

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Коновалова Дмитра Вікторовича

"Розвиток науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок",

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

1. Актуальність теми.

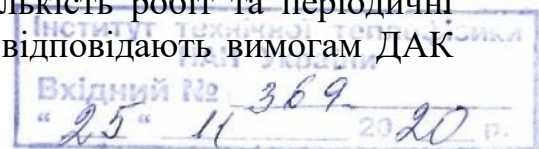
На сьогоднішній день одним з найбільш ефективних напрямів підвищення паливно-енергетичної ефективності енергетичних установок є використання їх скидної теплоти та охолодження циклового повітря, зокрема, при безпосередньому контакті повітряного (газового) потоку з охолоджуючим потоком (здебільшого, водою як холодоносієм). При контактному охолодженні повітряного (газового) потоку шляхом випаровування введеної води мають місце втрати потужності на подолання аеродинамічного опору у процесі випаровування, що може звести нанівець ефект від його застосування.

Підвищення ефективності використання вторинної теплоти енергетичних установок, передусім на базі газотурбінних двигунів (ГТД) і двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), можливе на основі розроблення аеротермопресорних технологій з використанням так званого ефекту миттєвого скипання, що супроводжується збільшенням тиску змішаного потоку на відміну від традиційних способів контактного охолодження з його втратою.

Тому розвиток науково-технічних основ створення аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок з охолодженням їх робочих тіл є актуальною науково-прикладною проблемою. Саме її вирішенню і присвячений комплекс експериментально-теоретичних досліджень, виконаних здобувачем.

2. Зміст дисертації, обґрунтованість наукових положень, достовірність та новизна результатів, повнота викладення у публікаціях.

Всі викладені в дисертації результати повністю відображено у 121 публікації в наукових виданнях, в тому числі: 40 статей у наукових фахових виданнях України, 5 публікацій у виданнях, що входять до бази Scopus, 4 розділи у колективних монографіях закордонного та вітчизняних видавництва та 60 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Наукова новизна захищена 10 патентами України на винахід. Кількість робіт та періодичні видання, у яких опубліковано статті здобувача, відповідають вимогам ДАК



МОН України. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на численних міжнародних наукових конференціях, що свідчить про їх успішну апробацію.

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків та додатку. Список використаної літератури містить 324 джерела.

У вступі обґрунтовано актуальність і важливість теми дисертаційної роботи, відображено її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету дослідження. Також наведено наукову новизну і практичну цінність, вказано особистий внесок здобувача, надано відомості стосовно апробації результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз наукових досліджень стосовно особливостей використання вторинної теплоти енергетичних установок. Також наведено огляд сучасних способів застосування упорскування води та проведено аналіз напрямків підвищення ефективності газотурбінних установок та енергетичних установок на базі ДВЗ. Зроблено висновок про доцільність застосування аеротермопресорних технологій для контактного охолодження з метою забезпечення інтенсивного охолодження газу (повітря) з одночасним підвищенням тиску і ефективного розпилення води в потоці, що рухається з швидкістю, близькою до звукової. За результатами аналізу сформульовано мету та основні задачі дослідження.

У **другому розділі** представлена методологія наукового дослідження та напрям вирішення науково-прикладної проблеми. Показано, що проміжне охолодження циклового повітря ГТД аеротермопресором забезпечить зростання потужності завдяки збільшенню масової витрати робочого тіла, підвищення ККД та скорочення питомої витрати палива завдяки зменшенню витрат потужності на стискання, а також завдяки забезпеченню високодисперсного розпилення для ізотермування процесу стиснення в ступенях компресора. Обґрунтовано також застосування аеротермопресорних технологій в системах утилізації теплоти продуктів згоряння енергетичних установок, а саме в системах рециркуляції газів і в контурах перерозширення.

В **третьому розділі** наведено основні положення фізичної та математичної моделей використання вторинної теплоти енергетичних установок в аеротермопресорах. На основі представлених моделей розроблено методологію раціонального проектування, яка враховує неповне випаровування рідини, що упорскується в аеротермопресор та вплив дисперсності.

В **четвертому розділі** наведено результати експериментального дослідження робочих процесів в аеротермопресорі, опис експериментального стенду, інформаційно-вимірювальна система та результати визначення похибки вимірювань. Досліджено вплив неповного випаровування води в проточній частині на дисперсність потоку та на характеристики аеротермопресора взагалі.

