

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук

**Радченко Миколи Івановича**

на дисертаційну роботу

Мольського Сергія Михайловича

**«РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА  
ЕКОЛОГІЧНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН З ВИКОРИСТАННЯМ  
ВОДОВИПАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова  
теплоенергетика

### *Актуальність теми дисертації*

Проблеми енергоефективності та екологічності холодильних систем на сьогоднішній день є одними з найактуальніших як у промисловості, так і в побутовому секторі. З огляду на постійне зростання вартості електроенергії, жорсткі вимоги до захисту довкілля, обмеження викидів парникових газів і поступове виведення з експлуатації озоноруйнівних холодоагентів, особливо актуальним є пошук і впровадження нових технічних рішень, що забезпечують зниження енергоспоживання холодильного обладнання при одночасному зменшенні шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Одним із таких напрямів є використання водовипарних технологій як у якості попереднього охолодження повітря перед конденсатором, так і для додаткового переохолодження рідкого холодоагенту в контурі парокомпресійної холодильної машини. Ці технології дозволяють зменшити температуру конденсації, підвищити холодопродуктивність системи та знизити споживання електроенергії. У поєднанні з проведенням заміни на сучасні, екологічно безпечні холодоагенти групи A2L, це відкриває широкі перспективи для підвищення ефективності як нових, так і існуючих холодильних установок.

Особливої актуальності ця тематика набуває в умовах децентралізації енергопостачання, зростання питомої ваги систем кондиціонування та холодопостачання в загальному енергобалансі, а також потреб у відновленні інфраструктури України у повоєнний період. При цьому важливою перевагою водовипарних технологій є їхня енергетична автономність, простота реалізації, екологічна безпечність і низька вартість впровадження, що робить їх надзвичайно привабливими для масового застосування у промислових, аграрних і торговельних об'єктах.

Крім того, застосування адіабатичних та випарних систем охолодження повітря, що використовують природні процеси теплообміну, дозволяє суттєво

*Вх 128 / 2025*

*Віг 21.08.2025*

зменшити навантаження на компресор, знизити експлуатаційні витрати та зменшити викиди CO<sub>2</sub>, що пов'язані зі споживання електроенергії.

Таким чином, тематика дисертаційної роботи Мольського С.М. повністю відповідає сучасним викликам і пріоритетам у сфері технічної теплофізики, енергозбереження та екологізації холодильних технологій. Вона має високу наукову, прикладну та соціально-екологічну значущість і є актуальною як для наукових досліджень, так і для впровадження у виробничу практику.

Основні дослідження теоретичного й прикладного характеру виконувалися відповідно до положень проекту Енергетичної стратегії України до 2035 року, директив та угод Європейського Союзу і України та інтеграції у сфері енергетики, Закону України «Про енергозбереження», Комплексної державної програми енергозбереження України, Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року, Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні».

Таким чином, наукові дослідження за темою «Розроблення методів підвищення енергоефективності та екологічності холодильних машин з використанням водовипарних технологій» слід вважати доречними і своєчасними.

### ***Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації***

Ознайомлення зі змістом дисертаційної роботи Мольського С.М. дає підстави стверджувати, що наукові положення, висновки та рекомендації, представлені в ній, є достатньо обґрунтованими та достовірними.

Наукові положення, викладені в дисертації, відображають цілісність і завершеність дослідження, про що свідчать структурна побудова та зміст роботи за логікою сходження від теорії до практичної реалізації.

Достовірність результатів дисертаційної роботи Мольського С.М. забезпечено обґрунтованою постановкою задач теоретичного й експериментального досліджень, підтвердженням адекватності теоретичних положень шляхом проведення моніторингу реальної холодильної системи із задовільним узгодженням даних розрахунків і моніторингу.

Отримані результати та зроблені автором висновки не суперечать дослідженням інших авторів, проведеним у напрямку ретрофіту холодоагентів та підвищення ефективності холодильних систем.

Мета дослідження відповідає темі дисертаційної роботи, а поставлені задачі дослідження достатні для її розкриття і досягнення поставленої мети. Результати та загальні висновки по роботі свідчать про вирішення всіх

поставлених задач і узагальнюють результати досліджень, отриманих у відповідних розділах дисертаційної роботи.

