

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

КОНОВАЛОВ ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.517: 621.43

**РОЗВИТОК НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ОСНОВ АЕРОТЕРМОПРЕСОРНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ ТЕПЛОТИ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерства освіти і науки (МОН) України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Радченко Микола Іванович,
завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Басок Борис Іванович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій

доктор технічних наук, професор
Безродний Михайло Костянтинович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, професор кафедри теоретичної та промислової теплотехніки

доктор технічних наук
П'яних Костянтин Євгенович,
Інститут газу НАН України,
завідувач відділу технологій альтернативних палив

Захист відбудеться " 9 " грудня 2020 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а.

Автореферат розісланий " 6 " листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук

 Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення потужності енергетичних установок на базі теплових двигунів (газотурбінні двигуни – ГТД і двигуни внутрішнього згоряння – ДВЗ) здійснюється шляхом збільшення витрати робочого тіла (повітря) та корисної роботи розширення продуктів згоряння з одночасним зменшенням її витрати на стискання робочого тіла (повітря), що досягається завдяки його охолодженню та глибокої утилізації енергії продуктів згоряння і, відповідно, приводить до зменшення питомої витрати палива і підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД).

Найбільш поширеним напрямом збільшення потужності та скорочення споживання палива є контактне охолодження газового або повітряного потоку упорскуванням води, для якого, однак, характерна значна протяжність зони випаровування, а відтак, і втрати потужності через аеродинамічний опір, що конструктивно не завжди можливе. Подальший розвиток напряму – використання вторинної теплоти енергетичних установок (теплоти стисненого компресорами повітря або продуктів згоряння) для прискорення повітряного або газового потоку до швидкості близької звуковій і практично миттєвого (за мінімальних протяжності та аеродинамічного опору) випаровування упорскуваної води, тобто застосуванням аеротермопресорних технологій.

В основі аеротермопресорних технологій лежить реалізація ефекту термогазодинамічної компресії в спеціальних контактних теплообмінних апаратах (аеротермопресорах або термопресорах), який полягає в підвищенні тиску при одночасному зниженні температури в процесі випаровування дрібнодисперсної рідини, яка упорскується в потік пари (газу), що рухається зі швидкістю, близькою до звукової.

Контактне охолодження застосуванням аеротермопресорних технологій є перспективним резервом для підвищення ефективності використання вторинної теплоти енергетичних установок на базі ГТД і ДВЗ за рахунок високоефективного охолодження проміжного або наддувного повітря теплового двигуна, використання енергії відхідних газів для їх перерозширення та отримання додаткової корисної роботи, зменшення гідравлічних втрат тиску в системах рециркуляції відхідних газів, підвищення ефективності контурів тепловикористовуючих холодильних машин.

Використанню контактного охолодження робочого тіла з метою підвищення ефективності енергетичних установок на базі ГТД присвячені роботи Клименка В.М., Долинського А.А., Дикого М.О., Білеки Б.Д., Баска Б.І. та інш., а застосуванню ефекту термогазодинамічної компресії як засобу підвищення ефективності енергетичних установок присвячено низку робіт Вуліса Л.А., Shapiro А.Н., Fowle А.А., Єрофєєва В.Л., Алесєєва А.В., Дикого М.О., Степанова І.Р., Чудінова В.І., Живиці В.І. та ін. відомих вчених.

Застосування аеротермопресорних технологій стримується відсутністю даних з їх натурних випробувань у складі системи охолодження та системи утилізації теплоти відхідних газів, математичної та фізичної моделей робочих процесів аеротермопресора, що давали б змогу розробляти раціональні способи організації теплофізичних процесів охолодження, методології їх раціонального проектування та визначення раціональних параметрів, які забезпечують досягнення максимального ефекту зі збільшення потужності і ККД та зменшення питомої витрати палива енергетичних установок.

Метою наукового дослідження є підвищення потужності та паливної ефективності енергетичних установок шляхом глибокої утилізації енергії продуктів згоряння та охолодження робочого тіла (повітря) з використанням аеротермопресорних технологій.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **завдання**:

1) обґрунтувати методологічний підхід і принципи використання вторинної теплоти енергоустановок шляхом застосування аеротермопресорних технологій для охолодження робочого тіла (повітря) і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння;

2) розробити фізичну та математичну моделі теплофізичних процесів контактного дисперсного охолодження в аеротермопресорних апаратах для систем охолодження робочого тіла (повітря) і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння енергетичних установок;

3) встановити особливості та закономірності процесів використання вторинної теплоти енергетичних установок з охолодження робочого тіла (повітря) і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння при застосуванні аеротермопресорних технологій;

4) визначити раціональні способи організації теплофізичних процесів в аеротермопресорних технологіях використання вторинної теплоти енергетичних установок;

5) розробити вдосконалені цикли та схеми аеротермопресорних систем глибокої утилізації енергії продуктів згоряння з охолодженням робочого тіла (повітря) двигунів, принципи та способи їх реалізації;

6) розробити аеротермопресорний апарат, в якому реалізується ефект термогазодинамічної компресії, для системи охолодження робочого тіла (повітря) енергетичної установки на базі ДВЗ і ГТД та експериментальну установку для дослідження його характеристик і визначення параметрів роботи;

7) розробити методику експериментального дослідження аеротермопресорного апарату системи охолодження робочого тіла (повітря) енергетичної установки;

8) провести експериментальні дослідження характеристик аеротермопресорного апарату системи охолодження робочого тіла (повітря) енергетичної установки;

9) розробити рекомендації зі створення аеротермопресорних технологій для забезпечення охолодження робочого тіла (повітря) і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння, які реалізують вдосконалені цикли і принципи використання вторинної теплоти енергетичних установок, враховують встановлені закономірності та особливості теплофізичних процесів, забезпечують збільшення потужності та зменшення витрати палива енергетичними установками;

10) узагальнити результати у вигляді концепції підвищення економічності енергетичних установок шляхом використання вторинної теплоти із застосуванням аеротермопресорних технологій для охолодження робочого тіла (повітря) і глибокої утилізації енергії продуктів згоряння.

Об'єктом дослідження є процеси використання вторинної теплоти енергетичних установок на базі ДВЗ і ГТД.

Предмет дослідження – характеристики теплофізичних процесів використання вторинної теплоти при контактному охолодженні газових потоків в аеротермопресорному апараті.

Основні наукові положення:

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.

Методи дослідження.

Загальнонаукові: аналіз літературних джерел та отриманих експериментальних даних, синтез – для формування узагальнень та висновків; експеримент – складання схеми лабораторних досліджень; моделювання – для побудови математичної та фізичної моделей; індукції та дедукції – для співставлення результатів математичного моделювання з отриманими експериментальними даними. **Спеціальні:** математично-

статистичний – для математичної обробки експериментальних даних; порівняльно-розрахунковий – для визначення економічної та екологічної ефективності аеротермопресорних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів.

Науково-прикладна проблема – розвиток науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок для охолодження робочого тіла.

Основні наукові результати:

1) 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 організувати робочі процеси, зокрема з неповним випаровуванням упорскуваної рідини, забезпечує 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 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 %;

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

7) 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 %;

8) *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 скрубєр і систему відведення теплоти від рециркуляційних газів забортною водою, що забезпечує зменшення питомої витрати палива на 1,5–1,7 %;

9) *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 $\zeta = 0,30–0,40$.

Наукова новизна способів охолодження та схемних рішень енергоустановок захищена 10 патентами України на винаходи.

Практичне значення одержаних результатів.

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

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

ГТД, що забезпечує суттєве скорочення споживання палива і сприятиме підвищенню рівня енергетичної безпеки держави.

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження відповідають напрямку «Технології використання нових видів палива, скидних енергоресурсів, відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Теплоносні 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.).

Наукові дослідження дисертаційної роботи увійшли до складу 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, а також, як науковий керівник теми за Грантом Президента для молодих вчених: «Розробка енергозберігаючих технологій на основі газодинамічного ефекту для установок комбінованого виробництва енергії» (GP/F32/152).

Впровадження результатів досліджень. Результати роботи впроваджені на наступних підприємствах: 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).

Особистий внесок здобувача полягає в розробці експериментальної установки і стенду для вивчення робочих процесів в аеротермопресорі при охолодженні проміжного повітря ГТУ та наддувного повітря ДВЗ; розробці методики експериментальних теплофізичних досліджень і статистичної обробки отриманих результатів; проведенні експериментів; обробці та аналізі отриманих експериментальних даних; розробці концепції підвищення економічності енергетичних установок застосуванням аеротермопресорних

технологій використання вторинної теплоти з охолодженням робочого тіла; розробці комплексу фізичних і математичних моделей процесів використання вторинної теплоти енергетичних установок в аеротермопресорах; розробці методології раціонального проектування систем із застосуванням аеротермопресорних технологій.

Оглядові та порівняльні наукові результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані особисто автором на основі проведення аналізу літературних, інформаційних та патентних джерел, а також результатів дослідних даних.

Апробація результатів роботи. Матеріали дисертаційної роботи та її основні положення доповідались і обговорювались 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 «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).

Публікації. За темою дисертації опубліковані **121** друкована наукова робота, в тому числі **40** статей у наукових фахових виданнях України,

5 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, **10** патентів України на винахід, **1** розділ у колективній монографії видавництва України, **3** розділи у колективних монографіях закордонного видавництва, **60** доповідей і тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, **7** розділів і висновків. У додатках наведено документи, що підтверджують впровадження основних результатів дослідження.

Обсяг дисертації становить **416** сторінок, включаючи **375** сторінок основного тексту, **206** рисунка і **16** таблиць. Бібліографія містить **324** найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи; сформульовані мета і завдання роботи; розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; визначені об'єкт, предмет і методи дослідження; відображені наукова новизна і практична цінність результатів, особистий внесок здобувача; наведені дані щодо апробації і впровадження результатів роботи, а також про наукові публікації та структуру дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок і обґрунтування їх ефективності застосуванням аеротермопресорних технологій. Науковою основою в напрямку використання контактного охолодження робочого тіла з метою підвищення ефективності енергетичних установок на базі ГТД є роботи Клименка В.М., Долинського А.А., Дикого М.О., Білеки Б.Д., Баска Б.І. та інш., а в напрямку використання ефекту термогазодинамічної компресії, як засобу для підвищення ефективності енергетичних установок є низька робіт Вулса Л.А., Shapiro А.Н., Fowle А.А., Єрофєєва В.Л., Алесеєва А.В., Дикого М.О., Степанова І.Р., Чудінова В.І., Живиці В.І. та ін. відомих вчених.

Аналіз сучасного стану і особливостей утилізації теплоти вторинних енергетичних ресурсів, а також аналіз структури теплових втрат в енергетичних установках дозволяє виявити резерви скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів енергетичними установками шляхом утилізації їх вторинної теплоти. При цьому найбільш доцільним є утилізація теплоти відхідних газів і циклового або наддувного повітря енергетичних установок на базі ГТД і ДВЗ.

Окрім цього, було проведено аналіз сучасних способів використання упорскування води для стаціонарних та суднових енергетичних установок на базі ДВЗ з метою покращення енергетичних характеристик, а також використання технологій рециркуляції відхідних газів для енергетичних установок та виявлені резерви для застосування випарного (контактного) охолодження для підвищення ефективності цих технологій за рахунок зменшення енергетичних втрат.

Також було проведено аналіз існуючих способів підвищення енергетичної ефективності для стаціонарних та суднових газотурбінних установок (ГТУ), який показав, що одним з перспективних напрямків є застосування проміжного охолодження циклового повітря контактними або поверненими теплообмінними апаратами.

Зважаючи на зроблений аналіз, можна зробити висновок про доцільність застосування контактної струмінної теплообмінної апаратури, де реалізується ефект термогазодинамічної компресії (аеротермопресор). Контактне охолодження в аеротермопресорі дозволяє з одного боку забезпечити інтенсивне охолодження повітря або газу, а з іншого – забезпечує значно більш ефективне розпилення води в потоці із навколзвучовою швидкістю. Крім того, перспективним є також застосування аеротермопресора в системах утилізації теплоти продуктів згоряння енергетичних установок, і, зокрема, в контурах перерозширення, з метою підвищення енергетичної ефективності самих установок.

Особливості реалізації робочих процесів за наявності ефекту термогазодинамічної компресії в аеротермопресорі дають можливість виявити основні напрямки підвищення його ефективності та підвищення надійності в процесі експлуатації. Сутність виникнення ефекту термогазодинамічної компресії полягає в виникненні теплової компресії в результаті контактної (випарної) охолодження газу (повітря), що рухається з навколзвучовою швидкістю.

На сьогоднішній день застосування аеротермопресорних технологій стримується відсутністю даних їх натурних випробувань у складі системи охолодження повітря та системи утилізації теплоти продуктів згоряння, математичної та фізичної моделі робочих процесів в аеротермопресорі, що давали б змогу розробляти раціональні способи організації теплофізичних процесів охолодження, методології їх раціонального проектування та визначення раціональних параметрів, які забезпечують досягнення максимального ефекту зі збільшення потужності і ККД та зменшення питомої витрати палива енергетичних установок.

На основі виконаного аналізу стану розглянутих проблем сформульовані мета та основні наукові завдання, які реалізовані в дисертаційній роботі.

В другому розділі наведена методологія наукового дослідження та обґрунтовано напрям вирішення науково-прикладної проблеми.

Теплові двигуни сучасних енергетичних установок мають достатньо високу організацію робочих процесів для забезпечення високих економічних показників. Тому подальше їх вдосконалення з метою підвищення ефективності представляє собою складну задачу. Для вибору напряму вирішення поставленої науково-прикладної проблеми було проаналізовано резерви підвищення ефективності за рахунок вдосконалення систем, що обслуговують енергетичні установки, зокрема системи охолодження циклового (проміжного) та наддувного повітря.

Відомо, що застосування проміжного охолодження наддувного повітря дозволяє підвищити потужність двигуна приблизно на 2,5–3,0 % на кожні 10 % зниження температури повітря. Застосування традиційних систем не дозволяє у повній мірі реалізувати всі резерви для вдосконалення. Перспективним напрямом є охолодження наддувного повітря ДВЗ аеротермопресором, що забезпечить підвищення ККД та скорочення споживання палива завдяки зниженню температури та збільшенню тиску стисненого повітря і, як наслідок, зменшенню витрат потужності на стискання. Також, слід відмітити, що змінні умови експлуатації енергетичних установок, а отже і теплового навантаження на аеротермопресор, потребують раціональної організації робочих процесів за наявності ефекту термогазодинамічної компресії та визначення раціональної проектної величини підвищення тиску, яка забезпечувала б максимальний ефект.

