

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Коновалова Дмитра Вікторовича

"Розвиток науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Актуальність роботи.

Дисертаційна робота присвячена розробці аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти теплових двигунів енергетичних установок. В основі цих технологій лежить використанням ефекту термогазодинамічної компресії, який полягає у підвищенні тиску газового потоку в процесі миттєвого випаровування упорскуваної води в потік, який прискорений до близької звуковій швидкості. Застосування аеротермопресорних технологій дозволить забезпечити підвищення потужності та скорочення витрати палива завдяки охолодженню робочого тіла з відповідним зменшенням витрат потужності на стискання, збільшенню витрати робочого тіла, безпечно експлуатацію газотурбінних двигунів (ГТД) і двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) без втрат тиску, що обумовлює актуальність теми досліджень, розвинених в роботі.

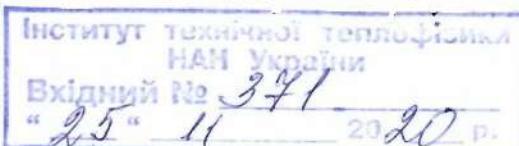
Ступінь обґрунтованості та вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Коновалова Д.В., обґрунтовані та базуються на коректній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів теоретичного та експериментального дослідження, зіставленні та аналізі наукових результатів і якісному формулюванні отриманих висновків. Якість результатів практичної частини дисертації підтверджена також позитивним впровадженням у виробництво.

Дисертація та автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Основні положення наукової новизни роботи:

1. охолодження наддувного повітря ДВЗ в аеротермопресорах забезпечує підвищення ККД і відповідно скорочення питомої витрати палива на 1,0–2,0% завдяки зниженню температури та підвищенню тиску наддувного повітря і, як наслідок, зменшенню витрат потужності компресора на стискання на 2–4% у порівнянні з охолодженням у поверхневих охолоджувачах наддувного повітря;

2. глибока утилізація енергії продуктів згоряння із застосуванням аеротермопресорних технологій в системах рециркуляції випускних газів ДВЗ, а також при



перерозширенні газів дозволяє зменшити витрати потужності на стискання робочого тіла і, як наслідок, зменшити питому витрату палива на 1,5–1,7%;

3. проміжне охолодження повітря газотурбінних двигунів (ГТД) в аеротермопресорах забезпечує зростання потужності на 2–3% завдяки збільшенню масової витрати робочого тіла, а також підвищення ККД та скорочення питомої витрати палива на 1,5–2,0% порівняно з ГТД без охолодження повітря чи охолодженням у поверхневих охолоджувачах завдяки компенсації втрат тиску і підвищенню повного тиску на 5–10% та раціональній організації теплофізичних процесів в аеротермопресорі з неповним випаровуванням, що наближає процес стиснення в компресорі до ізотермічного.

Також в дисертаційні роботі представлені наступні **основні наукові результати**:

1) розроблена концепція 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%;

2) 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;

3) вперше розроблено комплекс фізичних і математичних моделей 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 організовувати робочі процеси, зокрема з неповним випаровуванням упорскуваної рідини, забезпечуючи максимальне підвищення тиску та високу дисперсність, безпечну для експлуатації двигунів;

4) 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 степінь 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;

5) 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 ефективне ізотермування процесу в компресорі, дозволяє компенсувати гіdraulічні 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%;

6) встановлено, що застосування ефекту термогазодинамічної компресії для охолодження наддувного повітря ДВЗ дозволяє зменшити роботу на стиснення за рахунок компенсації гіdraulічних 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%;

7) 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 гіdraulічні втрати, відповідно і навантаження на вентилятор (або електро-компресор) системи рециркуляції, знизити навантаження на скрубер і систему відведення теплоти від рециркуляційних газів забортною водою, що забезпечує зменшення питомої витрати палива на 1,5-1,7%;

8) 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 $\zeta = 0,30–0,40$.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи було використано під час досліджень за наступними науково-дослідними роботами: GP/F32/152 "Розробка енергозберігаючих технологій на основі газодинамічного ефекту для установок комбінованого виробництва енергії" (науковий керівник, Грант Президента для молодих вчених), № ДР 0116U0086698 "Розробка концепції комбінованого

виробництва енергії в судновій та стаціонарній енергетиці на основі внутрішньоциклової низькотемпературної тригенерації"; № ДР 0115U000300 "Науково-технічні основи тригенераційних полінарних технологій на низькокиплячих робочих тілах для двигунів і енергетичних установок".

