

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Арсеньової Ольги Петрівни
на дисертаційну роботу Лукашова Івана Миколайовича
«Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасообміну в
елементах перспективних аміачних енерготехнологічних установок»
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Актуальність теми дисертації

Сьогодні особлива увага приділяється екологічності як існуючих енерготехнологічних установок, так і перспективних розробок. В епоху глобальної декарбонізації світової економіки пріоритет надається використанню природних речовин, які не спричиняють глобального потепління та не руйнують озоновий шар. Однією з таких сполук є аміак (NH_3), що характеризується нульовим потенціалом глобального потепління та відсутністю озоноруйнівного ефекту. Крім того, аміак має високий коефіцієнт теплопередачі й сприятливі термодинамічні властивості, що робить його ефективним робочим тілом для більшості енерготехнологічних систем. Водночас до його недоліків належать токсичність та пожежонебезпечність, проте сучасні стандарти промислової безпеки значною мірою мінімізують ці ризики.

Одним із ключових чинників, що визначають енергоефективність та економічність систем під час проєктування аміачних енерготехнологічних установок, є організація ефективного теплообміну у випарниках та конденсаторах, а також коректний розрахунок втрат тиску в замкненому контурі. Саме ці завдання розв'язуються у представленій дисертаційній роботі шляхом проведення багатофакторних експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів у формі феноменологічних безрозмірних теплогідравлічних кореляцій. Отримані залежності, разом із запропонованими якісними рекомендаціями, становлять основу для науково обґрунтованого проєктування перспективних аміачних систем.

Таким чином, тематика дисертаційного дослідження «Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасообміну в елементах перспективних аміачних енерготехнологічних установок» цілком відповідає сучасним потребам галузі, а отримані наукові результати є актуальними та своєчасними.

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

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Лукашова І. М., підтверджується:

- ґрунтовним аналізом вітчизняних і зарубіжних літературних джерел;

Вх. 138/2025

в'г 25.08.2025 р.

- чіткою та коректною постановкою мети й завдань дослідження;
- застосуванням як новітніх, так і класичних експериментальних та теоретичних методів обробки результатів фізичних досліджень;
- використанням загальноприйнятих науково обґрунтованих припущень та обмежень, що забезпечують відтворюваність отриманих теоретичних і експериментальних результатів із необхідною точністю;
- логічними, послідовними та виваженими формулюваннями висновків за підсумками проведених експериментів.

Аналіз змісту та форми дисертації

Дисертаційна робота Лукашова І. М. складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 153 сторінки машинописного тексту, з яких основний текст займає 116 сторінок; у дисертації наведено 75 рисунків, 9 таблиць та 2 додатки обсягом 5 сторінок, у яких подано документи, що підтверджують практичне впровадження отриманих результатів. Список використаних джерел містить 141 найменування на 16 сторінках, що є достатнім та відображає сучасний стан наукових досліджень у відповідній галузі.

У вступі якісно обґрунтовано актуальність теми дисертації, чітко сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет роботи, охарактеризовано застосовані методи, розкрито наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів. Окремо подано відомості про публікації та апробацію матеріалів дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

Перший розділ присвячений огляду та аналізу науково-технічної інформації щодо аміачних енерготехнологічних установок та використання аміаку як палива для двигунів внутрішнього згоряння. Виконаний аналіз дозволив здобувачеві обґрунтувати актуальність теми, визначити перспективні напрямки досліджень та чітко сформулювати мету та завдання представленої роботи.

У другому розділі представлено результати дослідження режимів адіабатичної течії аміаку в трубах з різним кутом нахилу до горизонту. Проведено візуальні спостереження за режимами течії в кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 7,5 мм у широкому діапазоні тисків, масових швидкостей та паровмісту, представлені рекомендації щодо загальної карти переходів між різними режимами руху аміаку.

У третьому розділі здійснено експериментальне та теоретичне вивчення процесів конденсації аміаку в гладких трубах різної орієнтації у просторі за середніх і високих тисків, запропоновані узагальнюючі розрахункові залежності для визначення тепловіддачі при конденсації аміаку.

Четвертий розділ присвячений аналізу вимушеного кипіння аміаку в гладкій трубці діаметром 11 мм при різних просторових орієнтаціях. Подано опис тестових зразків, експериментального стенду та граничних умов проведення дослідів. Окремо розглянуто методику ідентифікації коефіцієнта тепловіддачі при кипінні. Проведено аналіз отриманих експериментальних

результатів для гладкої труби з внутрішнім діаметром 11 мм. Здобувачем досліджено вплив просторової орієнтації труб на перебіг процесу: наведено результати для горизонтального положення та для висхідного потоку аміаку. У висновках до розділу узагальнено ключові результати, що стосуються особливостей теплообміну під час кипіння аміаку в гладких трубах різної орієнтації, та сформульовано положення, які мають практичне значення для проєктування енерготехнологічних установок.