Аналіз особливостей використання технології упорскування води в ГТУ показав, що одним з найперспективніших способів є проміжне охолодження циклового повітря, а також вологе стиснення в компресорних ступенях. Реалізувати такі способи можливо за рахунок упорскування води в циклове повітря. Аналіз сучасних способів і методів упорскування показав, що середній діаметр крапель, що надходять в наступну ступень компресора із цикловим повітрям не повинні перевищувати 25–30 мкм для того аби не допустити небажаної сепарації крапель на поверхні лопаток. Для безпечної роботи ГТД необхідна реалізація високодисперсного розпилю рідини, при якому краплі рухаючись в повітряному потоці будуть обтікати лопатки компресора без співударяння з ними. Однак, слід відмітити, що сучасні типи механічних і пневматичних форсунок не дозволяють забезпечити упорскування води з отриманням середнього діаметра крапель менше 30 мкм. Таким чином, є необхідність у розробці нових технологій розпилення, що дозволять отримати краплі розміром менше 25–30 мкм.

Одним із способів забезпечення високодисперсного розпилю та охолодження і стиснення проміжного повітря ГТД є застосування аеротермопресорних технологій. Проміжне охолодження циклового повітря ГТД аеротермопресором забезпечить зростання потужності завдяки збільшенню масової витрати робочого тіла, підвищення ККД та скорочення споживання палива завдяки зниженню температури стисненого повітря і, як наслідок, зменшенню витрат потужності на стискання.

Діаметр краплі рідини, що упорскуються в робочу камеру аеротермопресора робить великий вплив на довжину ділянки випаровування і швидкісний режим: із зменшенням первинного розміру краплі довжина ділянки випаровування і втрати на тертя значно зменшуються. Необхідного ефективного розпилю можна добитися збільшенням швидкості потоку (число Маха M) в камері випаровування або використанням спеціальних форсунок при достатньо високих тисках рідини, що упорскуюється. Упорскування води збільшує коефіцієнт тертя на 10–20 % і для того, щоб уникнути наступного підвищення втрат необхідно знижувати аеродинамічний опір конструктивних

елементів системи упорскування, що не завжди можливо. Одним з ефективних способів зниження втрат тиску в проточній частині аеротермопресора є забезпечення дисперсного режиму течії по всій довжині проточної частини аеротермопресора. Такий режим можливо забезпечити за рахунок неповного випаровування, тобто упорскування рідини понад необхідну кількість.

Зважаючи на визначені напрями вирішення науково-прикладної проблеми було розроблено методологію дослідження. Для проведення аналізу результатів дослідження, зокрема, для визначення термодинамічної та енергетичної ефективності аеротермопресорної системи охолодження у складі енергетичної установки, було розроблено математичну модель та методику раціонального проектування. На основі цього розроблено власний програмний комплекс. Розрахунок основних параметрів роботи ДВЗ проводився за допомогою програмних комплексів Diesel-RK і CEAS (MAN B&W) з урахуванням зміни відповідних параметрів повітря на вході в циліндри двигуна, а також із врахуванням часткових режимів роботи. Для використання наведених програмних комплексів було розроблено додаткову управляючу програму, в якій визначались параметри вологого газу (повітря) на вході та виході з турбокомпресора, який охолоджується в аеротермопресорі, як вхідні дані для програм Diesel-RK і CEAS. Також використовувалася обчислювальна модель, яка розроблена для застосування аеротермопресорів у газотурбінних циклах, і яка враховує особливості розрахунку газотурбінних циклів і схем, особливості термогазодинамічного стиснення газів (циклового повітря) і розрахунок процесів вологого повітря під час контактного теплообміну. Розроблений програмний комплекс дозволяє визначати параметри робочого тіла у характерних точках циклу, параметри паливно-енергетичної та термодинамічної ефективності ГТУ.

Третій розділ присвячений розробці основних положень математичної та фізичної моделей аеротермопресорної технології охолодження.

Фізичною моделлю технології аеротермопресорного охолодження є математична модель, складена з фізичних об'єктів, до яких, в т.ч. слід віднести аеротермопресор, де реалізується власне ефект термогазодинамічної компресії та система упорскування з отриманням високодисперсного потоку. Математична модель процесів аеротермопресорного охолодження циклового (наддувного) повітря енергетичної установки включає в себе: математичну модель робочих процесів аеротермопресора; математичну модель процесів стиснення вологого повітря в компресорах двигуна енергетичної установки (ДВЗ, ГТД) і алгоритм визначення робочих параметрів двигуна енергетичної установки із застосуванням відомих методик розрахунку. Математична модель процесів термопресії включає в себе модель випаровування краплі рідини (води) в потоці вологого газу (повітря), що рухається зі швидкістю, близькою до звукової, та математичну модель процесів термогазодинамічної компресії у проточній частині аеротермопресора.

Завдання створення математичної моделі технології аеротермопресорного охолодження, а також методології раціонального проектування таких технологій вирішувалося відповідно до прийнятих основних припущень і граничних умов:

1) відсутен теплообмін поверхні аеротермопресора із навколишнім середовищем;

2) задача теплового розрахунку аеротермопресора розв'язувалася у спряженій постановці – з урахуванням зміни тиску;

3) випаровування крапель рідини здійснюється до повного насичення вологого газу (повітря), тобто до значення відносної вологості $\varphi = 100\%$, при цьому випаровування в усьому апараті може бути не повним;

4) при визначенні параметрів вологого газу (повітря) розглядалися граничні умови третього роду, тобто при відомих у вхідному перетині температурі, тиску, відносної вологості і законах тепловіддачі визначали густину теплового потоку та тепловий потік на ділянці трубки довжиною dz . З теплового балансу по газу (повітрю) і рідині (вода) знаходилася його температура, тиск і відносна вологість на виході з ділянки dz , а виходячи з втрат тиску в наслідок гідравлічного опору та підвищення тиску в наслідок термогазодинамічної компресії обчислювали тиск на виході з ділянки dz , які служили вхідними параметрами для наступної ділянки проточної частини аеротермопресора;

5) фізичні властивості та склад газу (повітря) по довжині проточної частини аеротермопресора залишаються постійними;

6) розрахунок (процесів) тепломасообміну (в нестационарних умовах, які мають місце в) у процесах термогазодинамічної компресії ведеться з урахуванням випаровування окремої краплі;

7) форма краплі – сферична і не змінюється при русі в проточній частині аеротермопресора, стан шару пари біля поверхні краплі – насичений;

8) процеси внутрішньої теплопередачі здійснюються шляхом теплопровідності;

9) дисперсний потік є монодисперсним (з урахуванням середньорозрахункового діаметру краплі);

10) на краплі рідини не впливають процеси перемішування друг із другом, тобто вони не деформуються, не зливаються і повторно не подрібнюються при зштовхуванні;

11) при досягненні термодинамічної рівноваги температура крапель залишається постійною, а також дорівнює температурі мокрого термометра;

12) незворотні втрати, що пов'язані з охолодженням та рухом газу, всередині каналу відсутні.

Розроблена математична модель дозволяє враховувати зміну та залежності основних характеристик аеротермопресора від характеру розпилювання рідини (дисперсність та швидкість крапель, відносна доля рідини по відношенню до масової витрати газу або повітря), а також дозволяє

розраховувати параметри робочого процесу на локальних ділянках проточної частини всіх елементів аеротермопресора (рис. 1).

Процес випаровування можливо організувати двома принциповими способами: тільки в камері випаровування; в камері випаровування частково, і далі в дифузорі повне (або часткове) випаровування. Випаровування в дифузорі біля 15 % загальної маси рідини частково компенсує втрати повного тиску на кінцевому режимі течії, де переважає поверхневе тертя, або виключає (за умов раціонального проектування) цей режим. В реальних умовах величина підвищення тиску в аеротермопресорі буде значно меншою, оскільки, поверхневе та внутрішнє тертя газу, аеродинамічний опір системи упорскуванням крапель рідини та процеси тепломасопереносу приводять до значних втрат повного тиску. На рис. 2 наведено процеси в ідеальному (не враховано втрати тиску через тертя та місцеві опори) та в реальному аеротермопресорі. При цьому процес 1–2 (1–2') – адиабатне розширення газу (повітря) в конфузорі із одночасним прискоренням потоку до навіколзвуквої швидкості; 2–3 (2'–3') – процес стиснення в наслідок ефекту термогазодинамічної компресії в камері випаровування; 3–4 (3'–4') – процес адиабатного стиснення в дифузорі та одночасним гальмуванням потоку до практично початкової швидкості.

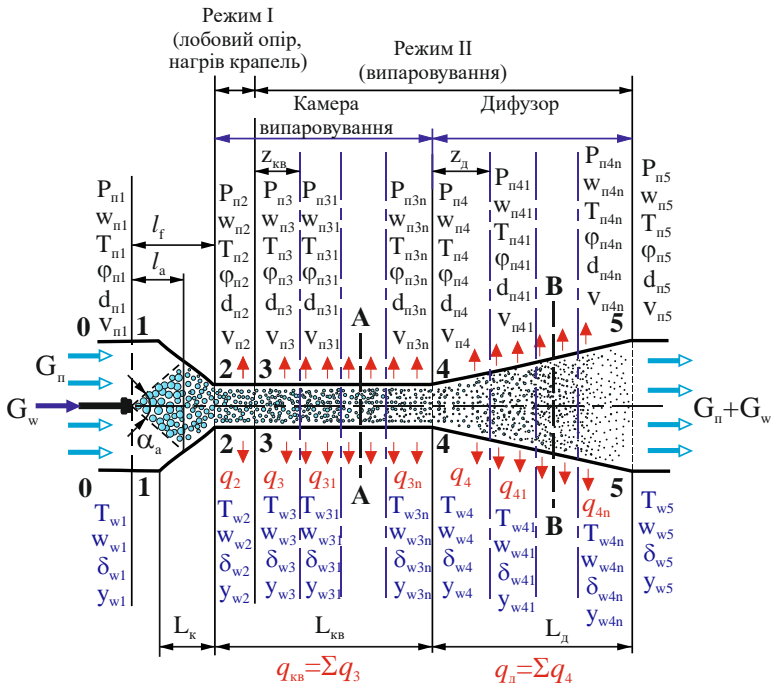


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі аеротермопресора

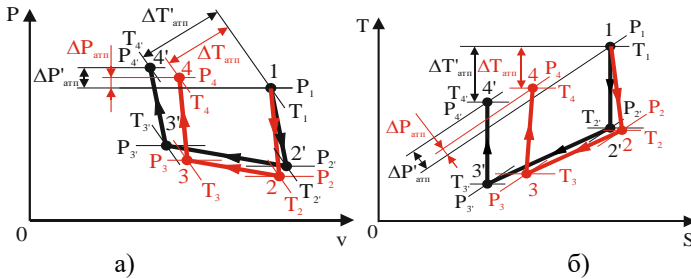


Рис. 2. Робочі процеси в аеротермопресорі:

а) – $P(v)$ -координати; б) – $T(S)$ -координати; 1–2'–3'–4' – ідеальний аеротермопресор; 1–2–3–4 – реальний аеротермопресор

Найбільш відомою серед математичних моделей, які описують витікання рідини та її випаровування, є модель, що розроблена Долинським А.А. та Іваницьким Г.К. Ця модель розглядає робочі процеси, пов'язані із комплексом (ансамблем) бульбашок в умовах термодинамічної нестабільності.

Для розрахунку процесів випаровування крапель рідини в проточній частині аеротермопресора застосовано метод заміни полідисперсного складу крапель рідини на умовний монодисперсний склад при зберіганні дійсної сумарної поверхні крапель. За умовний діаметр таких крапель прийнято «Зауторовський» діаметр:

$$\delta_z = 6 \frac{V_w}{S_w} \text{ або } \delta_z = 0,8 \cdot \delta_{w.cp}, \quad (1)$$

де $\delta_{w.cp}$ – середній меридіальний діаметр краплі.

Коефіцієнт аеродинамічного опору краплі в потоці повітря (режим I на рис. 1):

$$\xi_w = \left(\frac{16}{Re} + \frac{2.2}{Re^{0.5}} + 0.32 \right) \cdot \left(\frac{1.5\mu_w + \mu_n}{\mu_w + \mu_n} \right) \quad (2)$$

де μ_n та μ_w – динамічна в'язкість повітря та води, кг/(м·с).

В момент вирівнювання швидкостей краплі та повітря $w = 0$ і число Рейнольдса $Re = 0$.

Радіус краплі

$$\frac{dR}{dx} = - \frac{j}{\rho_w w_w} \quad (3)$$

Температура краплі

$$\frac{dT_w}{dx} = - \frac{Q_k + J_L(T_w)}{m_w c'_{pw} w_w} \quad (4)$$

Швидкість краплі

$$\frac{dw_w}{dx} = \frac{3}{8} \frac{\rho_n}{\rho'_w R w_w} \xi_w |w_w - w_n| \cdot (w_w - w_n) \quad (5)$$

Швидкість випаровування краплі

$$J = -\frac{dm_w}{d\tau} = \pi \delta_w Df_n [\rho_{sat}(T_n) - \rho_w''] Sh_n \quad (6)$$

Критерій (число) Шервуда

$$Sh_n = 2 + 0,6 \cdot Re_k^{0,5} \cdot Sc^{0,33} \quad (7)$$

Рівняння конвективного теплообміну

$$Q_k = \pi d \lambda_n (T_w - T_n) Nu_n \quad (8)$$

$$Nu_n = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (9)$$

Теплообмін краплі з повітрям

$$Q_n = Q_k + Jc_{pw}''(T_w - T_n) \quad (10)$$

Кількість теплоти, що передається шляхом конвекції між краплею та повітрям

$$Q_k = \alpha F_w (T_w - T_n) \quad (11)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну (тепловіддачі), Вт/(м²·К), який визначається з рівності:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \delta_w}{\lambda_n} \quad (12)$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К).