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена раціональна методика проектування аеротермопресорних технологій, яка може бути застосована на підприємствах, що займаються проектуванням та впровадженням технологій підвищення використання вторинної теплоти для енергетичних установок.

Впровадження результатів роботи у виробництво підтверджено актами підприємств: 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).

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджується використанням науково-обґрунтованих методик аналітичних та експериментальних досліджень, коректною постановкою здач, адекватністю математичної моделі з експериментальними даними, відтворюваністю результатів експериментальних досліджень, використанням сучасних програмних комплексів.

Повнота викладу основних наукових положень дисертації в опублікованих працях. Зміст дисертації відображену у 121 публікації, в тому числі: 40 статтях у наукових фахових виданнях України, 5 публікацій у виданнях, що входять до БД Scopus, у 4 колективних монографіях закордонного та вітчизняних видавництв, 60 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій та 10 патентах України на винахід.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких заходах: 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 кондиціювання 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 "Муніципальна 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).

Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації підтверджується повною мірою, автореферат містить тільки ті положення, які є у тексті рукопису дисертації.

Структура та зміст роботи. Дисертація є завершеною науковою працею і складається зі вступу, 7 розділів, висновків та додатку, списку використаної літератури на 324 джерела. Загальний обсяг роботи становить 416 сторінок, включаючи 375 сторінок основного тексту, 206 рисунка і 16 таблиць.

Перший розділ. Наведено аналіз сучасного стану і особливостей використання теплоти вторинних енергетичних ресурсів енергетичних установок. Показано аналіз структури теплових втрат в енергетичних установках. Показано, що найбільш доцільним є утилізація теплоти відхідних газів і циклового або наддувного повітря енергетичних установок на базі ДВЗ та ГТД. Також було проведено аналіз сучасних способів використання упорсування води для стаціонарних і суднових енергетичних установок та способів використання технологій рециркуляції відхідних газів та виявлені резерви для застосування випарного (контактного) охолодження для підвищення енергетичної ефективності цих технологій.

Обґрунтовано доцільність застосування аеротермопресорного охолодження в системах охолодження циклового або наддувного повітря енергетичних установок і показано, що такий принцип може дозволити з одного боку забезпечити інтенсивне охолодження повітря, а з другого – забезпечити значно більш ефективне розпилення води в потоці газа зі швидкістю біля звукової.

Другий розділ. Представлена методологія наукового дослідження та обґрунтовано гіпотези підвищення паливно-енергетичної ефективності ДВЗ і ГТД упорсування води в

циклове (надувне) повітря, перерозширення продуктів згоряння, зменшенням втрат тиску в системах рециркуляції вихлопних газів. Наведено обґрунтування та сформульовано напрям вирішення науково-прикладної проблеми дисертаційного дослідження, а також наведено та обґрунтовано використання методів наукового дослідження.

Третій розділ. Наведено розроблений комплекс математичних моделей технологій аеротермопресорного охолодження, який базується на фундаментальних законах термодинаміки, гідрогазодинаміки, збереження енергії, імпульсу та маси, рівняннях тепlop передачі та інш. Показано, що математична модель дозволяє враховувати зміну та залежності основних характеристик аеротермопресора (відносне підвищення тиску, степінь охолодження) від характеру розпилювання рідини (дисперсність та швидкість крапель). Створена модель дозволяє розраховувати параметри робочих процесів на локальних ділянках проточної частини всіх елементів аеротермопресора. На її основі розроблено методологію раціонального проектування систем використання вторинної теплоти енергетичних установок із застосуванням аеротермопресорних технологій, яка враховує: 1) неповне випаровування крапель рідини, що упорскується; 2) вплив дисперсності на характеристики аеротермопресорного апарату; 3) розрахунок на локальних ділянках проточної частини аеротермопресора.

Четвертий розділ. Наведено опис експериментального стенду для дослідження характеристик аеротермопресора за умов не повного випаровування, зокрема показані інформаційно-вимірювальна системи, основні елементи експериментального аеротермопресора та додаткового обладнання системи упорскування води. У розділі представлені результати експериментального дослідження впливу неповного випаровування на дисперсність потоку та підвищення тиску в проточній частині аеротермопресора, наведені методика та результати визначення похибки вимірювання. Наведено результати перевірки адекватності математичної моделі проведеної шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, отриманими автором особисто та представленими іншими науковцями у публікаціях.

П'ятий розділ. Приведено аналіз особливостей застосування аеротермопресорів для підвищення паливно-енергетичної ефективності енергетичних установок на базі ДВЗ за рахунок контактного охолодження надувного повітря та охолодження рециркуляційних газів. При моделюванні характеристик аеротермопресора та ДВЗ застосовано розроблений здобувачем програмний комплекс, який враховує наявність неповного випаровування та його вплив на характеристики аеротермопресорного апарату.

