

## ВІДГУК

офіційного опонента, д.т.н., професора Радченка Миколи Івановича на дисертаційну роботу Гарасима Дмитра Ігоровича на тему «Ексергетичне обґрунтування та підвищення енергоефективності роботи систем кондиціонування повітря для чистих приміщень», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

### 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Структура та обсяг дисертації.** Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 249 стор., включаючи список використаних джерел з 170 найменувань, 26 стор. з рисунками і 13 стор. з таблицями. Додатки складають 38 сторінок.

**Оформлення дисертації.** Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення".

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених завдань дослідження, їх розв'язки повністю розкрито, матеріал викладено грамотною технічною мовою.

Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, що висувуються до кандидатських дисертацій.

Зміст автореферату ідентичний змісту дисертації і відображає основні положення роботи.

**Зміст дисертації, об'єкт і предмет** дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень:

– за формулою спеціальності (вибірково): розвиток теорії і методів дослідження процесів отримання, перетворення, передачі та використання теплової енергії, палив і теплоносіїв різних типів в енергетичних установках;

– за напрямками досліджень (вибірково):

п.5 – удосконалення існуючих систем охолодження;

п.10 – експериментальні та теоретичні дослідження теплофізичних властивостей робочих тіл теплотехнічних пристроїв;

п.12 – дослідження і створення засобів енергозбереження у промислових агрегатах і процесах.

### Зміст роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, відображено повноту їх викладення у публікаціях та ступінь апробації на конференціях. Обсяг і форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до кандидатської дисертації та достатні для ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел і наведено аналітичний огляд стану проблеми підвищення енергоефективності роботи центральних прямотечійних систем кондиціонування повітря (СКП) для чистих приміщень.

Автор наводить вимоги до якості повітря в чистих приміщеннях і до СКП чистих приміщень, аналізує їх схемні рішення.

У розділі проведено також огляд джерел літератури з ексергетичного аналізу центральних СКП.

Обґрунтовано доцільність використання сучасного методу ексергетичного аналізу ефективності роботи СКП чистих приміщень.

У другому розділі автор обґрунтовує вибір об'єктом дослідження процесів роботи центральних прямотечійних систем кондиціонування повітря, а саме СКП з камерою зрошення та впроваджену у м. Львові СКП з рекуперативним повітроохолодником. Наводиться характеристика СКП і технічні дані.

Для подальшого аналізу та проведення розрахунково-кількісних досліджень, зокрема визначення температури, питомої ентальпії, вологовмісту, відносної вологості та питомої ексергії у характерних точках процесів роботи вказаних СКП, здобувач використовує  $I-d$  – діаграми.

Здійснено розрахунок енергетичної ефективності СКП та складено ексергетичні баланси з наведенням ексергетичних діаграм потоків Грассмана.

Третій розділ дисертації присвячено застосуванню методу ексергетичного аналізу центральних прямотечійних СКП чистих приміщень та дослідженню впливу різних факторів на їх ексергетичний ККД. Дослідження здійснено з використанням розробленої автором комп'ютерної програми енергетичного та ексергетичного аналізу.

Здобувач проаналізував вплив температури і вологовмісту навколишнього середовища на ексергетичний ККД досліджуваних СКП, температури і вологовмісту повітря чистого приміщення, різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям чистих приміщень, коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини на енергетичну ефективність центральних прямотечійних СКП чистих приміщень та втрати ексергії в основних їх елементах на основі діаграми Грассмана.

У четвертому розділі роботи наведено методику та прилади, які застосовувались при експериментальних дослідженнях розробленої центральної прямотечійної СКП операційних чистих кімнат, впровадженої в кардіохірургічному відділенні №1 Львівської обласної клінічної лікарні, проведених з метою визначення ексергетичного ККД СКП залежно від різних факторів, які впливають на її роботу.

Наведено дані експериментальних досліджень СКП та здійснено їх порівняння з результатами математичного моделювання. Проведені автором експериментальні дослідження показали, що математична модель центральної прямотечійної СКП з рекуперативним повітроохолодником задовольняє умовам адекватності.

П'ятий розділ присвячено розробленню узагальнених залежностей для визначення ексергетичного ККД досліджуваних СКП чистих приміщень. Автор наводить пропозиції щодо заходів з енергозбереження для ефективної роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень.