При розрахунку теплообміну адиабатно скипаючої рідини число Нуссельта можна знайти за формулою:

$$Nu_n = 2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33} \quad (13)$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну на статичній ділянці:

$$\alpha = \frac{\lambda_n}{d} \left[2 + 0,6 \left(\frac{d\Delta w \rho_n}{\mu_n} \right) \cdot \left(\frac{\mu_n \cdot C_{pm}}{\lambda_n} \right)^{0,33} \right] \quad (14)$$

Коефіцієнт обміну масової дифузії записується у вигляді відношення:

$$Df_{mass} = \frac{Sh \cdot Df_n}{\delta_w} \quad (15)$$

де Df_n – масовий коефіцієнт дифузії повітря; Sh – число Шервуда.

Рівняння для діаметра краплі в кінці ділянки dz :

$$\delta_{w2} = \left[\delta_{w1}^2 \left(\delta_{w1} + 6 \frac{j}{\rho_w} \cdot \frac{dz}{w_n} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Довжина ділянки випаровування краплі від δ_{w1} до δ_{w2} :

$$L_\delta = \frac{(\delta_{w2}^3 - \delta_{w1}^3) \cdot \rho_w \cdot w_n}{6j \cdot \delta_{w1}^2} \quad (17)$$

Також теплоту, що відводиться від повітря можна виразити рівняння для вологого газу (повітря):

$$Q_n = G_n \cdot c_{pn} \cdot (T_{n1} - T_{n2}) \cdot \xi, \quad (18)$$

де G_n – витрата вологого газу (повітря); c_{pn} – теплоємність вологого газу (повітря); T_{n1} , T_{n2} – температура повітря на вході та виході з ділянки dz ; ξ – коефіцієнт вологовипадіння. Процес охолодження повітря йде при практично постійній ентальпії $I_{n1} = I_{n2}$ по напрямку до температури мокрого термометра T_M .

Теплообмін між краплею та повітрям буде мати місце лише за умови, що температура краплі T_δ буде вище температури мокрого термометра та $\varphi_{n2} < 100\%$, тобто вологий газ (повітря) буде ненасичене.

Довжина ділянки випаровування, якій буде відповідати насичення вологого газу (повітря) до $\varphi_{n2} = 100\%$. При досягненні відносної вологості в 100% процес охолодження зупиняється і, відповідно:

$$L_\delta'' = \frac{\delta_{w1} \cdot \rho_w \cdot w_n \cdot (d_{вт.м} - d_{вт1})}{36j \cdot g_w} \quad (19)$$

Діаметр краплі в кінці процесу випаровування до насичення вологого газу (повітря) до стану при $\varphi_2 = 100\%$:

$$\delta_{w2}'' = \delta_{w1} \sqrt[3]{1 - \frac{d_{вт.м} - d_{вт1}}{6g_w}}, \quad (20)$$

Для камери випаровування довжиною $L_{кв}$ при $L_{кв} > L_\varphi''$ і $g_w > g_w''$ діаметр краплі в дисперсному потоці на виході буде становити:

$$\delta_{w2} = \left[\delta_{w1}^2 \left(\delta_{w1} + 6 \frac{j}{\rho_w} \cdot \frac{L_\delta''}{w_n} \right) \right]^{1/3} \quad (21)$$

Якщо $g_w < g_w''$, то $L_{кв} < L_\delta''$ і відповідно:

$$L_{кв} = \frac{\delta_{w1} \cdot \rho_w \cdot w_n \cdot (d_{вт2} - d_{вт1})}{36j \cdot g_w} \quad \text{та} \quad \delta_{w2} = \left[\delta_{w1}^2 \left(\delta_{w1} + 6 \frac{j}{\rho_w} \cdot \frac{L_{кв}}{w_n} \right) \right]^{1/3} \quad (22)$$

Основні рівняння математичної моделі виникнення ефекту термогазодинамічної компресії.

При розрахунку робочих процесів в аеротермопресорі необхідно враховувати рівняння швидкості руху, тиску, густини і температури потоку при одночасному впливі факторів витратної та теплової дії.

Рівняння для швидкості потоку:

$$(M^2 - 1) \frac{dw}{w} = - \left[1 - \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \sigma \right] \frac{dG}{G} \quad (23)$$

де M – число Маха, яке визначає міру співвідношення між кінетичною та потенціальною енергіями направлено руху; k – показник ізоентропії; G – витрата повітря.

Критеріальна характеристика аеротермопресора:

$$\sigma = \left| \frac{dT_0}{T_0} \cdot \frac{G}{dG} \right| = \frac{\Delta I_{0w}}{c_p T_0} \quad (24)$$

де G – масова витрата робочого тіла; ΔI_{0w} – різниця повних ентальпій рідини та пари при температурі та швидкості їх руху, рівних температурі та швидкості руху основного потоку; c_p – теплоємність при постійному тиску.

Рівняння для тиску:

$$(M^2 - 1) \frac{dP}{P} = kM^2 \left[1 - \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \sigma \right] \frac{dG}{G} \quad (25)$$

Рівняння для густини:

$$(M^2 - 1) \frac{d\rho}{\rho} = M^2 \left(1 - \frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{M^2} \sigma \right) \frac{dG}{G} \quad (26)$$

Рівняння для температури:

$$(M^2 - 1) \frac{dT}{T} = -2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \left(1 - \frac{kM^2 + 1}{2} \sigma \right) \frac{dT_0}{T_0} \quad (27)$$

Рівняння для тиску та густини загальмованого газу:

$$\frac{dp_0}{p_0} = \frac{kM^2}{2} \sigma \frac{dG}{G} = - \frac{kM^2}{2} \sigma \frac{dT_0}{T_0} \quad (28)$$

$$\frac{d\rho_0}{\rho_0} = \left(1 + \frac{kM^2}{2} \right) \sigma \frac{dG}{G} = - \left(1 + \frac{kM^2}{2} \right) \sigma \frac{dT_0}{T_0} \quad (29)$$

Як наслідок закону обернення впливів відносно охолодження потоку газу за наявності ефекту термогазодинамічної компресії – основний ефект визначається лише тепловим впливом, який пов'язаний з витратою теплоти на випаровування вприснутої рідини. Тому при випаровуванні рідини у дозвуковому потоці ($0,35 > M > 1,00$) параметри тиску та густини ростуть.

Основні параметри потоку які змінюються в наслідок термогазодинамічної компресії: P , T , v , w_n , w_w . Відношення цих параметрів друг відносно друга визначаються: законом збереження маси (рівняння безперервності) для газу (повітря) і води; законом руху Ньютона (теорема імпульсу); першого закону термодинаміки (рівняння енергії) для потоку рідини і газу; законами передачі теплоти, масопереносом і випаровуванням крапель; рівняннями стану суміші ідеальних газів (закон Гіббса-Дальтона); рівняннями законів термодинаміки газового потоку для визначення числа Маху, температури та тиску гальмування газового потоку.

Рівняння безперервності

$$dG_n = 0$$

$$- \frac{dG'_w}{G} = \frac{dG''_w}{dG} = \frac{dG}{G} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} + \frac{dF}{F} \quad (30)$$

Рівняння імпульсу

$$\frac{dP}{P} + kM^2 \left(\frac{dw}{w} + \frac{4\Sigma\xi}{2} \cdot \frac{dz}{D_{\kappa\delta}} + \frac{G_w}{G} \cdot \frac{dw_w}{w} + \left(1 - \frac{w_w}{w} \right) \frac{dG}{G} \right) = 0 \quad (31)$$

Закон зберігання енергії

$$\frac{dT}{T} - \frac{dq - \frac{G_w}{w} dI'_w}{C_p T} + \left(\frac{I''_w - I'_w + \frac{G^2}{2} \left(1 - \left(\frac{w_w}{w} \right)^2 \right)}{C_p T} \right) \frac{dG}{G} + (k-1)M^2 \left(\frac{dw}{w} + \frac{G_w}{G} \cdot \frac{w_w}{w} \cdot \frac{dw_w}{w} \right) = 0 \quad (32)$$

Поєднання наведених рівнянь дає змогу оцінити зміну параметрів робочих процесів в аеротермопресорі при впливах різних показників на локальній ділянці dz : зміна площі перерізу проточної частини аеротермопресора (dF/F); зміна маси краплі, що випаровується (dG'_w/G); сумарні втрати тиску на тертя о стінки проточної частини $\Delta P_{\text{тр}}(dz) = 4 \cdot \Sigma\xi \cdot dz / D_{\kappa\delta}$; зміни швидкості потоку і крапель рідини dw, dw_w .

Потік волого газу (повітря) може вести себе або по надзвуковій або дозвуковій характеристиці, що залежить від значення протитиску системи. Таким чином, може мати місце можливість переходу через швидкість звуку в каналі (камера випаровування) постійного перетину.

Математично перехід через швидкість звуку описується як:

$$\frac{dM^2}{dz} = \frac{G(z)}{1 - M^2} \quad (33)$$

де

$$G(z) = M^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \cdot \left(-2 \frac{d(\log F)}{dz} + \frac{1 + kM^2}{C_p T_0} \cdot \left[\frac{dq}{dz} - \frac{m_w}{m} \cdot \frac{dI'_w}{dz} \right] \right) \quad (34)$$

Відносне підвищення тиску в ідеальному аеротермопресорі, тобто без урахування сил тертя:

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} \right)^{\frac{kM^2}{2}\sigma} \quad (35)$$

Відносне підвищення тиску в дійсному аеротермопресорі:

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} \right)^{\frac{kM^2}{2}\sigma} - \frac{\left(\zeta_m + \zeta_{\text{тер}} \frac{L_{\kappa\delta}}{D_{\kappa\delta}} \right) \rho a_{\text{зв}}^2 M^2}{2P_{01}} \quad (36)$$

де $a_{\text{зв}}$ – швидкість звуку в двофазному середовищі; ζ_m – місцевий коефіцієнт гідравлічного опору; $\zeta_{\text{тер}}$ – гідравлічний коефіцієнт втрат на тертя в камері випаровування.

Результати моделювання робочих процесів в аеротермопресорі з малою витратою повітря ($G=1,5$ кг/с), що охолоджується між ступенями компресора ГТУ показали, що при швидкості в камері випаровування $M = 0,50-0,74$

підвищення тиску становить $\Delta P_{\text{атп}} = 3\text{--}12\%$ (10–37 кПа), $\Delta T_{\text{атп}} = 100\text{--}200\text{ К}$ (рис. 3), а кількість випаруваної води у повітряному потоці становить – $g_w = 3,8\text{--}6,6\%$. При цьому слід зауважити, що при початковому діаметрі краплі більше 20–30 мкм досягання позитивного ефекту від термогазодинамічної компресії можливо тільки при високих початкових температурах вище $T_{\text{атп1}} = 450\text{ К}$ (177°C), що при застосуванні стандартних гідравлічних форсунок можливо при охолодженні між ступенями компресорів ГТУ та за наддувним компресором ДВЗ, а також такі умови відповідають режимам в системах відхідних газів ГТУ та ДВЗ.

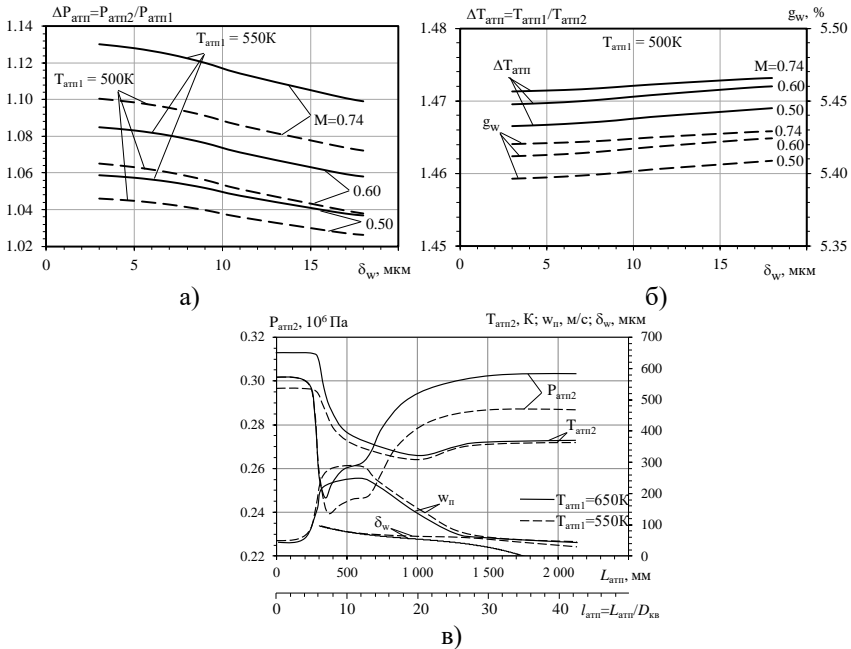


Рис. 3. Залежності відносного підвищення тиску в аеротермопресорі $\Delta P_{\text{атп}}$ при температурі на вході $T_{\text{атп1}} = 500; 550\text{ К}$ (а) і відносної температури $\Delta T_{\text{атп}}$ та кількості води, що упорскується g_w при $T_{\text{атп1}} = 500\text{ К}$ в залежності від діаметру краплі δ_w (б) та зміни тиску $P_{\text{атп2}}$, температури $T_{\text{атп2}}$, швидкості $w_{\text{п}}$ і діаметру краплі δ_w по довжині проточної частини аеротермопресора $L_{\text{атп}}(l_{\text{атп}})$ при $T_{\text{атп1}} = 550; 650\text{ К}$ (в)

На основі математичної моделі було розроблено методологію раціонального проектування систем утилізації вторинної теплоти енергетичних установок із застосуванням аеротермопресорних технологій, яка враховує: неповне випаровування крапель рідини, що упорскується; вплив дисперсності на характеристики аеротермопресорного апарату; розрахунок на локальних ділянках проточної частини аеротермопресора, що

у свою чергу, дозволяє визначити раціональні параметри реалізації робочих процесів: кількість та температура води, що упорскується; довжина ділянки випаровування; довжина дифузора; температура повітря (газу); діаметр характерних перетинів проточної частини; швидкість газу (повітря); швидкість води, що упорскується; діаметр крапель і загальна кількість води, що не випарилася, на виході з аеротермопресора.

В четвертому розділі наведені результати дослідження робочих процесів та їх впливу на основні показники та характеристики в аеротермопресорі.