Запропоновані принципи застосування аеротермопресорних технологій контактного охолодження для даного типу енергетичних установок дозволяють забезпечити зменшення роботи на стиснення за рахунок компенсації гіdraulічних втрат тиску та підвищення повного

тиску, підвищити ККД енергетичної установки з відповідним зменшенням питомої витрати палива на 1,0–2,0.

Шостий розділ. Показано, що застосування аеротермопресорних технологій дозволяє поєднати в одному апараті процеси стиснення і контактного охолодження, що в свою чергу, дає можливість застосувати такі технології для проміжного контактного охолодження повітря та перерозширення газу в газотурбінних установках.

Аналіз результатів розрахунку показав зростання потужності завдяки збільшенню масової витрати робочого тіла, а також підвищення ККД та скорочення питомої витрати палива на 1,5–2,0% порівняно з ГТД з традиційним охолодженням завдяки компенсації втрат тиску і підвищенню новного тиску на 5–10% та раціональній організації теплофізичних процесів в аеротермопресорі з неповним випаровуванням, що наближає процес стиснення в компресорі до ізотермічного.

Сьомий розділ. Наведено аналіз розроблених схемно-конструктивних рішень для контурів тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин, що працюють сумісно з аеротермопресорами, за результатами якого встановлено, що сумарне збільшення теплового коефіцієнту може сягати до 10–15%. Проведено аналіз вибору холодаагенту, який забезпечує максимальний ефект підвищення тиску.

У **висновках** наведено основні результати досліджень.

Характеристика змісту та рукопису дисертації. Дисертаційна робота Коновалова Д.В. є логічним, добре структурованим науковим твором з послідовним викладенням матеріалу. Оформлення дисертації відповідає вимогам, які ставляться до наукових праць. Всі позиції списку використаних літературних джерел мають відповідні посилання у тексті рукопису, запозичень з робіт інших авторів без відповідних посилань на ці наукові праці у тексту рукопису не виявлено. Аналіз змісту дисертації Коновалова Д.В. дозволяє оцінити її як закінчену наукову роботу, яка містить нові науково-обґрунтовані результати.

Разом із цим до дисертації Коновалова Д.В. с наступні **зауваження**:

1. Результати експериментальних досліджень наведено лише для температури повітря на вході 155 °C, що вже не відповідає режимам роботи сучасних турбокомпресорів ДВЗ.
2. Дослідження аеротермопресора проведено тільки для камери з діаметром 25 мм та витратами повітря до 0,52 кг/с. Доречно було б провести також дослідження і за умов більших діаметрів, що відповідають більшим витратам, які мають місце для сучасних енергетичних установок як на базі ГТД так і ДВЗ.
3. При наведені математичної моделі виникнення ефекту термогазодинамічної компресії показано рівняння, що характеризують перехід потоку на надзвукову швидкість, але

4. Бажано було б навести алгоритм, блок-схему і опис програмного продукту, який розроблений здобувачем, для проведення розрахунків характеристик аеротермопресора та параметрів роботи теплових двигунів енергетичних установок.

5. В роботі основні дослідження спрямовані на енергетичні характеристики запропонованого автором процесу, при цьому його вплив на екологічні показники розглянуто тільки за літературними даними. Оцінка екологічного впливу є необхідною для коригування роботи і впровадження нових рішень в експлуатацію паливовирористовуючого обладнання.

6. При розгляді результатів розрахунку характеристик аеротермопресора та впливу їх на параметри роботи енергетичної установки (табл. 5.1) не показані розрахункові значення геометрії проточної частини аеротермопресора, витрати води, що необхідна для забезпечення режиму неповного випаровування в аеротермопресорі.

Висновок.

Дисертаційна робота Коновалова Дмитра Вікторовича "Розвиток науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок" є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у підвищенні потужності та паливної ефективності енергетичних установок шляхом глибокої утилізації енергії продуктів згоряння та охолодження робочого тіла (повітря) з використанням аеротермопресорних технологій.

Робота містить нові вагомі наукові результати для енергетичної галузі України. Робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика".

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. №567, а здобувач, **Коновалов Дмитро Вікторович**, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика".

Офіційний опонент,
завідувач відділу технологій альтернативних палив
Інституте газу НАН України, д.т.н.

Підпис д.т.н. П'яних К.С., засвідчую.
Вчений секретар Інституту газу, к.т.н.



П'яних К.С.
Ільєнко Б.К.