В **п'ятому розділі** наведено особливості застосування та результати розрахунків і моделювання роботи аеротермопресора у складі енергетичних установок на базі ДВЗ. Показано, що застосування аеротермопресорних технологій для охолодження наддувного повітря та в системах рециркуляції

продуктів згоряння ДВЗ дозволяє зменшити питому витрату палива та підвищити потужність. Також показано результати впливу перемінних режимів роботи енергетичної установки та сумісного застосування аеротермопресорів разом із контурами утилізації теплоти відхідних газів.

В шостому розділі наведено результати аналізу ефективності застосування аеротермопресорних технологій для енергетичних установок на базі ГТД. Виходячи з цього визначено принципи застосування аеротермопресорів для проміжного охолодження повітря як складової робочого тіла ГТД. Це дозволяє забезпечити: ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини, а звідси, і більш ефективно ізотерування процесу стиснення в компресорі наступної ступені; зменшення роботи на стиснення в компресорі за рахунок підвищення тиску в аеротермопресорі; збільшення витрати робочого тіла на 5–10% і, як наслідок, підвищення ККД з відповідним зменшенням питомої витрати палива. Також показано ефективність застосування аеротермопресора як багатофункціонального пристрою в контурах перерозширення ГТУ.

В сьомому розділі наведено особливості застосування аеротермопресорних технологій в контурах тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин. Зокрема показані термодинамічні цикли та схемно-конструктивні рішення із застосуванням аеротермопресора та обґрунтовано вибір робочого тіла, що, в свою чергу, забезпечує підвищення теплового коефіцієнта на $\Delta\zeta = 0,03\text{--}0,05$ (10–15%) порівняно з базовим 0,30–0,40.

Висновки за результатами виконаного дисертаційного дослідження складаються з 10 пунктів.

Дисертаційна робота містить обґрунтовані результати та характеризується цілісністю змісту.

Зміст та результати роботи відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження відповідають напрямку "Технології використання нових видів палива, скидних енергоресурсів, відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Теплонасосні технології" (згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942). Високий науковий рівень отриманих здобувачем результатів за даною темою відзначено Премією Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок за 2012 р., грантом Президента України 2011 р., стипендією Кабінету міністрів України (2010–2012 рр.).

Результати наукових досліджень дисертаційної роботи увійшли до науково-дослідної теми за Грантом Президента для молодих вчених "Розробка енергозберігаючих технологій на основі газодинамічного ефекту для установок комбінованого виробництва енергії" (GP/F32/152), де здобувач приймав участь як науковий керівник, а також до держбюджетних науково-дослідних робіт, що виконувалися в Національному університеті

кораблебудування імені адмірала Макарова, де здобувач приймав участь як виконавець: "Розробка концепції комбінованого виробництва енергії в судновій та стаціонарній енергетиці на основі внутрішньоциклової низькотемпературної тригенерації" (№ ДР 0116U0086698); "Науково-технічні основи тригенераційних полінарних технологій на низькокиплячих робочих тілах для двигунів і енергетичних установок", № ДР 0115U000300.

4. Наукова новизна дисертаційної роботи.

Наукова новизна виконаної дисертаційної роботи полягає в наступному:

- розроблено концепцію підвищення економічності енергетичних установок застосуванням аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти з охолодженням повітря, яка на відміну від найбільш поширеного контактного охолодження упорскуванням води без використання вторинної теплоти забезпечує ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини для наступного ізотермування процесу стиснення в компресорах, причому без втрат тиску, а навпаки, з додатковим підвищенням повного тиску до 5–10%;

- вперше розроблено методологію раціонального проектування систем використання вторинної теплоти енергетичних установок із застосуванням аеротермопресорних технологій, яка враховує неповне випаровування упорскуваної рідини та вплив дисперсності на характеристики аеротермопресора, що дозволяє визначати локальні параметри теплофізичних процесів у проточній частині аеротермопресора по ходу потоку та раціональні характеристики аеротермопресорних систем утилізації й охолодження, що забезпечують максимальні значення ККД;