Для проведення експериментального дослідження основних характеристик аеротермопресора було розроблено експериментальний стенд (рис. 4, 5). Експериментальний стенд призначено для моделювання роботи аеротермопресора в умовах експлуатації суднового середньообертового двигуна для охолодження наддувного повітря після турбокомпресора та проміжного охолодження в ГТД (у складі аеротермопресорного модуля, який складається з набору аеротермопресорних апаратів із загальною системою упорскування води).

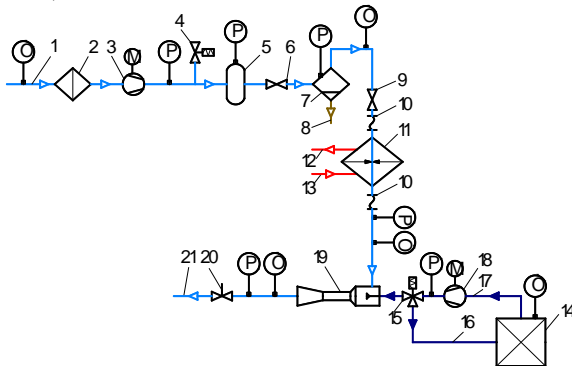


Рис. 4. Схема експериментального стенду:

- 1 – вхідний трубопровід; 2 – повітряний фільтр; 3 – гвинтовий компресор;
- 4 – запобіжний клапан; 5 – повітряний ресивер; 6, 9 – регулювальні клапани;
- 7 – трисекційний вологомасловідділювач; 8 – злив масла та вологи;
- 10 – температурний компенсатор; 11 – газовий повітрянагрівач; 12, 13 – підвід та відвід гарячого газу; 14 – цистерна запасу води; 15 – регулювальний клапан системи упорскування; 16 – оборотний трубопровід; 17 – трубопровід подачі води до системи упорскування; 18 – насос високого тиску; 19 – експериментальний аеротермопресор; 20 регулювальний клапан на виході; 21 – вихідний трубопровід; P – датчики тиску; T – датчики температури

В ході проведення експериментальних досліджень встановлено, що в аеротермопресорі середній діаметр крапель значно зменшується за рахунок високої турбулізації потоку та процесу інтенсивного випаровування в потоці із високою температурою (рис. 6). Мінімальний досяжний діаметр крапель

складає 15 мкм (зменшується в проточній частині аеротермопресора в середньому на 15–30 мкм) і при цьому збільшується доля дрібних крапель (менше 15–20 мкм) яка складає вище 40% (в порівнянні із базовими значеннями в 3–20%). До того ж розподіл крапель по діаметрам став більш рівний та відсутні крупні краплі із діаметром вище 60 мкм (рис. 7).

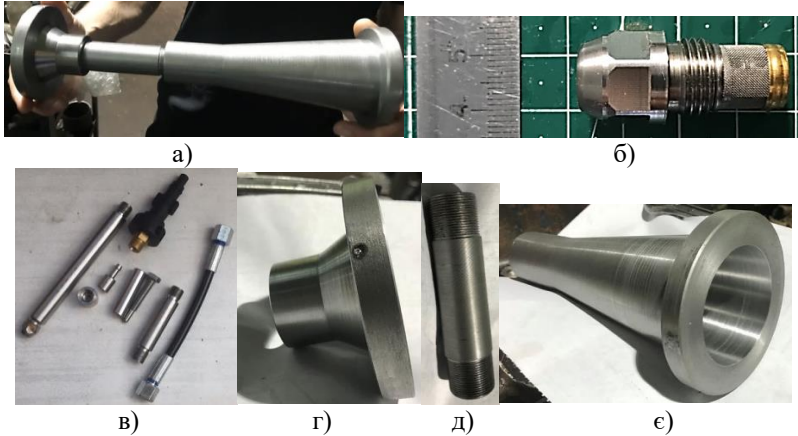


Рис. 5. Експериментальний аеротермопресор і його основні елементи: а) – аеротермопресор; б) – форсунка тонкого розпилю; в) – система упорскування; г) – конфузор; д) – камера випаровування; е) – дифузор

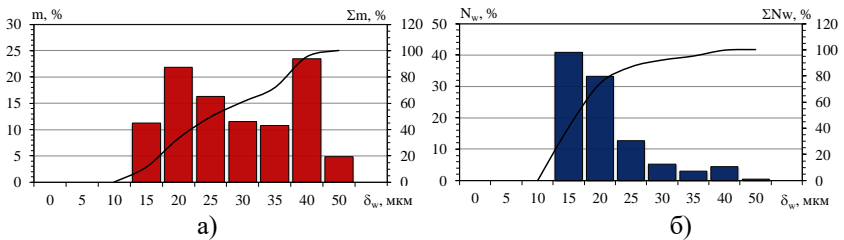


Рис. 6. Розподілення крапель по групах діаметрів (форсунка ФМТ-100,0; $G_w = 0,0407$ кг/с): а) – розподілення по відносній масовій частці m_w , %; б) – розподілення по відносній кількості N_w , %

Встановлено, що оптимальна відносна кількість води, що можна впорскувати для забезпечення неповного випаровування в проточній частині аеротермопресора при максимальному ефекті зниження втрат тиску, складає $g_w < 10$ %. Позитивний вплив упорскування води понад необхідну кількість для випаровування буде лише на ділянці $g_w = 4$ –10%, а подальше збільшення g_w призведе до зменшення $\varepsilon_{атп} = P_{атп2}/P_{атп1}$. При цьому збільшення відносної швидкості в камері випаровування зміщує граничне значення g_w в меншу сторону і може сягати $g_w = 6$ –8% (рис. 8).

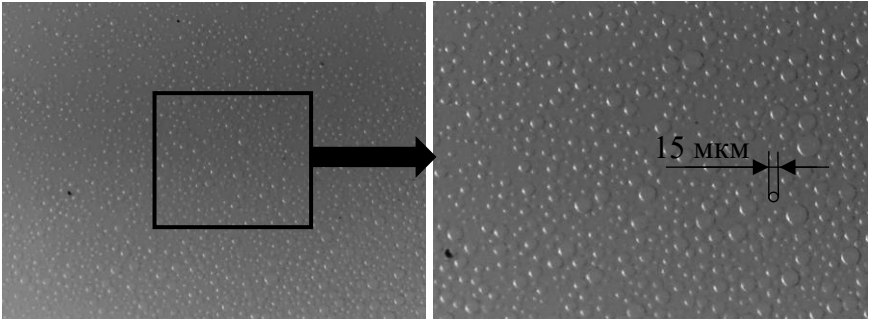


Рис. 7. Фото уловлених крапель (форсунка ФМТ-100,0; $G_w = 0,0407$ кг/с; збільшення вимірювальної системи мікроскопу 330X)

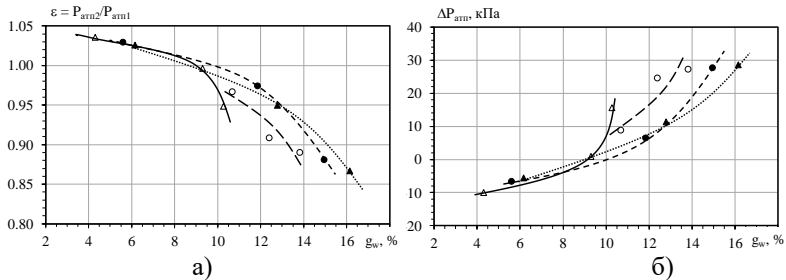


Рис. 8. Експериментальні залежності відносного підвищення тиску $\epsilon_{\text{атп}} = P_{\text{атп}2}/P_{\text{атп}1}$ (а) і абсолютних втрат тиску в проточній частині аеротермопресора $\Delta P_{\text{атп}} = P_{\text{атп}1} - P_{\text{атп}2}$ (б) від відносної кількості води, що упоркується в проточну частину аеротермопресора g_w : – $M = 0,38$ - - - - - $M = 0,52$; _____ – $M = 0,74$; - · - · - · - $M = 0,82$

Позитивне значення для $\epsilon_{\text{атп}}$ (рис. 9) цілком досягне для аеротермопресора із малою витратою повітря ($G_n = 0,52$ кг/с), хоча приріст повного тиску на виході буде не значний $\epsilon_{\text{атп}} = 1,01-1,03$ (1–3%), але при цьому можливо забезпечення ефективного дрібно-дисперсного розпилення рідини в потоці повітря із одночасним його охолодженням. Дрібно-дисперсний двофазний потік, отриманий таким чином в аеротермопресорі, може бути довиваровувано в ступені високого тиску компресора, що забезпечить наближення процесу стиснення до ізотермічного.

Максимальна, відповідна довірчому інтервалу Стьюдента, величина похибки визначення відносного підвищення тиску в аеротермопресорі при вимірюваннях під час експерименту не перевищує $\delta_{\text{атп}} = 4,0$ %. Перевірка математичної моделі на адекватність об'єкту дослідження проводилася із даними отриманими під час експерименту (рис. 10), а також отриманими в роботі Fowle A.A. Результати співставлення експериментальних даних із розрахунковими склали $\pm 15\%$, що підтверджує адекватність математичної моделі.

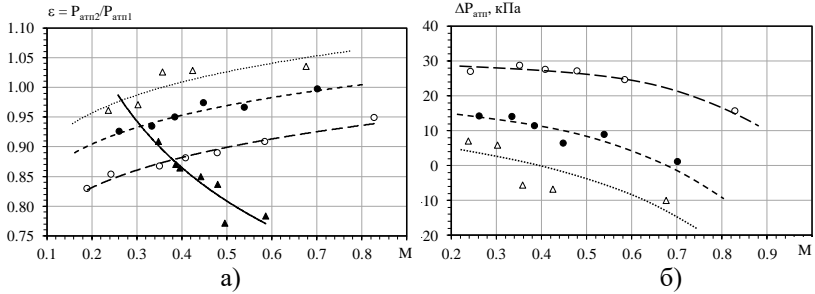


Рис. 9. Експериментальні залежності відносного підвищення тиску $\epsilon_{атп} = P_{атп2}/P_{атп1}$ (а) і абсолютних втрат тиску в проточній частині аеротермопресора $\Delta P_{атп} = P_{атп1} - P_{атп2}$ (б) від відносної швидкості в камері випаровування M (в числах Маха): – $G_w = 0,0175$ кг/с; ----- – $G_w = 0,0407$ кг/с; ----- – $G_w = 0,0487$ кг/с; ——— аеротермопресор без відводу теплоти

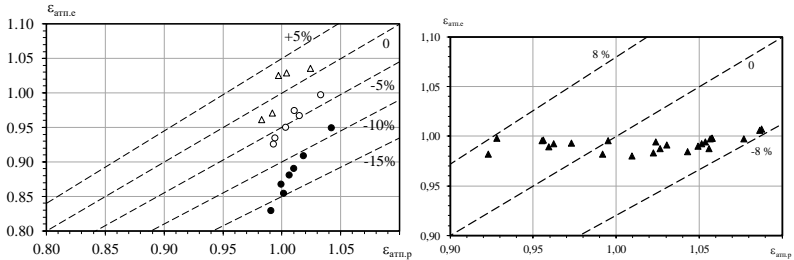


Рис. 10. Порівняння експериментальних даних (а – власний експеримент; б – експериментальні дані Fowle А.А.) відносного підвищення тиску в аеротермопресора $\epsilon_{атп,е}$ із розрахунковими $\epsilon_{атп,р}$: а) – при різних витратах води G_w , що упорскується: Δ – $0,0175$ кг/с; \circ – $0,0407$ кг/с; \bullet – $0,0487$ кг/с; б) – $T_{атп1} = 700-920$ К; $M = 0,45; 0,70$

У п'ятому розділі розглянуто особливості використання аеротермопресорних технології для транспортних та стаціонарних установок на базі ДВЗ.

Аналіз результатів дослідження показує, що застосування охолодження наддувного повітря за допомогою аеротермопресора дозволяє підвищити паливно-енергетичну ефективність суднового ДВЗ в широкому діапазоні зміни параметрів робочих процесів. Це може бути досягнуто за рахунок ефективного охолодження наддувного повітря перед ресивером двигуна і зменшенням роботи на стиснення в турбокомпресорі (ТК) (рис. 11).

