором комп'ютерної програми енергетичного та ексергетичного аналізу.

Здобувачем проаналізовано вплив температури і вологовмісту навколишнього середовища на ексергетичний ККД досліджуваних СКП, внутрішньої температури і вологовмісту чистого приміщення, різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям у чистих приміщеннях, коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини на процес роботи і ексергетичну ефективність центральних прямотечійних СКП чистих приміщень та втрати ексергії в основних їх елементах на основі діаграми Грассмана.



Дисертант наводить результати досліджень у вигляді відповідних графічних залежностей та аналітичних розрахункових формул.

Автор надає рекомендації щодо енергоощадної (ексергоощадної) експлуатації СКП чистих приміщень СКП чистих приміщень.

У четвертому розділі (стор. 165 – 175) дисертантом наведено методику та прилади, які застосовувались для експериментальних досліджень на впровадженій центральній прямотечій СКП операційних чистих кімнат для визначення її фактичного ексергетичного ККД залежно від різних факторів, які впливають на її роботу.

Експериментальні дослідження проведені на впровадженій СКП у м. Львів, в кардіохірургічному відділенні №1 Львівської обласної клінічної лікарні.

Наведено результати експериментальних досліджень на цій СКП та здійснено їх порівняння з відповідними дослідження на математичній моделі.

Проведені автором експериментальні дослідження показали, що математична модель центральної прямотечій СКП з рекуперативним повітроохолодником задовольняє умовам адекватності.

Встановлено, що відносна похибка визначена за ексергетичним ККД досліджуваної СКП становить  $\partial_{\eta_e} = 3,8\%$ .

У п'ятому розділі ( стор. 176-192 ) дисертант вказує узагальнені залежності для визначення ексергетичного ККД досліджуваних СКП чистих приміщень.

Автор наводить загальні пропозиції щодо заходів з енергозбереження для ефективної роботи центральних прямотечій СКП чистих приміщень.

Вирішена економічна та соціальна доцільність впровадження результатів дисертаційної роботи. Показано, що очікуваний економічний ефект придбання до впровадження ТзОВ «Полікор» результатів дисертації складає 82 тис. грн.

Дисертантом встановлено, що соціальний ефект від впровадження центральної прямотечій системи кондиціонування повітря для операційних чистих кімнат кардіохірургічного відділення у м. Львові дав можливість

створити оптимальний мікроклімат та антибактеріальне середовище у цих кімнатах, що посприяло проведенню успішних операцій.

### **Недоліки дисертації та автореферату**

Під час рецензування дисертаційної роботи та автореферату виявлено наступні зауваження та недоліки:

1. У літературному огляді багато уваги приділено поняттю чистих приміщень, які, своєю чергою, не входять до основного напрямку досліджень даної дисертаційної роботи.

2. В розділі 1, доцільно було б навести глибші характеристики досліджуваного методу, який достатньо широко застосовують при кондиціюванні чистих приміщень.

3. Для дослідження ефективності роботи об'єктів дослідження розглядається їх робота тільки у теплий період року, а у холодний період – ні. Чому?

4. Масову продуктивність центрального кондиціонера бажано було б розрахувати також за надлишками явної теплоти ( формули (2.85 – 2.86)).

5. Бажано, щоб при розрахунках СКП чистих приміщень враховувалась неоднорідність і нестабільність тепловологісних умов у даних приміщеннях.

6. Із роботи не ячно який чисельнїй метод був використаний при проведення енергетичних розрахунків та ексергетичних балансів

7. На графіках залежності ексергетичного ККД від різних факторів, які впливають на нього, його значення відображено у відсотках (%), що не вказано на цих графіках. А відомо, що будь-який ККД в частках одиниці не може бути вищим одиниці.

8. У 5-му розділі дисертації вказані пропозиції щодо заходів з енергозбереження для ефективної роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень. Доцільним було б також розглянути їх у розрізі з досліджуваними СКП.

9. В додатку в логічних блоках повинні бути присутні знаки «+», «-», а також приведені характеристики, які змінюються при поверненні за циклом.

Висновки до дисертації містять узагальнені наукові та практичні результати, отримані автором в процесі виконання дисертаційної роботи. Робота створює добре враження послідовним розв'язанням комплексу важливих питань. В ній відсутні суттєві перебільшення та недоробки. Зміст висновків в авторефераті та дисертації ідентичний. Мова автореферату і дисертації українська, стиль викладення логічний, з використанням загальноприйнятої технічної термінології. Дисертація оформлена відповідно до вимог ДАК України, автореферат відповідає її змісту та відображає основні положення дисертації.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота *Гарасима Дмитра Ігоровича* на тему «*Ексергетичне обґрунтування та підвищення енергоефективності роботи систем кондиціювання повітря для чистих приміщень*» є актуальною за змістом, включає в себе наукову новизну, основні результати обґрунтовані і перспективні для використання у науці, промисловій та інженерній практиці. Робота свідчить про вміння самостійно формулювати і розв'язувати математичні задачі, пов'язані з вирішенням досліджуваних питань та робити прикладні висновки. Основні положення і результати роботи опубліковані у фахових виданнях, включених в перелік ДАК МОН України. Дисертація та автореферат оформлені відповідно до вимог положення ДАК МОН України. Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Отже, дисертаційна робота «*Ексергетичне обґрунтування та підвищення енергоефективності роботи систем кондиціювання повітря для чистих приміщень*» є завершеною науковою працею, в якій на підставі виконаних автором досліджень, вирішено методи підвищення енергоефективності роботи систем кондиціювання повітря для чистих приміщень на підставі ексергетичного обґрунтування і отримано науково-обґрунтовані теоретичні та технічні рішення.

Наведені зауваження не знижують цінності роботи, яка виконана на високому науковому рівні і повністю відповідає вимогам ДАК МОН України, У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані теоретичні і технічні результати, які сукупно є суттєвими для розвитку холодильної, вакуумної та компресорної техніки, систем кондиціонування.

За актуальністю обраної теми, обсягом та змістом виконаних досліджень, ступенем обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в опублікованих працях дисертаційна робота відповідає «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року (із змінами), щодо кандидатських дисертацій, а її автор, *Гарасим Дмитро Ігорович*, вважаю, що заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент:

Доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря  
Одеської національної академії харчових технологій МОН України, к.т.н.

Н.В. Жихарева

Підпис к.т.н., доц. Н.В. Жихаревої

«ЗАСВІДЧУЮ»

Вчений секретар Ради  
Одеського національної академії харчових технологій МОН України



Ю.С. Федченко

"15" 02 2018 р.