### ***Аналіз змісту та форми дисертації***

**Дисертаційна робота містить:** анотацію, вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел та додаток. Повний обсяг дисертаційної роботи – 160 сторінок, з них основного тексту викладено на 144 сторінках. Дисертація містить 41 рисунок, 21 таблицю, список використаних джерел з 74 найменувань на 10 сторінках, додаток на 6 сторінках.

**Анотація** дисертації коректно відображає її основні положення.

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, наведено об'єкт, предмет, мету й задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну, практичне значення роботи, методи досліджень та основні результати, що виносяться на захист. Подано також відомості про апробацію матеріалів, публікації та впровадження отриманих результатів.

**У першому розділі** дисертації здійснено глибокий аналіз сучасного стану та перспектив розвитку методів підвищення енергоефективності та екологічності холодильних машин. Узагальнено наявні підходи до заміни озоноруйнівних холодоагентів на нові, зокрема групи A2L з GWP<500, охарактеризовано основні проблеми, що виникають при ретрофіті холодильного обладнання. Розглянуто сучасні адіабатичні та випарні технології охолодження повітря, які можуть бути застосовані для зниження температури конденсації без істотних витрат енергії.

**Другий розділ** присвячено багатоваріантному підходу щодо заміни холодоагентів HCFC та HFC на холодоагенти групи A2L з GWP<500. Для цього представлено покрокову методику адаптації холодильної машини до нового робочого тіла з урахуванням параметрів компресора, типу мастила, впливу температурного глайду на умови роботи теплообмінного обладнання, який виникає в результаті того, що холодоагенти, що є сумішшю кількох хімічних речовин, можуть мати розбіжність температур сполук при однаковому тиску в процесі фазових переходів. Детально розглянуто вплив температурного глайду, що властивий багатьом сучасним холодоагентам (зокрема R454C), на роботу теплообмінного обладнання. Подано порівняльні результати ретрофіту холодильних установок, підтверджені розрахунками на прикладі компресорів типу 6FE-44Y.

**У третьому розділі** дисертаційної роботи наведено методику впровадження водовипарного охолодження повітря перед конденсатором і переохолодження рідкого холодоагенту. Результати систематизовано у вигляді графіків, номограм та психометричних діаграм. Здійснено аналіз кліматичних особливостей у містах України для оцінки доцільності застосування

водовипарного охолодження. Подано рекомендації щодо вибору типу систем охолодження залежно від температурно-вологісних умов.

**У четвертому розділі** описано систему дистанційного моніторингу для оцінки енергетичної ефективності холодильних машин з адіабатичним охолодженням. Проведено експеримент на базі двох холодильних агрегатів з однаковими характеристиками, один з яких був оснащений зрошуваними панелями, інший – ні. Наведено детальні результати моніторингу, включно з витратами електроенергії, температурою конденсації та витратами води. Показано зменшення температури конденсації до рівня температури мокрого термометра та зниження енергоспоживання системи з адіабатичним охолодженням.

**У п'ятому розділі** дисертації запропоновано схемні рішення як з одностадійним, так і двостадійним випарним охолодженням. Запропоновано спосіб повернення у водовипарну установку конденсату, що утворюється на випарнику холодильної машини..

**У висновках** сформульовано основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи, які відповідають поставленим цілям та задачам дослідження.

**Список використаних джерел** містить 74 найменувань, що є достатнім і відображає сучасний стан досліджень у галузі.

**У додатку** наведено документи, що підтверджують впровадження отриманих результатів у практику.

### ***Достовірність результатів досліджень***

Крім того, обґрунтованість одержаних результатів підтверджується їхньою апробацією у доповідях на міжнародних науково-практичних конференціях та впровадженням результатів роботи у ТОВ «Астра», м. Верхньодніпровськ, у ТОВ «Ритейл Девелопмент», Дніпропетровська область.

### ***Оцінка наукової новизни дисертаційної роботи***

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на результати, що мають вагому **наукову новизну**.