У п'ятому розділі розглянуто проблему оцінювання однофазних і двофазних місцевих втрат тиску в однофазному та двофазному потоці аміаку в елементах контуру з різкою зміною площі прохідного перерізу. Детально викладено методологію досліджень: представлено підходи до визначення однофазних місцевих втрат тиску, традиційний і новий методи їх розрахунку для двофазного потоку, а також наведено різні моделі для опису місцевих та фрикційних втрат тиску. Окремо розглянуто питання визначення довжини шляху збурення двофазного потоку. Описано експериментальні дослідження: подано характеристики тестових зразків, конструкцію експериментального стенду та проведено аналіз невизначеності похідних параметрів. Представлено детальний аналіз результатів дослідів. Зокрема, наведено результати візуальних спостережень процесів течії, кількісні дані щодо однофазних та двофазних місцевих втрат тиску, а також порівняння експериментальних даних із теоретичними моделями.

У висновках до окремих розділів та у підсумкових загальних висновках чітко й послідовно сформульовано основні наукові й прикладні результати дисертаційної роботи, які повністю відповідають поставленим меті та завданням дослідження.

Достовірність результатів досліджень

Обґрунтованість одержаних результатів підтверджується їхньою апробацією у доповідях на міжнародних науково-практичних конференціях та впровадженням результатів роботи у навчальному процесі кафедри аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», в Приватному Акціонерному Товаристві «ФЕД» (Україна) та ТОВ «ХАКБ».

Наукова новизна результатів дослідження дисертаційної роботи

уттєво уточнено межі переходу від стратифікованих до кільцевих режимів течії двофазного потоку аміаку в горизонтальних каналах у діапазоні температур насичення 15–65 °С з урахуванням імпульсу парової фази. Це дало змогу підвищити адекватність прогнозування закономірностей двофазної течії в каналах аміачних паросилових енерготехнологічних установок. перше експериментально визначено коефіцієнти тепловіддачі при конденсації та кипінні аміаку в гладких каналах різної орієнтації у полі сили тяжіння (при температурах насичення 35–65 °С, у широкому діапазоні масових швидкостей та паровмісту). Це розширило наявну експериментальну базу даних щодо

особливостей теплообміну й сприяло подальшому розвитку теорії тепломасообміну.

розроблено поправки до моделі ламінарної плівкової конденсації Нуссельта з урахуванням інтенсивності конденсації та впливу інерційних і в'язкісних ефектів рідинної плівки. Запропонований підхід зменшує похибку визначення коефіцієнта тепловіддачі при конденсації аміаку в горизонтальних каналах з $\pm 50\%$ до $\pm 20\%$ у діапазоні масових швидкостей до $120 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

перше експериментально доведено, що масовий паровміст, за якого настає погіршення теплообміну при кипінні аміаку в горизонтальних і вертикальних каналах, пов'язаний із висиханням рідинної плівки та практично не залежить від масової швидкості потоку. Цей критичний рівень може бути прийнятий як 0,7 для високотемпературних систем при щільності теплового потоку до $7,7 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

перше здійснено якісний і кількісний аналіз адекватності існуючих моделей оцінювання однофазних та двофазних місцевих втрат тиску при різкому розширенні та звуженні потоку аміаку. Отримані результати дозволяють знизити надмірний консерватизм під час прогнозування втрат механічної енергії в контурах аміачних паросилових установок та систем забезпечення теплових режимів.

Практичне значення результатів, наведених у дисертаційній роботі

Проведені здобувачем дослідження мають значне практичне значення і можуть бути використані при проектуванні нового теплообмінного обладнання з аміаком як робочим тілом.

На основі отриманих результатів дисертаційної роботи уточнено карту двофазних режимів течії аміаку в гладких горизонтальних і похилих каналах за високих тисків, що забезпечує більш адекватне визначення режимів течії в елементах двофазних контурів. Уточнено феноменологічні співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації та кипінні аміаку в горизонтальних каналах за умов високих температур насичення. Розроблено нові рекомендації щодо оцінювання граничного масового паровмісту, який визначає початок кризи теплообміну при кипінні аміаку в гладких каналах і пов'язаний із висиханням рідинної плівки. Крім того, проведено аналіз невизначеності існуючих моделей розрахунку місцевих втрат тиску у двофазному потоці при раптових розширеннях і звуженнях прохідного перерізу.

Практична значущість отриманих результатів підтверджується документально актами про їх впровадження.

Дискусійні питання та основні зауваження щодо змісту дисертації

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

Представлений перелік умовних скорочень представлено неструктуровано. Зазначені скорочення та позначення параметрів надано вкупі, без алфавітного порядку. Деякі скорочення наведені англійською мовою

без вказання англійською їх значення. Деякі позначення неоднозначні в тексті дисертації.