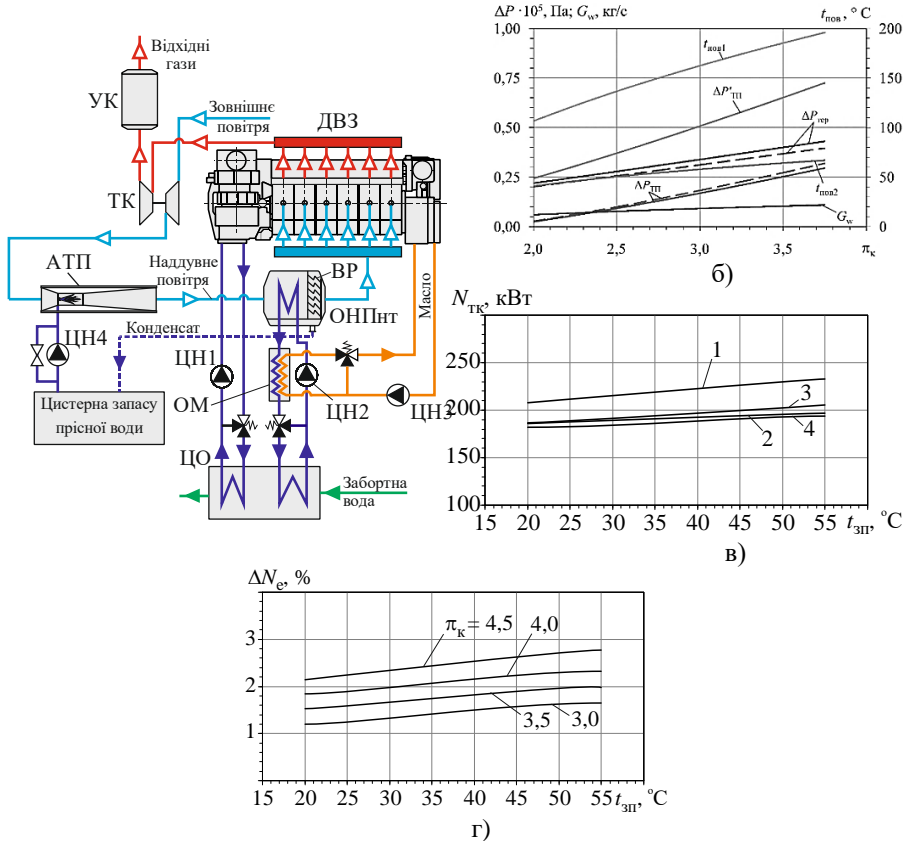


Рис. 11. Система охолодження наддувального повітря головного суднового середньообертового двигуна із застосуванням аеротермопресора та її характеристики: а) – схема: АТП – аеротермопресор; УК – утилізаційний котел; ТК – турбокомпресор; ОНПнт – низькотемпературна ступінь охолоджувача наддувального повітря; ВР – відділювач рідини; ОМ – охолоджувач масла; ЦО – центральний охолоджувач; ЦН – циркуляційні насоси; б) – залежності зміни тиску ΔP повітря, втрат тиску повітря через тертя $\Delta P_{\text{тер}}$, температури повітря $t_{\text{пов}}$, витрати води на впорскування G_w від ступеня підвищення тиску в турбокомпресорі π_k ($M = 0,95$; _____ – $t_w = 25^\circ\text{C}$; ___ – $t_w = 120^\circ\text{C}$); в) – залежності потужності ТК $N_{\text{ТК}}$ ($\pi_k = 3,0$) в залежності від температури повітря на всмоктуванні для різних схем $t_{\text{пр}}$: 1 – одноступінчасте стиснення і охолодження в ОНП; 2 – двоступінчасте стиснення з проміжним охолодженням і охолодження в ОНП; 3 – одноступінчасте стиснення і охолодження в аеротермопресорі; 4 – двоступінчасте стиснення з проміжним охолодженням в аеротермопресорі; г) – залежності зміни потужності ДВЗ ΔN_e

Аналіз застосування аеротермопресора у системі охолодження наддувного повітря двигуна Wartsila 8L20 ($N_e = 1360$ кВт, $n = 1000$ хв⁻¹) показав можливість підвищення тиску повітря на 5–10% (рис. 11, б), що дає можливість скоротити потужність, яку споживають ТК, N_{TK} для одноступінчастої системи наддуву на 7–12 %, а для двоступінчастої – на 1,0–3,5 % (рис. 11, в), за рахунок чого в свою чергу підвищити потужність двигуна на 1,0–2,5 % (рис. 11, г) в залежності від температури зовнішнього повітря t_{zn} і степені підвищення тиску π_k . З підвищенням температури зовнішнього повітря t_{zn} на вході ТК ефект від застосування аеротермопресорного охолодження наддувного повітря зростає: збільшується величина скорочення потужності ТК із відповідним зростанням потужності двигуна і зменшенням питомої витрати палива на 2–3 г/(кВт·год) (1,0–2,0%).

Малооборотів ДВЗ застосовуються в енергетичних установках, як правило, разом із системами комплексної утилізації теплоти при використанні теплоти відхідних газів в утилізаційних котлах одного або двох тисків і утилізаційним турбогенератором (турбокомпаунді системи) (рис. 12). Аналіз застосування аеротермопресора для охолодження наддувного повітря ДВЗ потужністю $N_e = 8300$ кВт (MAN B&W 5S50MC-C) показав, що зниження температури повітря в становить $\Delta t_{атт} = 110–160$ °С, що дає змогу підвищити тиск повітря після ТК на $\Delta P_{тп} = 340–480$ кПа (10–13%) (рис. 12, б). Аеротермопресор по суті є другою ступінню стиснення в системі наддуву. Оскільки необхідний для ТК Δ_k' зменшується, то відповідно зменшиться робота ТК на стиснення Δ_k . Зменшення I_k дозволяє, при таких же витратах повітря на ДВЗ, зменшити потужність компресора (рис. 12, в) на $\Delta N_k = 100–200$ кВт (10,0–11,5 %). Слід зауважити, що при цьому буде зростати температура відхідних газів перед утилізаційним котлом ($\Delta t_{ук} = 10–15$ °С), і, як наслідок, збільшується навантаження на утилізаційний турбогенератор із відповідним скороченням витрати палива дизель-генераторами електростанції на 2–3 % (рис. 12, г).

Перспективним є застосування аеротермопресорних технологій, які можуть забезпечити охолодження і одночасне підвищення тиску газового потоку в схемно-конструктивних рішеннях із нейтралізації шкідливих речовин у відхідних газах, тобто зменшити протитиск в системі газовихлопу та, як наслідок, нівелювати негативний вплив зменшення максимальної температури в циклі ДВЗ. Аналіз ефективності застосування аеротермопресора в схемі з рециркуляцією відхідних газів для суднового малооборотного двотактного двигуна MAN B&W марки 6G70ME-C9.5 ($N_e = 21840$ кВт, $n_e = 83$ хв⁻¹) показав, що при встановленні аеротермопресора перед скрубером це дозволяє зменшити його теплове навантаження. Підвищення тиску в аеротермопресорі на $0,05–0,40 \cdot 10^5$ Па (2–12%) дозволяє зменшити протитиск в системі газовихлопу, а відтак, і зменшити навантаження на вентилятор системи рециркуляції відхідних газів, причому в холодній зоні при навантаженні на двигун вище 75 % застосування вентилятора не потрібно. Запропоноване схемно-конструктивне рішення

дозволяє при високій екологічності застосування існуючої системи рециркуляції відхідних газів забезпечити також і певне зменшення питомої витрати палива на $\Delta g_e = 2,5\text{--}3,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ (1,5–1,7 %) (рис. 13) за рахунок зменшення енергетичних затрат.

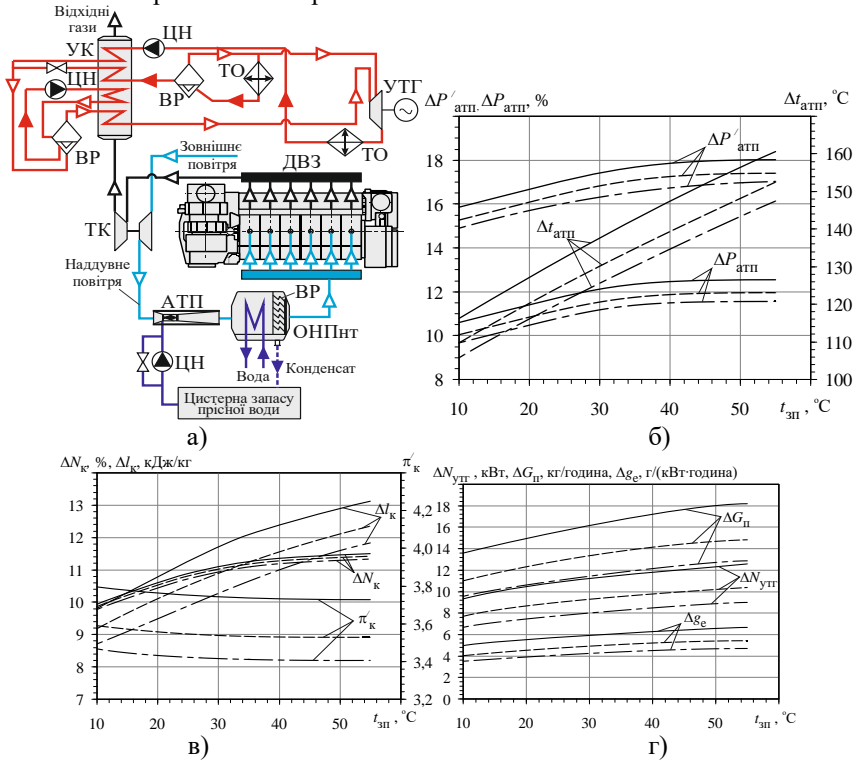


Рис. 12. Система охолодження наддувального повітря ДВЗ аеротермопресором при використанні комплексної утилізації теплоти та її характеристики:

- а) – схема; б) – зменшення температури повітря в аеротермопресорі $\Delta t_{атп}$, відносно підвищення тиску повітря без урахування втрат тиску $\Delta P'_{атп}$, із врахуванням $-\Delta P_{атп}$; в) – залежності зменшення роботи на стиснення в ТК ΔN_k , зменшення потужності ТК ΔN_k , ступінь підвищення тиску π_k ;
г) – залежності збільшення потужності утилізаційного турбогенератора $\Delta N_{утг}$, скорочення годинної ΔG_n та питомої Δg_e витрати палива електростанцією в залежності від температури повітря на всмоктуванні $t_{зп}$: _____ – $\pi_k = 4,25$; - - - - - – $\pi_k = 4,00$; _____ – $\pi_k = 3,85$

Шостий розділ присвячено застосуванню аеротермопресорних технологій в енергетичних установках на базі ГТД. Одним з напрямків застосування аеротермопресора в ГТУ є використання енергії продуктів згоряння шляхом їх перерозширення нижче атмосферного тиску в додатковій

турбіні перерозширення, яка встановлюється після основної турбіни (рис. 14) з наступним підвищенням тиску в аеротермопресорі на 5–10% при охолодженні газу на $\Delta t_{\text{пер}} = 120\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 15) забезпечує додатковий приріст потужності ГТУ з контуром перерозширення на $\Delta N_{e,\text{атп}} = 8\text{--}12\%$. Збиткова кількість води, що упрскується для забезпечення режиму неповного випаровування, складає $\Delta g_w = 4\text{--}10\%$.

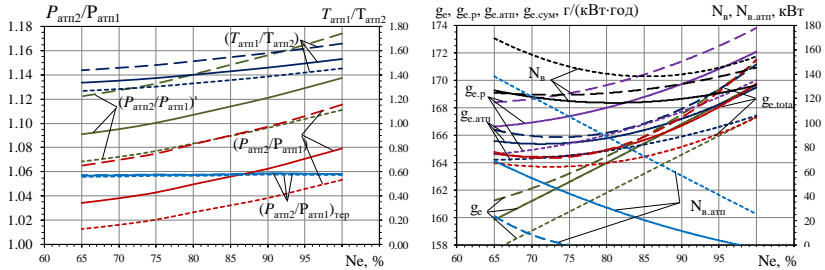


Рис. 13. Залежності відносного підвищення тиску в АТП без врахування тертя ($P_{\text{атп}2}/P_{\text{атп}1}'$), з урахування тертя ($P_{\text{атп}2}/P_{\text{атп}1}$), відносних втрат на тертя $(P_{\text{атп}2}/P_{\text{атп}1})_{\text{тер}}$, відносного зниження температури газу ($T_{\text{атп}1}/T_{\text{атп}2}$) (а) та зміни питомої витрати палива без рециркуляції $g_{e,\text{р}}$ з рециркуляцією $g_{e,\text{р}}$, з рециркуляцією і аеротермопресором $g_{e,\text{атп}}$, з рециркуляцією, з урахуванням зменшення навантаження на вентилятор $g_{e,\text{total}}$, потужності вентилятора системи рециркуляції з аеротермопресором $N_{e,\text{атп}}$ та без нього N_e (б) від навантаження на двигун N_e : _____ – умови ISO ($t_{\text{пов}1} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{w1} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$); — — — — — тропічні умови ($t_{\text{пов}1} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{w1} = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$); - - - - - холодна зона ($t_{\text{пов}1} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{w1} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

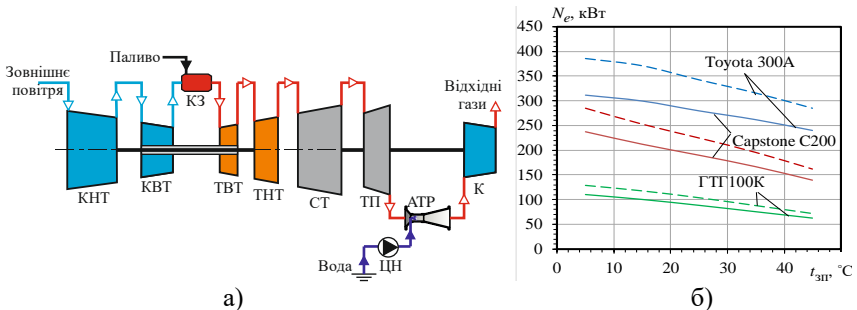


Рис. 14. ГТУ з турбіною перерозширення і аеротермопресором: а) – схема; залежності потужності N_e ГТУ різних фірм-виробників від температури повітря на вході $t_{\text{зп}}$ для різних типів ГТУ: КНТ – компресор низького тиску; АТР – аеротермопресор; КВТ – компресор високого тиску КЗ – камера згоряння; ТВТ – турбіна високого тиску; ТНТ – турбіна низького тиску; СТ – силова турбіна; ТП – турбіна перерозширення; ЦН – циркуляційний насос; К – компресор контуру перерозширення; _____ – без аеротермопресора; — — — — — з аеротермопресором

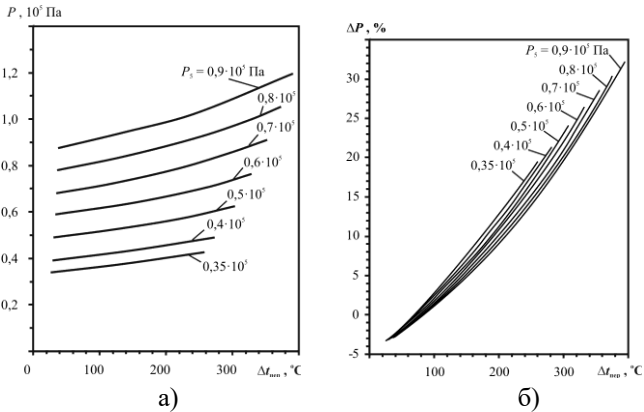


Рис. 15. Залежність тиску на виході з аеротермопресора P (а) і відносного підвищення тиску ΔP (б) в аеротермопресорі від перегріву $\Delta t_{\text{пер}}$ при різних тисках P_5 після турбіни перерозширення (на вході в аеротермопресор) і температури газів перед турбіною перерозширення $t_4 = 450$ $^{\circ}\text{C}$

Застосування аеротермопресора дозволяє поєднати в одному апараті відразу кілька функцій: стиснення (компресор) і охолодження (охолоджувач газу), що в свою чергу, дає можливість застосувати перерозширення газу в ГТУ на спеціалізованих судах на повітряній подушці, де установка додаткового обладнання вельми проблематична через обмежений обсяг машинного відділення.