- вперше розроблено теплофізичну модель процесів використання вторинної теплоти енергетичних установок в аеротермопресорах, які на відміну від існуючих моделей дозволяють обчислювати локальні по ходу потоку параметри процесів аеротермопресії, що дає можливість раціонально організувати робочі процеси, зокрема з неповним випаровуванням упорскуваної рідини, забезпечує максимальне підвищення тиску та високу дисперсність, безпечну для експлуатації двигунів;

- вперше встановлені закономірності та особливості процесів використання вторинної теплоти в аеротермопресорах охолодження повітря як складової робочого тіла і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння енергетичних установок, а саме вплив неповного випаровування в аеротермопресорі на ефективність дрібно-дисперсного розпилення рідини та ступінь підвищення тиску повітря і, як наслідок, підвищення потужності та ККД енергетичної установки, а також вплив параметрів робочих процесів аеротермопресора на характеристики систем утилізації й охолодження, виходячи з яких визначено принципи проміжного охолодження повітря ГТУ аеротермопресорами дрібно-дисперсного розпилення рідини для ізотермування процесу стиснення в компресорі, охолодження наддувного повітря ДВЗ і продуктів згоряння в системі рециркуляції відпрацьованих газів ДВЗ, а також для тепловикористовуючих систем на базі ежекторних

холодильних машин та розроблена методологія проектування систем використання вторинної теплоти;

- вперше запропоновано принцип використання аеротермопресорних технологій для проміжного охолодження повітря ГТУ, що забезпечує ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини з середнім діаметром краплі менше 15 мкм і, як наслідок, більш ефективно ізотерування процесу в компресорі, дозволяє компенсувати гідравлічні втрати тиску у повітряному тракті з відповідним зменшенням роботи на стиснення за рахунок підвищення повного тиску на 5–10%, збільшити витрату робочого тіла в циклі на 5–10 % і, як наслідок, підвищити ККД з відповідним зменшенням питомої витрати палива на 1,5–2,0%;

- отримала подальший розвиток теорія аеротермопресії (термогазодинамічної компресії), зокрема у процесах охолодження стисненого повітря енергетичних установок та глибокої утилізації енергії продуктів згоряння;

- встановлено, що застосування ефекту термогазодинамічної компресії для охолодження наддувного повітря ДВЗ дозволяє зменшити роботу на стиснення за рахунок компенсації гідравлічних втрат тиску та підвищення повного тиску наддувного повітря на 5–10% порівняно з поверхневим охолодженням, підвищити ККД енергетичної установки з відповідним зменшенням питомої витрати палива на 1,0–2,0%;

- вперше запропоновано принцип підвищення ефективності екологічної рециркуляції продуктів згоряння ДВЗ шляхом їхнього охолодження аеротермопресорами, що дозволяє зменшити навантаження системи рециркуляції газів: зменшити або повністю компенсувати гідравлічні втрати, відповідно і навантаження на вентилятор (або електро-компресор) системи рециркуляції, знизити навантаження на скруббер і систему відведення теплоти від рециркуляційних газів забортною водою, що забезпечує зменшення питомої витрати палива на 1,5-1,7%;

- вперше розроблено термодинамічні цикли та схемно-конструктивні рішення тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин із застосуванням аеротермопресорних контурів та обґрунтовано вибір раціонального робочого тіла, що забезпечує підвищення теплового коефіцієнта ζ на 0,03–0,05 (10–15%) порівняно з базовим $\zeta = 0,30–0,40$.

Також необхідно відзначити, що наукова новизна способів охолодження та схемних рішень енергоустановок захищена 10 патентами України на винаходи.

5. Практичне значення одержаних результатів.

Застосування аеротермопресорних технологій для контурів використання вторинної теплоти енергетичних установок особливо доцільне в умовах економічного розвитку України та Євроінтеграції і забезпечить більше скорочення споживання палива та зростання потужності порівняно з традиційними способами та методами глибокої утилізації теплоти.

До галузей переважного застосування аеротермопресорних технологій слід віднести установки стаціонарної та суднової енергетики на базі ДВЗ і

ГТД. При цьому їх застосування забезпечить суттєве скорочення споживання палива і сприятиме підвищенню рівня енергетичної безпеки держави.