Наведено дані з очікуваного економічного ефекту від впровадження результатів дисертації. Показано, що соціальний ефект від впровадження центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря для операційних чистих кімнат кардіохірургічного відділення у м. Львові полягає у створенні оптимального мікроклімату та антибактеріального середовища у цих кімнатах, що сприяє проведенню успішних операцій.

## 2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Проблема зниження енерговитрат при експлуатації систем кондиціонування повітря (СКП), які є доволі енергоємними і пов'язані з перетворенням енергії різних видів, стоїть доволі гостро. То ж завдання адекватної оцінки та підвищення енергоефективності СКП є актуальними як на науково-методологічному, так і технологічному та конструктивному рівнях.

## 3. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

Методологічну основу дослідження становить системний підхід до виконання енергетичного та ексергетичного аналізу ефективності роботи систем кондиціонування повітря, заснований на ексергетичному методі термодинамічного дослідження інженерних систем.

Фізичну основу дослідження становлять процеси тепловологісної обробки повітря в системах кондиціонування з відповідним відображенням в  $I-d$  – діаграмі вологого повітря.

### Математичний апарат дисертації.

Математичне моделювання процесів тепловологісної обробки повітря в системах кондиціонування та їх елементах з поданням результатів в  $I-d$  – діаграмі вологого повітря.

#### 4. ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою завдань теоретичного та експериментального досліджень; застосуванням сучасних методів термодинамічного аналізу енергоефективності СКП та математичного моделювання; задовільним узгодженням результатів теоретичних досліджень з даними по ексергетичному ККД, отриманими шляхом експериментального дослідження СКП.

#### 5. НОВИЗНА НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

**Наукове значення** дисертаційної роботи, на наш погляд, полягає у розробці теоретичної бази дослідження енергоефективності центральних прямооточійних систем кондиціонування повітря (СКП) на основі методу ексергетичного аналізу, виявлення і реалізації резервів її підвищення шляхом визначення енергоощадних режимів роботи, що забезпечують скорочення втрат ексергії в елементах і СКП як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником в цілому при створенні оптимального мікроклімату в чистих приміщеннях.

Вперше отримані наукові результати:

- вдосконалено метод ексергетичного аналізу енергоефективності систем кондиціонування повітря (СКП) стосовно виявлення і реалізації резервів її підвищення шляхом визначення енергоощадних режимів роботи центральних прямооточійних СКП, що забезпечують скорочення втрат ексергії в елементах і СКП в цілому як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником;

- розроблено алгоритми та математичні моделі роботи центральних прямооточійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником, які дають можливість виявлення резервів скорочення втрат ексергії в елементах і СКП в цілому та їх реалізації шляхом раціональної організації процесів;

- за результатами математичного моделювання роботи центральних прямооточійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником визначено ексергоощадні режими їх експлуатації;

- досліджено і виявлено особливості впливу температури і вологовмісту навколишнього середовища, температури і вологовмісту повітря чистого приміщення, різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям у чистому приміщенні та коефіцієнта трансформації EER холодильної машини на ефективність роботи центральних прямооточійних СКП чистих приміщень як з камерою зрошення, так і з рекуперативним повітроохолодником, виявлено характер цього впливу на ексергетичний ККД СКП і втрати ексергії в їх елементах;

- за результатами розрахунково-кількісних експериментів отримано емпіричні залежності з впливу визначальних факторів на ексергетичну ефективність СКП та втрати ексергії в основних їх елементах;

– отримано експериментальні дані з енергоефективності центральних прямотечійних СКП чистих приміщень, що підтвердили адекватність розроблених математичних моделей СКП та можливість підвищити ексергетичний ККД СКП на 14...48%, а також покращити їх економічні показники на 8...12%.

## **6. ЗНАЧЕННЯ ОТРИМАНИХ В РОБОТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ**

Одержав подальший розвиток метод ексергетичного аналізу енергоефективності систем кондиціонування повітря, виявлення і реалізації резервів скорочення втрат ексергії в елементах і в центральних прямотечійних системах кондиціонування повітря чистих приміщень в цілому.