Вельми перспективним є застосування аеротермопресорних технологій для проміжного охолодження циклового повітря ГТД. Встановлення проміжного охолоджувача повітря (аеротермопресора) в ГТД можливо між ступенями високого та низького тиску компресора за двох або трьохступінчастої схемою (рис. 16). Це дозволяє забезпечити ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини менше 15 μm і, як наслідок, більш ефективне ізотерування процесу в компресорі високого тиску; компенсувати аеродинамічні втрати по повітряному тракту і зменшити роботу на стиснення в ступенях компресора за рахунок підвищення тиску в аеротермопресорі на 5–10 % (рис. 17, а), збільшити витрату робочого тіла на 5–10 %, і, як наслідок, підвищити ККД з відповідним зменшенням питомої витрати палива на 1,5–2,0 % в порівнянні із іншими способами проміжного охолодження (рис. 17, б).

Сьомий розділ присвячений оцінці ефективності застосування аеротермопресорних технологій в контурах тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин (ЕХМ). Застосування аеротермопресора в циклі ЕХМ, при встановленні на виході з ежектора (рис. 18), дозволяє за рахунок підвищення тиску при контактному охолодженні пари до температури насичення підвищити коефіцієнт ежекції U і відповідно тепловий коефіцієнт ЕХМ ζ .

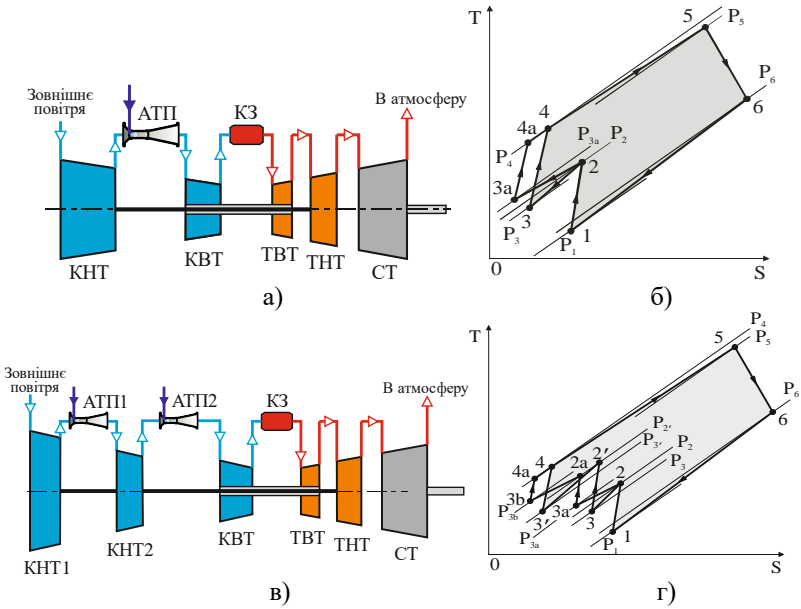


Рис. 16. Схеми та цикли ГТУ з проміжним охолодженням повітря в аеротермопресорі: а), б) – двоступінчасте стиснення; в), г) – тріступінчасте стиснення; 1-2-3-2'-3'-4-5-6 – цикл без аеротермопресора; 1-2-3a-2a-3b-4a-5-6 – цикл з аеротермопресором

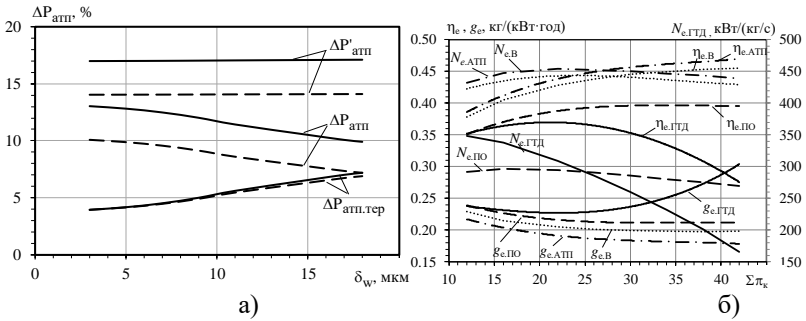


Рис. 17. Застосування аеротермопресора для проміжного охолодження в ГТУ: а) – залежності відносного підвищення тиску в аеротермопресорі $\Delta P_{атп}$, підвищення тиску без врахування втрат на тертя $\Delta P'_{атп}$, втрати тиску на тертя $\Delta P_{атп.тер}$ від діаметру краплі на виході з аеротермопресора δ_w ; б) – залежності ККД ГТУ η_e , відносної витрати палива g_e і питомої потужності N_e від загального ступеня підвищення тиску компресора $\Sigma \pi_k$: _____ – $T_{атп1} = 450K$; - - - - $T_{атп1} = 550K$; ГТД – без проміжного охолодження; ПО – з проміжним охолодженням в поверхневому повітроохолоджувачі; В – з проміжним охолодженням упорскуванням води форсунками; АТП – з проміжним охолодженням в аеротермопресорі

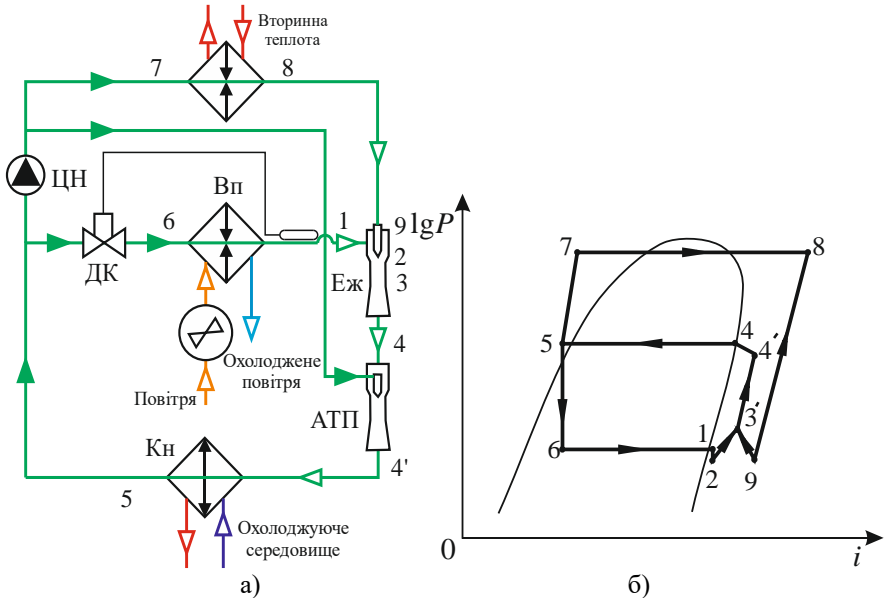


Рис. 18. Схема та цикл ЕХМ з аеротермопресором після ежектора: Гн – генератор пари; Еж – ежектор; ТП – аеротермопресор; Кн – конденсатор; Вп – випарник; ДК – дросельний клапан; ЦН – циркуляційний насос

Аналіз ефективності ЕХМ при застосуванні аеротермопресора показує, що найбільша ефективність, при максимально можливих температурах кипіння в генераторі t_r , відповідає холодоагентам: R142b – $\Delta\zeta = 0.74\%$; R600 – $\Delta\zeta = 0.89\%$; R1233zd(E) – $\Delta\zeta = 0.87\%$; R245fa – $\Delta\zeta = 0.83\%$. Збільшити ефективність ЕХМ можливо при забезпеченні більшої різниці температур. Так, при різниці температур $\Delta T_{атп} = 60\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ відносно підвищення тиску в основному позитивне. Найбільше значення мають: R717 (аміак), R134a, R227ea, R1234ze(E), R1234yf – $(P_{атп2}/P_{атп1}) = 1.02\text{--}1.04$ (2–4%) (рис. 19). Забезпечити більший тепловий коефіцієнт для ЕХМ можливо при застосуванні термопресора в схемі з використанням циркуляції рідкого холодоагенту за допомогою струминного насосу (інжектора) та регенеративного теплообмінника (РТО) за випарником. Таке рішення дозволить знизити температуру кипіння у випарнику. При цьому, як наслідок, збільшиться температура перегрітої пари перед конденсатором. При перегріві пари після РТО $\Delta t_{пер} = 100\text{--}140\text{ }^\circ\text{C}$ підвищення теплового коефіцієнта ЕХМ на додаток до ефекту від регенерації складе $\Delta\zeta = 4\text{--}8\%$, із відповідною часткою рідини, що упорскується $g_f = 5\text{--}25\%$, при цьому сумарне підвищення теплового коефіцієнту складає $\Delta\zeta = 10\text{--}15\%$ ($\zeta = 0.03\text{--}0.05$) при базовому значенні $\zeta = 0.30\text{--}0.40$.

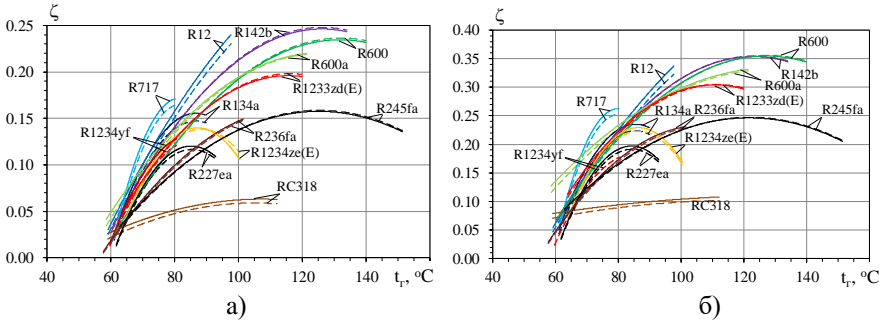


Рис. 19. Залежності зміни теплового коефіцієнта ЕХМ ζ від температури кипіння в генераторі пари ЕХМ t_g для різних холодоагентів при температурі кипіння у випарнику $t_0 = 5^\circ\text{C}$ (а) і $t_0 = 10^\circ\text{C}$ (б)

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано методологічний підхід і принципи використання вторинної теплоти енергоустановок шляхом застосування аеротермопресорних технологій для охолодження повітря, як складової робочого тіла, і глибокої утилізації енергії продуктів згорання, виходячи з яких розроблена концепція підвищення економічності енергетичних установок в технологіях використання вторинної теплоти із застосуванням аеротермопресорних технологій 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 на 5–10 %.

2. *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 організувати робочі процеси, зокрема з неповним випаровуванням упорскуваної рідини, забезпечує максимальне підвищення тиску та високу дисперсність, безпечну для експлуатації двигунів. Математична модель дозволяє враховувати зміну та залежності основних характеристик аеротермопресора від характеру розпилювання рідини (дисперсність та швидкість крапель, частка рідини відносно масової втрати газу (повітря)).

3. *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 та раціональні характеристики аеротермопресорних систем утилізації й охолодження, що забезпечують максимальні значення ККД.

4. Розроблено аеротермопресор, в якому реалізується ефект термогазодинамічної компресії, для системи охолодження повітря як складової робочого тіла енергетичної установки та експериментальну установку для дослідження його характеристик і визначення оптимальних параметрів роботи, а також розроблено методику та проведено експериментальне дослідження характеристик аеротермопресора для системи охолодження повітря енергетичної установки.

5. **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 ізотерування 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.

6. **Вперше** запропоновано принцип використання аеротермопресорних технологій для охолодження повітря як складової робочого тіла ГТУ, що забезпечує ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини з середнім діаметром краплі менше 15 мкм і, як наслідок, більш ефективне ізотерування процесу в компресорі, дозволяє компенсувати гідравлічні втрати тиску по повітряному тракту 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 %.

7. Обґрунтовано доцільність застосування аеротермопресора як багатофункціонального контактного теплообмінного апарату (підвищення повного тиску, охолодження), дрібно-дисперсний розпил крапель рідини, екологічне зволоження) в технологіях використання вторинної теплоти і отримала подальший розвиток теорія аеротермопресії (термогазодинамічної компресії), зокрема у процесах охолодження стисненого повітря енергетичних установок та глибокої утилізації енергії продуктів згоряння.

8. 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 %.

9. *Вперше* запропоновано принцип підвищення ефективності екологічної рециркуляції продуктів згоряння ДВЗ шляхом охолодження рециркуляційних газів аеротермопресорами, що дозволяє зменшити навантаження системи рециркуляції газів; зменшити або повністю компенсувати гідравлічні втрати, відповідно і навантаження на вентилятор (або електрокомпресор) 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 %.