Впровадження у виробництво здійснено на ряді підприємств України та закордоном, зокрема: ТОВ "Енерджігруп" (м. Херсон, Україна), ТОВ "Херсонське суднобудівне підприємство" (м. Херсон, Україна), Zhejiang Special Electric Motor Co., Ltd. (м. Шеньжоу, пров. Чжензян, КНР), Zhejiang Dike Intelligent Appliance Co., Ltd.; (м. Шаосін, пров. Чжензян, КНР), Shengzhou Kangli Machinery Co., Ltd. (м. Шеньжоу, пров. Чжензян, КНР).

6. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових досліджень, висновків і рекомендацій.

Новизну результатів дослідження та їх наукову цінність підтверджують публікації здобувача за темою дисертації в авторитетних наукових виданнях, та доповіді в науково-технічних міжнародних конференціях як на території України так і закордоном. Отримані результати являють собою інтерес як з точки зору теоретичного так і практичного значення.

Обґрунтованість і достовірність результатів дослідження підтверджується коректною постановкою завдань теоретичного та експериментального досліджень, підтвердженням адекватності математичної моделі з задовільним узгодженням розрахункових даних і даних з паливної економічності енергоустановок, застосуванням сучасних методів експериментального дослідження, аналітичного та чисельного моделювання.

Результати кандидатської дисертації здобувача не використовувалися.

7. Апробація результатів дисертаційної роботи.

Результати та основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції "Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, III. DSMIE" (Луцьк, 2019; Харків, 2020); міжнародній науково-технічній конференції "Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2019)" (Одеса, 2019); міжнародній науково-технічній конференції "Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources" (Мінськ, Білорусь, 2018); міжнародній науково-технічній конференції "Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації" (Миколаїв, 2008–2019); міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (Одеса, 2009–2019); міжнародному конгресі двигунобудівників (Харків, 2009–2019); міжнародній науково-технічній конференції "Муниципальна енергетика: проблеми, рішення" (Миколаїв, 2007); міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми екології та енергозбереження" (Миколаїв, 2015); міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування" (Херсон, 2015); міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Миколаїв, 2012–2019); міжнародній науково-технічній конференції "Суднова енергетика: стан та проблеми"

(Миколаїв, 2013–2017); міжнародній науково-технічній конференції "Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство" (Херсон, 2017); міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування" (Херсон, 2017); міжнародній науково-технічній конференції "Heat Transfer and renewable sources of energy HTRSE" (Щецин, Польща, 2019); міжнародній науково-технічній конференції "Сучасний стан та проблеми двигунобудування" (Миколаїв, 2016); українсько-польській конференції молодих науковців "Механіка та інформатика" (Хмельницький, 2011); всеукраїнська науково-технічна конференція "Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення" (Первомайськ, 2009, 2011); всеукраїнська науково-технічна конференція "Актуальні проблеми енергетики та екології" (Херсон, 2016).

Кількість доповідей на конференціях, наукових статус та тематика конференцій свідчать про належний рівень апробації результатів дисертаційної роботи.

8. Повнота викладення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях.

Кількість робіт та періодичні видання, у яких опубліковані статті автора, відповідають вимогам МОН України.

Зміст публікацій відповідає матеріалам, що викладено у дисертаційній роботі.

Зміст автореферату повністю відображає зміст дисертаційної роботи.

9. Мова та стиль роботи.

Стиль і виклад роботи логічний, послідовний та відповідає вимогам до друкованих праць. Зміст роботи подає результати експериментального та теоретичного досліджень. При викладенні тексту застосовано відповідна сучасна наукова лексична термінологія.

10. Зауваження по дисертаційній роботі та автореферату.

До матеріалів дисертаційної роботи є певні зауваження та деякі побажання.

1. Розділ 1. Завеликий і дуже деталізований огляд. Аж 45 сторінок із 306. Надмірна увага приділена матеріалам по ежекції. Розділ 2 – фактично знову огляд. Аж 26 сторінок.

2. По моделі. В моделях Долінського А.А. та Іваницького Г.К. розглянуті процеси і ефекти кипіння, а більш доцільним було б запозичення інформації щодо дослідження розпилювального сушіння та процесів адіабатично закипаючого потоку (Накорчевський А. та Басок Б.) та руху дисперсного потоку з ефектами подрібнення (Шрайбер А.).