Це, насамперед, розроблення багатоваріантного підходу щодо заміни (ретрофіту) холодоагентів HCFC та HFC з GWP>500 на холодоагенти HFC, HFO та HFC/ HFO групи A2L з GWP<500, які на відміну від відомих підходів комплексно враховує змінення показників компресора при переході на холодоагенти групи A2L, вплив температурного глайду на ефективність роботи холодильної машини при заміні холодоагенту, зокрема на роботу

теплообмінного обладнання, та пропонує технічні рішення щодо раціоналізації процесів холодильної машини з метою підвищення її ефективності.

Слід також відзначити вперше запропонований критерій та метод оцінки ефекту від переохолодження рідкого холодоагенту після конденсатору в парокомпресійному холодильному циклі, який дозволяє проводити експрес-аналіз доцільності переохолодження при ретрофіті холодоагенту.

Безумовну наукову новину має новий спосіб водовипарного переохолодження рідкого холодоагенту з поверненням в адіабатичну систему конденсату, що утворюється на випарнику парокомпресійної холодильної машини, що суттєво зменшує втрати води на відміну від існуючих систем адіабатичного охолодження.

До основних пунктів наукової новизни слід віднести наступні:

1. Розроблено багатоваріантний підхід щодо ретрофіту холодоагентів HCFC та HFC з  $GWP > 500$  на холодоагенти HFC, HFO та HFC/HFO групи A2L з  $GWP < 500$ , які на відміну від відомих підходів комплексно враховує змінення показників компресора при переході на холодоагенти групи A2L, вплив температурного «глайду» на ефективність роботи холодильної машини при заміні холодоагенту, зокрема на роботу теплообмінного обладнання, та пропонує технічні рішення щодо раціоналізації процесів холодильної машини з метою підвищення її ефективності.

2. Запропоновано новий критерій та метод оцінки ефекту від переохолодження рідкого холодоагенту після конденсатору в парокомпресійному холодильному циклі, який дозволяє проводити експрес-аналіз доцільності переохолодження при ретрофіті холодоагенту.

3. Вперше запропоновано метод створення зручних та інформативних номограм для експрес-аналізу визначення ефекту від переохолодження на роботу парокомпресійних холодильних машин при ретрофіті на будь-які сучасні холодоагенти та створено номограми для визначення підвищення холодильного коефіцієнту при переохолодженні рідкого холодоагенту для різних температур випаровування і конденсації для холодоагентів R32 та R152.

4. Запропоновано новий спосіб водовипарного переохолодження рідкого холодоагенту з поверненням в адіабатичну систему конденсату, який утворюється на випарнику парокомпресійної холодильної машини, що суттєво зменшує втрати води на відміну від існуючих систем адіабатичного охолодження.

### ***Практичне значення результатів, наведених у дисертаційній роботі***

Проведені здобувачем дослідження мають велике практичне значення, зокрема, розроблено й апробовано технічне рішення з впровадження



водовипарного переохолодження рідкого холодоагенту в системах холодопостачання, що може бути застосоване для модернізації існуючих холодильних машин без потреби в капітальному переоснащенні холодильної машини, з підвищенням їхньої енергоефективності. Здобувачем розроблено рекомендації з вибору холодоагентів нового покоління (групи A2L з GWP<500) для переведення існуючих систем на екологічно безпечні речовини з урахуванням їхньої сумісності з компресорами, мастилами та теплообмінниками. Запропоновано алгоритм енергоекологічної модернізації холодильних установок, який включає: частотне регулювання компресорів, раціоналізацію теплообмінників, зменшення втрат тиску та інтеграцію адіабатичних або випарних систем охолодження.

Практична цінність наукових результатів дисертаційної роботи документально підтверджується актами про їх використання.