10. *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 $\zeta = 0,30–0,40$. При цьому найбільшу ефективність мають холодоагенти: R142b; R600; R1233zd(E); R245fa. Схемно-конструктивні рішення захищені патентами України на винаходи №84550, 89558, 89559, 90747, 89557, 90015.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

w – швидкість потоку, м/с; T – температура, К; P – тиск, Па; M – число Маха; δ – діаметр краплі, мкм; G – масова витрата потоку, кг/с; V – об'єм, м³; S – площа поверхні краплі, м²; μ – динамічна в'язкість; m – маса, кг; Re – число Рейнольдса; R – радіус краплі; Sh – число Шервуда; Nu – число Нусельта; Pg – число Прандтля; c – теплоємність, кДж/(К·кг); ρ – густина, кг/м³; τ – час випаровування, с; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); J – швидкість випаровування, кг/с; $Df_{\text{п}}$ – масовий коефіцієнт дифузії; L – довжина, м; l – відносна довжина; ξ – коефіцієнт вологовипадіння; g – відносна кількість рідини; σ – критеріальна характеристика аеротермопресора; F – площа перерізу проточної частини аеротермопресора, м²; ΔT – зміна температури, К; T_1/T_2 – відносна температура; P_2/P_1 – відносне підвищення тиску; ΔP – абсолютне підвищення тиску, Па; q – питома кількість теплоти, кВт/кг; Q – кількість теплоти, що підводиться (відводиться), кВт; I – ентальпія, кДж/кг; $a_{\text{зв}}$ – швидкість звуку в двофазному середовищі; ξ_w – коефіцієнт гідравлічного опору краплі; ζ – коефіцієнт гідравлічного опору; $\Sigma\xi$ – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору; dz – елементарна ділянка проточної частини аеротермопресора, м; ε – ступінь підвищення тиску в аеротермопресорі; $d_{\text{вл}}$ – вологовміст, г/кг; η_e – коефіцієнт корисної дії; g_e – питома витрата палива, г/(кВт·год); \bar{N} – питома потужність, кВт/(кг/с); N – потужність, кВт; n – частота обертання; Δl – зміна питомої роботи стиснення, кДж/кг; ζ – тепловий

коефіцієнт; ' – рідина; " – пара; п – повітря; w – вода; атп – аеротермопресор; пр – приймальна камера; кв – камера випаровування; д – дифузор; к – конфузор; 1, 2 – параметр на вході та виході; 0 – умови заторможеного потоку; м – місцевий; тер – тертя; е – експеримент; р – розрахунок; тк – турбокомпресор; зп – зовнішнє повітря; к – компресор; ф – холодоагент.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Konovalov, D., Radchenko, M., Kobalava, H., Andreev, A., Maksymov, V.: Improvement of Ejector Refrigeration Machine Cycles by Using Thermopressor. In: M. Kruzel, W. Kuczyski (eds.) Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin, Koszalin, 2019. Pp. 301-326. *(Розділ в колективній зарубіжній монографії. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, розробка методики розрахунку та програмного продукту для його реалізації, аналіз ефективності при застосуванні різних холодоагентів).*

2. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, R., Andreev, A., Pyrysunko, M., Dzhurynska, A.: Research of the aerothermopressor cooling system of cyclic air of marine internal combustion engine under variable climatic conditions of operation. In: M. Kruzel, W. Kuczyski (eds.) Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin. Koszalin, 2019. Pp. 327-344. *(Розділ в колективній зарубіжній монографії. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, розробка методики та аналіз розрахунку, формулювання висновків).*

3. Билека Б.Д., Радченко М.І., Сирота О.А., Коновалов Д.В. Тригенерационные технологии охлаждения циклового воздуха судовых ГТД // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: ХПИ, 2007. – № 2. – С. 105–111. *(Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз схемних рішень, формулювання висновків).*

4. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Сирота О.А., Хорбай П., Комплексна утилізація теплоти вторинної пари випарних апаратів технологічних установок // Техногенна безпека: наукові праці. – Миколаїв: МДГУ ім. П. Могили, 2007. – Т. 61. – Вип. 48. – С. 26–29. *(Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз ефективності використання вторинної теплоти).*

5. Коновалов Д.В., Радченко Н.И. Утилизация сбросной теплоты судовых энергоустановок с генерированием холода и использованием эффекта термопрессии // Авиационно-космическая техника и технология.– 2008. – № 7(54). – С. 163–167. *(Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз схемних рішень при використанні аеротермопресора, формулювання висновків).*

6. Радченко Н.И., Коновалов Д.В. Холодильные теплоиспользующие циклы с применением эффекта тепловой компрессии // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2008. – № 8(55). – С. 111–115. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка та аналіз схем і циклів тепловикористовуючих холодильних машин із застосуванням аеротермопресора*).

7. Радченко Н.И., Коновалов Д.В. Целесообразность трансформации холодильного парокомпрессионного цикла в теплоиспользующий на основе газодинамического эффекта // *Вестник двигателестроения.* – 2008. – № 3. – С. 22–25. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: аналіз ефективності циклу ежекторно-термопресорної холодильної машини, формулювання висновків*).

8. Радченко Р.Н., Сирота А.А., Коновалов Д.В., Радченко Н.И., Теплоиспользующие системы охлаждения циклового воздуха судовых ДВС на базе эжекторной и абсорбционной холодильных машин // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2008. – № 10(57). – С. 123–127. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розрахунок циклу та характеристик ежекторної холодильної машини*).

9. Коновалов Д.В. Оценка эффективности применения эффекта термопресии в теплоиспользующих холодильных машинах // *Зб. наук. пр. НУК.* – Миколаїв: НУК, 2009. – № 1 (424). – С.136-140. (*Наукове фахове видання України*).

10. Радченко Н.И., Стахель А.А., Сирота А.А., Коновалов Д.В. Направления утилизации тепла в судовых дизельных установках и их реализация с применением холода // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 4 (61). – С. 62–65. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: аналіз ефективності застосування струминних апаратів в тепловикористовуючих системах*).

11. Коновалов Д.В., Радченко А.Н. Газотурбинный двигатель простого цикла с турбиной перерасширения и термопресором // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 10 (67). – С. 98–101. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку та аналіз термодинамічного циклу, формулювання висновків*).

12. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Воробйов Л.М., Підвищення ефективності газового двигуна внутрішнього згоряння турбодетандерним охолодженням газоповітряної суміші // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2010. – № 10(77). – С. 62-65. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розрахунок характеристик теплового двигуна в спеціалізованому програмному комплексі, формулювання висновків*).

13. Сирота О.А., Андреев А.А., Радченко М.І., Коновалов Д.В., Радченко Р.М. Методология рационального проектирования теплоиспользующих систем охлаждения воздуха судовых двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков: ХАИ, 2007. –

Вып. 7(43). – С. 29–35. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз застосування тепловикористовуючих систем на основі струминних технологій*).

14. Коновалов Д.В. Применение эффекта термогазодинамической компрессии в теплоиспользующих системах охлаждения // Обладнання та технології харчових виробництв: 36. наук. праць ДонНУЕТ. – Донецьк: ДонНУЕТ. – 2010. – Вип. 24. – С. 227–233. (*Наукове фахове видання України*).

15. Коновалов Д.В. Застосування термогазодинамічного ефекту для проміжного охолодження в системах наддувного повітря ДВЗ // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 8 (85). – С. 136–140. (*Наукове фахове видання України*).

16. Радченко А.Н., Коновалов Д.В. Энергоресурсосберегающая теплоиспользующая установка кондиционирования воздуха на входе ДВС транспортного судна // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5 (82). – С. 61–67. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: аналіз результатів розрахунку тепловикористовуючої холодильної машини, формулювання висновків*).

17. Андреев А.А., Коновалов Д.В., Радченко М.І. Основні положення математичної моделі теплообмінників тепловикористовуючої системи охолодження наддувного повітря судових малооборотних дизелів // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 39, т. 1. – С. 68–73. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка структурної схеми та алгоритму математичної моделі, розробка програмного комплексу для розрахунку*).

18. Коновалов Д.В. Термопресорні системи охолодження судових ДВЗ // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 44–48. (*Наукове фахове видання України*).

19. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Методологічний підхід до охолодження наддувного повітря середньооборотного двигуна // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 6 (93). – С. 73–78. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології застосування аеротермопресорного охолодження, формулювання висновків*).

20. Радченко Н.І., Сирота А.А., Радченко Р.Н., Коновалов Д.В. Потенціал охолодження наддувочного воздуха малооборотного дизеля транспортного судна // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8(105). – С. 67–71. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: аналіз ефективності застосування струминних технологій, розрахунок характеристик двигуна*).

21. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Бойко О.В., Пекун О.О. Суднова газотурбінна установка з термопресорним підвищенням тиску в контурі перерозширення // Науково-виробничий «Харчова наука і технологія». – Одеса: ОНАПТ. – 2013. – №4 (25). – С. 129-132. (*Наукове фахове видання*

України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка схематехнічного рішення, аналіз результатів розрахунку, формулювання висновків).

22. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Бойко О.В. Перспективи применения термопресорного охолодження в судових газотурбинних установках малої потужності // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв: НУК, 2013. – № 5-6. – С. 29-34. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: аналіз ефективності схемних рішень із аеротермопресорного охолодження для ГТУ).

23. Коновалов Д.В., Радченко М.І., Бойко О.В., Пекун О.О. Суднова газотурбінна установка з термопресорним підвищенням тиску в контурі перерозширення // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: 2014. – Вип.45 – Том 1. – С. 77-81. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку, аналіз ефективності тепловикористовуючого контуру з аеротермопресором).

24. Коновалов Д.В. Тепловикористовуючі холодильні машини на основі термогазодинамічного ефекту // Техногенна безпека: наукові праці. – Миколаїв: МДГУ ім. П. Могили, 2009. – Т. 111. – Вип. 98. – С. 63–67. (Наукове фахове видання України).

25. Радченко Р.М., Андреев А.А., Коновалов Д.В., Бохдаль Л. Альтернативні системи охолодження наддувного повітря судового малообертового дизеля // Радіоелектронні комп'ютерні системи. – 2014. – № 3 (67). – С. 59–63. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку для систем охолодження на основі струминних технологій).

26. Коновалов Д.В., Джурина А.А. Термопресорное охлаждение наддувочного воздуха судового ДВС // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 5 (461). – С. 75-80. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз результатів теоретичних досліджень схемних рішень, формулювання висновків).

27. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О., Стародубець С.І. Система охолодження наддувного повітря судового ДВЗ термопресором з упорскуванням перегрітої води // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 3(138). – С. 104–111. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку із врахуванням перегрітої води на упорскуванні, аналіз результатів розрахунку, формулювання висновків).

28. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О., Радченко М.І. Аналіз ефективності проміжного охолодження повітря газотурбінних установок упорскуванням води аеротермопресором // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 4(139). – С. 106–111. (Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка способу охолодження аеротермопресором, розробка програмного комплексу та аналіз отриманих результатів).

29. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Проміжне охолодження циклового повітря в газотурбінних установках аеротермопресорами // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2018. – № 1 (145). – С. 29–36. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, аналіз результатів порівняння способів проміжного охолодження*).

30. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Застосування контактного охолодження повітря аеротермопресором в циклі ГТУ // *Холодильна техніка та технології*. – 2018. – № 5 (54). – С. 30–37. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розрахунок ефективності застосування аеротермопресора, формулювання висновків*).

31. Русанов С.А., Луняка К.В., Коновалов Д.В. Модель віброкиплячого шару сипких середовищ та її програмна реалізація // *Холодильна техніка та технології*. – 2018. – № 6 (55). – С. 28–35. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, формулювання висновків*).

32. Radchenko R., Konovalov D., Pyrysunko M., Radchenko M. Using the heat of recirculation gases of the ship main engine by an ejector refrigeration machine for intake air cooling // *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2019. – № 1 (55). – С. 4–9. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку, аналіз схемо-технічного рішення*).

33. Konovalov D., Kobalava H. Numerical simulation of the regime and geometric characteristics influence on the pressure loss of a low-flow athermopressor // *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2019. – № 2 (55). – С. 66–76. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, формулювання висновків*).

34. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Чисельне моделювання проточної частини маловитратного аеротермопресора для проміжного охолодження циклового повітря газотурбінного двигуна // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 4 (156). – С. 31–38. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз результатів розрахунку циклів ГТУ*).

35. Коновалов Д.В. Застосування газодинамічного охолодження в системах рециркуляції відхідних газів суднових дизелів // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 7 (159). – С. 81–86. (*Наукове фахове видання України*).

36. Коновалов Д.В. Аналіз ефективності тепловикористовуючої термопресорно-ежекторної холодильної машини // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 8 (160). – С. 59–67. (*Наукове фахове видання України*).

37. Konovalov D., Radchenko M.I., Maksymov V.I. The recirculate exhaust gases cooling method of the marine low-speed engine by the athermopressor // *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2019. – № 3 (56). – С. 1–7.

(Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку, аналіз схемо-технічного рішення, формулювання висновків).

38. Konovalov D., Kobalava H. Efficiency Analysis of Gas Turbine Plant Cycles with Water Injection by the Aerothermopressor // In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020 – С. 581–591. (н.м.б. Scopus. Внесок здобувача: розробка схемо-технічних рішень, розрахунок та аналіз ефективності циклів).

39. Konovalov D., Kobalava H., Maksymov V., Radchenko R., Avdeev M. (2020) Experimental Research of the Excessive Water Injection Effect on Resistances in the Flow Part of a Low-Flow Aerothermopressor. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., 2020. – Pp. 292–301. (н.м.б. Scopus. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, аналіз експериментальних даних, формулювання висновків).

40. Konovalov D., Trushliakov E., Radchenko M., Kobalava H., Maksymov V. (2020) Research of the Aerothermopressor Cooling System of Charge Air of a Marine Internal Combustion Engine Under Variable Climatic Conditions of Operation. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., 2020. – Pp. 520–529. (н.м.б. Scopus. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики та аналіз розрахунку із врахуванням змінних кліматичних умов).

41. Патент України на винахід № 79313. Випарний апарат. – Бюлетень № 5. – 2007 / Радченко М.І., Радченко Р.М., Андреев А.А., Сирота О.А., Коновалов Д.В. (Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка та аналіз схемного рішення).

42. Патент України на винахід № 90015. Абсорбційна холодильна машина зі струминним апаратом. – Бюлетень № 6. – 2010 / Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Коновалов Д.В. та інш. (Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка та аналіз схемного рішення).

43. Патент України на винахід № 82075. Спосіб підготовки газоподібного теплоносія. – Бюлетень № 5. – 2008 / Радченко М.І., Радченко Р.М., Сирота О.А., Коновалов Д.В. та інш. (Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку).

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

44. Коновалов Д.В. Комплексная утилизация теплоты энергетических установок // Муниципальная энергетика: проблемы, решения: Тезисы второй междунар. науч.-техн. конф. Николаев: НУК, 2007. – С. 55–56. (Тезисы доповіді, усна доповідь).

45. Радченко Р.Н., Андреев А.А., Радченко Н.И., Красильщиков Е.А., Коновалов Д.В. Когенерационные контуры дизельных энергоустановок на

основе теплоиспользующих абсорбционных холодильных машин // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: Матеріали другої міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв: НУК, 2007. – С. 29–34. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку*).

46. Радченко Н.И., Коновалов Д.В. Перспективы экономии энергоресурсов на рыболовном траулере-рыбзаводе типа «Пулковский меридиан» // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Зб. наук. праць I Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 278-284. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз отриманих результатів розрахунку*).

47. Коновалов Д.В. Теплоиспользующие холодильные установки на основе эффекта термомпрессии // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Зб. наук. праць I Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 2. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 151–160. (*Стаття, усна доповідь*).

48. Коновалов Д.В. Теплоиспользующие холодильные машины с термомпрессионными контурами // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 23-24 вересня 2009 р. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2009. – С. 9-10. (*Тези доповіді, усна доповідь*).