Модель фізично доволі проста хоча і громіздка, загалом оснований на балансах, тому рівняння одномірні та стаціонарні. Є суттєві допущення: Не враховано різні швидкості руху повітря і капель, тобто швидкісна нерівноважність; не враховано ефекти подрібнення; ґрунтовно не доведено,

що в зонах I і II аеротермопресорі відбувається адіабатне кипіння рідини, що вприскується, скоріше, якщо взагалі відбувається кипіння, то воно зумовлене високою температурою, тому використання (3.37) під сумнівом; потік парів води з поверхні каплі чомусь підмінюється дифузним потоком повітря, це вирази (3.47), (3.47), (3.50); чомусь в (3.99) відсутня теплота випаровування;

3. Що таке G в виразі (3.109), чому в виразах (3.110) і (3.111) відсутній потік повітря? чому в виразі (3.111) відсутня теплота випаровування? Де рівняння збереження маси води при її частковому випаровуванні?

4. Чому наведено замало результатів розрахунків по запропонованій моделі, зокрема в залежності від конструкцій термопресора (довжини, діаметра, кута конфузора, дифузора тощо, тим більше, що в експерименті змінювалась геометрія термопресора), початкового розміру краплі, початкового тиску, початкової температури, початкової швидкості повітря тощо.

5. Всі графіки б), в), г) рис. 4.28 в межах похибок співпадають між собою, а тому однозначний висновок зробити важко. Розподілення крапель по групам діаметрів в пробі для форсунки ФМТ (рис. 4.31, 4.33 і 4.35) обтяжено великою похибкою. Для форсунки ФМТ-43,0 при тиску 7,5 МПа найбільш оптимальним (найбільша кількість крапель із найменшим діаметром) є режим із витратою води 0.0407 кг/с, що не відповідаю висновку, зробленого на основі рис. 4.28; Цей ефект оптимуму також підтверджується рис. 4.43. Чому на графіках рисунків параграфу 4.6 не наведено даних власних теоретичних розрахунків?

6. Не описаний програмний комплекс Diesel-RK? Він оригінально-розроблений чи комерційного походження?

7. Бажано б на рис. 5.16. показати температуру забортної води та вологість повітря. На підставі яких даних побудовані графіки рисунків параграфів 5.3 та 5.4?

8. Параграф 6.3 зазначений як економічний аналіз, а мова йде в основному про питомі витрати палива.

9. Як проводились розрахунки даних графічних залежностей параграфу 7.1 ? Які ж висновки зроблено зі схемних рішень параграфу 7.2 ? Які варіанти доцільніші чи раціональні і за яким критерієм?

10. Як в подальшому не випарені краплі, що залишилися в потоці робочого тіла, впливають на якість горіння в циліндрах ДВЗ, в камерах ГТУ?

11. Чому в експериментальній установці не вимірювалась вологість потоку і ці результати не зіставлялись із результатами незалежних розрахунків за власною моделлю автора?

12. Яким чином рециркуляція димових газів з їх подачею в циліндри теплового двигуна, зокрема, якої частки потоку вихлопу, дотична до проблематики термопресора? Яка мета застосування термопресора на лінії рециркуляція димових газів?

11. Висновок щодо відповідності дисертації вимогам "Порядку присвоєння наукових ступенів" ДАК України.

Зазначені недоліки не зменшують загальних переваг роботи.

Дисертаційна робота Коновалова Дмитра Вікторовича є закінченою науково-дослідницькою працею, яка виконана автором самостійно і на високому рівні.

Наведені у дисертаційній роботі результати можна кваліфікувати як нові, обґрунтовані та такі, що мають достатньо високий рівень наукового та інженерно-практичного значення.

Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика".

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи та в достатній мірі відтворює структуру та обсяг роботи.

За обсягом та якістю отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, що пред'являються ДАК до докторських дисертацій та відповідає вимогам п. 9, 10, 12, 13 "Порядку присудження наукових ступенів" МОН України, а **Коновалов Дмитро Вікторович** заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика".

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор, член-кор. НАН України,
завідувач відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій
Інституту технічної теплофізики НАН України



Басок Б.І.

м. Київ, 25 листопада 2020 р.