### *Дискусійні питання та основні зауваження щодо змісту дисертації*

Разом із загальною високою оцінкою дисертаційної роботи Мольського С.М., слід звернути увагу на певні дискусійні моменти:

1. На стор. 97 в п. 3.3.2.6 описано проблему додаткового споживання електричної енергії випарними апаратами. Автор наголошується, що «зазвичай випарні апарати споживають менше електричної енергії ніж аналогічні теплообмінні пристрої повітряного охолодження». Це твердження слід було б підтвердити порівняльними розрахунками або надати посилання на літературні джерела.
2. Крім енергетичної оцінки при порівнянні одностадійного та двостадійного водовипарного охолодження повітря перед конденсатором холодильної машини протягом літнього періоду експлуатації на стор. 99, слушно було б провести порівняння і за економічними показниками.
3. На стор. 100, 108 та 140 вказано, що як базова випарна поверхня використовувалися багатошарові поверхні на основі алюмінієвої фольги панелі OXYVAR, продукція компанії OXYCOM, Нідерланди. Чи проводились дослідження з поверхнями інших виробників і як матеріал випарної панелі враховується при моделюванні?
4. Другий розділ роботи присвячено питанню ретрофіту фреонів на холодоагенти групи A2L з GWP < 500, показано, як важливо враховувати температурний глайд для них. Однак при побудові номограм в розділі 3 цей фактор не враховувався. Вважаю, що слід було б враховувати вплив температурного глайду в запропонованому автором методі для більш точної оцінки ефективності переохолодження сучасних холодоагентів.
5. При ознайомленні з текстом дисертації виникли також наступні питання.

Які саме вимоги до води висуваються для забезпечення довготривалої стабільної роботи системи? Чи достатньо очищення води з міської мережі? Чи досліджувалось питання зниження ефективності холодильної системи через забруднення випарної поверхні?

***Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертаційної роботи.***

Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи, відповідає структурі її розділів та містить ключові результати дослідження. У ньому послідовно викладено основні наукові досягнення, що дозволяє достатньо повно оцінити наукову новизну і практичну значимість проведеного дослідження. Наведено опис анотації, вступу та п'яти розділів. Також надано висновки та список опублікованих робіт за темою дисертації.

***Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях***

Основні результати дисертаційної роботи висвітлено у належній кількості публікацій. А саме у 11 публікаціях: з них 1 – у науковому періодичному фаховому виданні України, 1 – у закордонному науковому виданні, яке входить в міжнародну наукометричну базу Scopus; 1 монографія; 3 патенти України; 5 тез доповідей конференцій.

Опубліковані праці повною мірою відображають основні результати дисертаційної роботи.

***Відповідність дисертації встановленим вимогам та дотримання академічної доброчесності***

Ознайомлення з текстом дисертації дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом вона відповідає всім вимогам. Структура дисертації є чіткою і послідовною. Її логіку підпорядковано вирішенню сформульованих дослідницьких завдань. Не викликають зауважень постановка мети, задач, об'єкта та предмета дослідження. Наприкінці кожного розділу подано чіткі стислі висновки, які відповідають тексту дослідження.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання положень, текстів інших авторів мають відповідні посилання на джерела. Аналіз роботи свідчить про відсутність плагіату, що підтверджує оригінальність дослідження та його самостійний характер.

З наукових публікацій, які написані у співавторстві, дисертація містить лише положення та пропозиції, які є особистим науковим здобутком автора.

## ВИСНОВОК

Розглянувши дисертаційну роботу Мольського Сергія Михайловича можна зробити наступні висновки:

1. Стиль викладання достатньо чіткий, послідовний та в основному виключає неоднозначність трактування і розуміння основних положень дисертаційного дослідження.

2. Оформлення дисертації відповідає вимогам подання науково-технічної інформації.

3. Основні результати опубліковані у періодичних виданнях, основні положення апробовані на науково-технічних конференціях.

4. Дисертаційна робота Мольського С.М. є завершеним науковим дослідженням, більша частина зауважень має характер уточнень, які спрямовані на прояснення окремих нюансів дослідження, на розвиток напрямку роботи в наступному і не знижує значимості отриманих дисертантом результатів.

Враховуючи актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, сформульованих у дисертації висновків та рекомендацій, їх наукову новизну та практичну значимість, відповідність предметній області спеціальності, повноту викладення у наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що подана дисертаційна робота «Розроблення методів підвищення енергоефективності та екологічності холодильних машин з використанням водовипарних технологій» Сергія Михайловича Мольського відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013. А її автор, Сергій Михайлович Мольський, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

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

*Микола РАДЧЕНКО*

*19.08.2025*

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

Вчений секретар

Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова

*Світлана УТКІНА.*