**Практична цінність** отриманих результатів полягає в реалізації досліджень у вигляді інженерних методів, алгоритмів, комп'ютерних програм для розрахунку і прогнозування ефективних режимів роботи центральних прямотечійних СКП чистих приміщень з камерою зрошення та з рекуперативним теплообмінником, які є базою для розроблення високоефективних енергоощадних СКП.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ТОВ «Полікор» (м. Львів), що дозволило зменшити споживання електричної енергії при експлуатації СКП залежно від зовнішніх температурних умов на 8-12% та отримати економічний ефект у розмірі 82 тис. грн., операційних чистих кімнат у кардіохірургічному відділенні ЛОКІ у м. Львові, дало можливість створити оптимальний мікроклімат та антибактеріальне середовище в цих операційних кімнатах, посприяло проведенню успішних операцій, а значить отримати соціальний ефект від впровадження центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря.

## **7. ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі з підготовки фахівців за спеціальністю “Теплогазопостачання і вентиляція” при викладенні дисциплін: «Кондиціонування повітря та холодопостачання», «Проектування систем кондиціонування повітря та холодопостачання», а також виконанні магістерських кваліфікаційних робіт.

## **8. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Одержані автором теоретичні та прикладні результати сукупно вирішують поставлену науково-прикладну задачу визначення енергоощадних режимів роботи центральних прямотечійних систем кондиціонування повітря. Матеріал подано у логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків по розділах і загальних висновків по роботі, що сприяє її сприйняттю як цілісного дослідження.

Наведені в роботі результати одержані автором особисто.

## 9. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

За темою дисертації опубліковано 27 друківаних наукових праць, серед яких 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.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації; наведені в них наукові результати і висновки по роботі ідентичні.

## 10. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Не згадано вчених, які зробили вагомий внесок в теорію тепло- та вологообміну в системах кондиціонування (А.А. Гоголіна, Є.А. Карпіса та ін.)

2. При виборі центральної прямотечійної СКП чистих приміщень повітропродуктивністю 10 000 кг/год з камерою зрошення вказано (с. 74), що вона порашована за асиміляцією пилинок у повітрі приміщення. Але не наведено ні параметрів приміщення, ні результатів розрахунку.

3. При дослідженні залежності ексергетичного ККД від температури навколишнього середовища доцільним було б зменшити її нижні граничні значення, які для СКП з камерою зрошення прийняті на рівні 26°C (с. 111), а для СКП з рекуперативним повітроохолодником – 30°C (с. 117), що пов'язано з кліматичними особливостями в Україні.

4. При проведенні ексергетичного аналізу для досліджуваних систем кондиціонування повітря (розділ 2) слід було врахувати втрати ексергії, пов'язані з втратою аеродинамічного тиску.

5. У розрахунках СКП з камерою зрошення не враховувались енергетичні втрати через підігрівання повітря у повітропроводах, хоча на  $I-d$  – діаграмі (рис. 2.3) цей процес відображено.

6. Не зроблені висновки за результатами розрахунку ексергетичного ККД досліджуваних систем кондиціонування повітря на с. 78 і 82.

7. Оскільки найбільші втрати ексергії у впровадженій СКП з рекуперативним повітроохолодником мають місце в холодильній машині, необхідно було додатково дослідити їх величини в окремих її елементах.

8. Відсутня інформація щодо розташування датчиків заміру параметрів під час проведення експериментальних досліджень.

9. Відсутня інформація щодо проведення статистичної обробки експериментальних даних.

10. Економічну ефективність від впровадження результатів дисертаційної роботи (с. 191) варто навести у грн/рік.

Втім зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи як за змістом, так і за науковим рівнем.

## 11. ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

У результаті вивчення представленої дисертаційної роботи, автореферату і наукових праць можна зробити висновок, що науковий рівень та повнота викладення дисертаційної роботи відповідають вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (п.п. 9, 11, 13 "Порядку присудження наукових ступенів"), наведені в ній науково обгрунтовані результати у сукупності вирішують важливу для систем кондиціонування повітря чистих приміщень науково-прикладну задачу ексергетичного обгрунтування та підвищення енергоефективності їх роботи, а її автор, Гарасим Дмитро Ігорович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
доктор технічних наук, професор

М. І. Радченко

Підпис д-ра технічних наук, професора Радченка М.І. засвідчую:

В.о. ректора



В. С. Блінцов