1. В тесті дисертації зустрічаються аббревіатури, які не пояснені в тексті і їх немає в списку умовних позначень. Наприклад, HFC на стор. 23, СТР KEY на стор. 31, НТС на Рис. 3.9., CFC, HFCH, HC на стор. 69.

2. Режими руху течії в розділі 2.2 наведені українською мовою з позначеннями латинськими літерами, наприклад стратифіковано-хвильовий (SW) режим. Зазначення англійського терміну для аббревіатури англійською, і потім переклад українською було б більш доречно.

3. В розділі 2 при описі експериментального устаткування зазначено, що спостереження проводиться фотографічним методом, але яке саме обладнання використовується для фотофіксації не зазначено.

4. На стор. 39 для визначення масового паровмісту за формулою (2.1) наведено теплові втрати, але далі для експериментів з адіабатичною течією не вказано як вони визначалися.

5. В таблиці 2.1 та 3.1 надано похибки вимірювання масового паровмісту, який було розраховано за формулою (2.1), що фактично не є прямою похибкою при вимірюванні. Також наведено масову витрату рідкого аміаку m_4 , якого немає на Рисунку 2.2.

6. Рисунки, які мають декілька зображень представлені без детального пояснення кожної наданої ілюстрації та їх найменування – Рис. 2.14, 2.16, 3.8, 3.11, 3.12, 3.15, 3.16, 4.3, 4.6.

7. При представленні тестових зразків в розділі 3.1.1 та визначенні коефіцієнту тепловіддачі не надано товщину стінки цих зразків.

8. В таблиці 3.1 два рази зазначено параметри приладу для вимірювання масової витрати аміаку m_3 , та параметри приладу m_4 , наведеного на Рис. 3.3. відсутні.

9. Не зовсім зрозуміло, як в запропонованій формулі (3.23) для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі аміаку при конденсації, при переході від формули (3.21) враховується вплив руху потоку, зокрема масової швидкості G .

10. В розділі 4.1 відсутній рисунок 4.3, на який наводиться посилання в тексті, не вказано з якого матеріалу було виконано теплоізоляцію зразків, в Таблиці 4.1 вказано граничні умови тільки для горизонтального та восхідного потоків. Не наведено параметрів для експериментів з горизонтальним потоком.

11. В формулах 4.5, 4.6 не зазначено який діаметр потрібно брати для розрахунків.

12. В розділі 4.2.2 краще б було навести рекомендовані співвідношення для висхідного потоку, як це було представлено для горизонтальної гладкої труби.

13. Деякі символи в дисертації мають декілька позначень: σ використовується для позначення геометричного коефіцієнта та поверхневого натягу; α позначає коефіцієнт тепловіддачі та об'ємний паровміст.

14. Також в тексті дисертації зустрічаються описки та орфографічні помилки. Деякі з них: стор. 47 «вважав», стор. 66 «Слід зазначити, що невизначеність програмного забезпечення моделювання не визначалося, через простоту розглянутих випадків.», незакінчена фраза на стор. 68 «Тут ламінарно-ламінарний параметр Локхарта–Мартініеллі [80]», стор. 93 «Слід відзначити, що розділення двофазного потоку на чіткі режими часто умовна і суб'єктивна.», стор. 102 описка в назві розділу, в формулах 5.16, 5.25, 5.26 використано два знаки множення разом, стор. 121 «див. рисунок 5.9».

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертаційної роботи.

Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи Лукашова І. М., 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 10 наукових працях, серед яких 1 стаття (виконана без співавторства) у науковому фаховому виданні України, що входить до переліку спеціалізованих наукових видань, 7 статей в міжнародних журналах, індексованих в наукометричній базі Scopus; 2 роботи – матеріали міжнародних наукових конференцій.

Опубліковані праці повною мірою відображають основні результати дисертаційної роботи.

Відповідність дисертації встановленим вимогам та дотримання академічної доброчесності

Текст дисертації Лукашова І. М. «Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасообміну в елементах перспективних аміачних енерготехнологічних установок» за структурою та змістом відповідає всім вимогам. Структура дисертації є послідовною і чіткою. 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.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Лукашова Івана Миколайовича «Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасообміну в елементах перспективних аміачних енерготехнологічних установок» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика.

Вона є закінченою науково-дослідною роботою, в якій одержані нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що є значущими для розвитку теорії тепломасообміну. Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН України щодо кандидатських дисертацій.

Висловлені вище зауваження не знижують позитивного враження про дисертаційну роботу в цілому. Беручи до уваги актуальність теми дисертаційних досліджень, ступінь обґрунтованості результатів, наукову новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях здобувача, вважаю, що дисертація «Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасообміну в елементах перспективних аміачних енерготехнологічних установок» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 (зі змінами) щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Лукашов Іван Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова



Ольга АРСЕНЬЄВА

Підпис д. т. н., проф. Арсеньєвої О. П.
засвідчую:

Учений секретар

Харківського національного університету
міського господарства імені О.М. Бекетова

25.08.2025



Олег ХАЛМІКОВ