49. Коновалов Д.В. Целесообразность применения термомпрессионных агрегатов в парокompрессорных холодильных машинах // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 23-24 вересня 2009 р. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2009. – С. 11–12. (*Тези доповіді, усна доповідь*).

50. Коновалов Д.В. Застосування альтернативних холодоагентів у тепловикористовуючих контурах систем охолодження повітря ДВЗ // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників. – Первомайськ: ППІ НУК, 2009. – С. 182-184. (*Тези доповіді, усна доповідь*).

51. Коновалов Д.В. Перспективи застосування термомпресійних апаратів у тепловикористовуючих машинах суднових ДВЗ // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників. – Первомайськ: ППІ НУК, 2009. – С. 221–222. (*Тези доповіді, усна доповідь*).

52. Радченко Н.И., Стахель А.А., Сирота А.А., Коновалов Д.В. Направления утилизации тепла в судовых дизельных установках и их реализация с применением холода // XIV Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2009. – С. 47. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок*

здобувача: розробка методики розрахунку тепловикористовуючих контурів та їх аналіз).

53. Коновалов Д.В., Радченко А.Н. Газотурбинный двигатель простого цикла с турбинной перерасширения и термопрессором // XIV Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2009. – С. 46. (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку та аналіз термодинамічного циклу, формулювання висновків).

54. Коновалов Д.В. Термопресорні системи охолодження наддувного повітря ДВЗ // Механіка та інформатика: Тези наукових праць. VIII Українсько-польська конференція молодих науковців – Хмельницький: Хмельницький національний університет, 2011. – С. 69-70. (Тези доповіді, усна доповідь).

55. Коновалов Д.В. Применение газотермодинамической компрессии для охлаждения наддувочного воздуха ДВС // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: Матеріали IV-ої всеукраїнської науково-технічної конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників. – Первомайськ: ПП НУК, 2011. (Тези доповіді, усна доповідь).

56. Коновалов Д.В. Повышение эффективности газовых ДВС применением детандерно-термопрессорных систем охлаждения // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 17-19 травня 2011 р. – Одеса: Вид-во ОНАПТ, 2011. (Тези доповіді, усна доповідь).

57. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Аналіз роботи термопресорної системи з попереднім охолодженням повітря середньообертового ДВЗ // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали III м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 421–423. (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка та аналіз схемних рішень, формулювання висновків).

58. Коновалов Д.В. Методологічний підхід до охолодження наддувного повітря ДВЗ із застосуванням ефекту термопресії // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали III м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 423–425. (Тези доповіді, усна доповідь).

59. Радченко Р.М., Бохдаль Т., Андреев А.А., Коновалов Д.В. Анализ эффективности теплоиспользующих систем охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології. Збірник доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон: Грінь Д.С., 2013. – С. 149–152. (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації).

60. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Суднова дизельна установка з тепловикористовуючим термопресорним контуром охолодження наддувного повітря // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології. Збірник доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон:

Грінь Д.С., 2013. – С. 279–281. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка та аналіз схемних рішень, формулювання висновків*).

61. Коновалов Д.В., Джуринська А.О. Інноваційна термопресорна технологія охолодження наддувного повітря суднових двигунів внутрішнього згоряння // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 256–257. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз отриманих результатів розрахунку*).

62. Коновалов Д.В., Радченко А.Н. ГТУ простої схеми с турбиною перерасширення і термопресором // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 128–131. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка та аналіз схемо-технічного рішення*).

63. Радченко А.Н., Коновалов Д.В. Теплоиспользующая система кондиционирования воздуха на входе судового дизеля // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 208–213. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку, та програмного комплексу для її реалізації*).

64. Радченко А.Н., Коновалов Д.В. Теплоиспользующая система кондиционирования воздуха на входе судового дизеля транспортного судна // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 215–222. (*Стаття, усна доповідь, Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації*).

65. Радченко А.М., Бузнік А.І., Радченко М.І., Коновалов Д.В. Оцінка ефективності застосування турбодетандерного охолодження газоповітряної суміші газового двигуна // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 223–227. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації, формулювання висновків*).

66. Коновалов Д.В., Радченко А.Н. Вентиляция электрогенератора и машинного отделения термоэжекционной системой // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 243–248. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка схемного рішення, розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації*).

67. Радченко Н.И., Сирота А.А., Радченко Р.Н., Коновалов Д.В. Потенциал охлаждения наддувочного воздуха судового главного дизеля // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 2. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 120–127. (Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка програмного комплексу для розрахунку, формулювання висновків).

68. Радченко Н.И., Сирота А.А., Стахель А.А., Коновалов Д.В. Утилизация тепла судовых дизельных установок // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 2 – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 139–143. (Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка програмного комплексу для розрахунку, формулювання висновків).

69. Коновалов Д.В. Охлаждения наддувного повітря судових ДВЗ з використанням ефекту термопресії // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 2. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 155–161. (Стаття, усна доповідь).

70. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Проміжне охолодження наддувного повітря ДВЗ із застосуванням термопресора // Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації / Збірник наукових праць II-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Ч. 2. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 166–172. (Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз отриманих результатів розрахунку).

71. Радченко Н.И., Бохдаль Т., Андреев А.А., Радченко Р.Н., Коновалов Д.В. Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців і фахівців. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 143–149. (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка програмного комплексу для розрахунку, формулювання висновків).

72. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Доцільність застосування термопресорного охолодження в двоступінчастих ежекторних холодильних машинах // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців і фахівців. – Миколаїв: НУК, 2013.– С. 269–271. (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз отриманих результатів розрахунку).

73. Коновалов Д.В., Джурина А.О., Кобалава Г.О. Вдосконалення систем утилізації теплоти відхідних газів судового ДВЗ застосуванням термопресора // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VII м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2015. – Т. 2. – С. 175–176. (Тези доповіді, усна

доповідь. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, розробка та аналіз схемних рішень застосування аеротермопресорного охолодження, формулювання висновків).

74. Коновалов Д.В., Джурина А.А. Метод экологического увлажнения наддувочного воздуха судового дизеля применением термпрессора // Проблемы экологии та енергозбереження: Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 35–38. *(Тези доповіді, усна доповідь, (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз отриманих результатів розрахунку).*

75. Коновалов Д.В., Джурина А.А. Применение термпрессорных аппаратов в системах экологического увлажнения наддувочного воздуха судовых ДВС // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології: Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: ОНАХТ, 2015. – С. 29–30. *(Тези доповіді, усна доповідь, (Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз екологічної ефективності застосування аеротермопресорного охолодження).*

76. Коновалов Д.В., Джурина А.А. Термпрессорное увлажнение наддувочного воздуха судового среднеоборотного ДВС // Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Херсон: ХГМА, 2015. – С. 33–34. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження, аналіз зміни характеристик ДВЗ).*

77. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А. Применение впрыска перегретой жидкости в термпрессорной системе охлаждения наддувочного воздуха ДВС // Актуальні проблеми енергетики та екології: матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Херсон: ФОП Грінь Д.С., 2016. – С. 253–255. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації з врахуванням особливостей упорскування перегрітої води, формулювання висновків).*

78. Коновалов Д.В., Джурина А.А. Применение термогазодинамической компрессии в системе турбонаддува среднеоборотных судовых двигателей // Актуальні проблеми енергетики та екології: матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Херсон: ФОП Грінь Д.С., 2016. – С. 255–257. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз ефективності застосування аеротермопресорних технологій, розрахунок характеристик енергетичної установки).*

79. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Особенности розрахунку процесів термопресорного охолодження наддувочного повітря ДВЗ // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-

технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 207–209. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку, формулювання висновків).*

80. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Підвищення ефективності термопресорних систем шляхом розпилення води, перегрітої відносно температури насичення // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 209–211. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації, формулювання висновків).*

81. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А. Применение термогазодинамической компрессии в цикле эжекторной холодильной машины // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 211–212. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка схемних рішень тепловикористовуючих холодильних машин, аналіз застосування різних холодоагентів, формулювання висновків).*

82. Радченко Р.М., Коновалов Д.В., Стародубець С.І. Тепловые нагрузки системы охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля с использованием его теплоты в течении рейса // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 258–260. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного продукту для її реалізації).*

83. Радченко М.І., Коновалов Д.В. Вдосконалений тепловикористовуючий контур випарних апаратів технологічних установок рибпромислових суден // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 473–475. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз схемного рішення тепловикористовуючого контуру, формулювання висновків).*

84. Коновалов Д.В., Радченко Н.І., Калиниченко І.В. Анализ эффективности использования теплоты пара вторичного вскипания в рыбомучных установках для производства холода // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 475–477. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз ефективності використання вторинної теплоти енергетичними установками).*

85. Коновалов Д.В., Радченко Н.І. Эжекторные теплоутилизирующие установки для производства технологического пара // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 477–480. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз*

ефективності використання вторинної теплоти енергетичними установками).

86. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О., Котік Х.А. Застосування аеротермопресора для проміжного охолодження повітря газотурбінних установок // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології: Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: ОНАХТ – 2017. – С. 97–98. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка та аналіз застосування аеротермопресора в системах охолодження, формулювання висновків).*

87. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А. Перспективы применения аэротермопрессора в газотурбинных установках с контурами перерасширения // Холод в енергетиці і на транспорті: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 219–228. *(Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, порівняльний аналіз способів застосування аеротермопресора).*

88. Konovalov D., Kobalava H. The aerothermopressor application for intermediate cooling in the gas turbine plant // Холод в енергетиці і на транспорті: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 302–309. *(Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку термодинамічних циклів ГТУ з проміжним охолодженням аеротермопресором, формулювання висновків).*

89. Konovalov D., Kobalava H. Application of superheated water injection in the thermocompression system for charge-air cooling of internal combustion engines // Холод в енергетиці і на транспорті: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 312–313. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного продукту для її реалізації, формулювання висновків).*

90. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Застосування упорскування перегрітої води в термопресорних системах охолодження наддувного повітря ДВЗ // Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон: ХДМА – 2017. – С. 80–81. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації, формулювання висновків).*

91. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А., Джурина А.А. Применение детандерно-термопрессорных систем охлаждения в газовых ДВС // Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон: ХДМА – 2017. – С. 82–83. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку аеротермопресорного контуру, розрахунок контуру перерозширення, формулювання висновків).*

92. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А., Майбродский П.А. Применение аэротермопрессора для промежуточного охлаждения воздуха газотурбинных установок // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та

обладнання для їх обслуговування: Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон: ХДМА – 2017. – С. 351. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, формулювання висновків*).

93. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А. Повышение эффективности газотурбинных установок применением аэротермопрессора в контурах перерасширения // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 248–253. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку, аналіз характеристик ГТУ із контурами перерозширення*).

94. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Застосування аэротермопрессора для проміжного охолодження повітря в газотурбинних установках // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 258–263. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методології дослідження, формулювання висновків*).

95. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О., Котік Х.А. Оцінка ефективності застосування перегрітої води в термопресорних апаратах для систем охолодження ДВЗ // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 265–270. (*Стаття, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації, формулювання висновків*).

96. Коновалов Д.В., Кобалава Г.А. Анализ эффективности применения аэротермопрессора для промежуточного охлаждения воздуха в ГТУ // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми»*. Миколаїв: НУК. – 8-10 листопада 2017 р. – С. 205–206. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методології дослідження*).

97. Коновалов Д.В., Джуринаська А.О., Смоляной Є.С. Суднова дизельна енергетична установка з розвиненою системою утилізації теплоти і термопресорним охолодженням // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми»*. Миколаїв: НУК. – 8-10 листопада 2017 р. – С. 79–80. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, аналіз ефективності систем утилізації теплоти для енергетичної установки при застосуванні аэротермопресорних технологій*).

98. Коновалов Д.В., Джуринаська А.А. Термопресорные технологии охлаждения для судовых ДВС // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 254–258. (*Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка та аналіз технічних рішень*).

99. Коновалов Д.В., Джуринаська А.О. Розрахунок процесів в термопресорних апаратах для систем турбонаддуву судових ДВЗ // *Інновації*

в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 263–265. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка математичної моделі та методики раціонального проектування аеротермопресорних апаратів, формулювання висновків).*

100. Коновалов Д.В., Джурина А.О., Смоляной Є.С. Застосування термопресорних апаратів для екологічного зволоження наддувного повітря суднового ДВЗ // Сучасні проблеми холодної техніки та технології: Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: ОНАХТ – 2017. – С. 118–119. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розрахунок та аналіз впливу на екологічні показники енергетичної установки, формулювання висновків).*

101. Коновалов Д.В., Джурина А.О. Особливості розрахунку термопресорних систем охолодження наддувного повітря суднових ДВЗ // Холод в енергетиці і на транспорті: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2017. – С. 287–289. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка математичної моделі та методики раціонального проектування аеротермопресорних апаратів, формулювання висновків).*

102. Коновалов Д.В., Кобалава Г.О. Аналіз технологій охолодження циклового повітря в газотурбінних установках // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК – 2018. – С. 246–247. *(Тези доповіді, усна доповідь. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку із врахуванням ефекту термозадинамічної компресії, формулювання висновків).*

103. Radchenko M., Radchenko R., Kornienko V., Konvalov D. Mathematical modeling of the pollution processes on the low-temperature surfaces of exhaust gas boilers with combustion of water-fuel emulsion // Heat Transfer and renewable sources of energy HTRSE – 2018. Books of abstracts. – Szczecin 2018. – Pp. 129–131. *(Тези доповіді. Внесок здобувача: розробка структурної схеми математичної моделі).*

**Наукові праці, що додатково відображають
наукові результати дисертації:**

104. Повноцінне харчування: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. М.І. Радченко, проф. Н.Л. Савицької. – Колективна монографія. – Х.: Світ книг, 2016. – 546 с. (Коновалов Д.В. – Частина 3, розділ 16. – С. 424–451). *(Розділ в колективній монографії. Внесок здобувача: постановка задач дослідження, розробка методики розрахунку та аналіз ефективності застосування аеротермопресорних технологій).*

105. Radchenko R., Radchenko A., Konvalov D., Hrych A., Andreev A. Corrosion processes on the condensation surfaces of exhaust gas boilers with water-fuel emulsion combustion / Monography of the faculty of mechanical engineering university of technology Koszalin – Koszalin, Poland: Wydawnictwo

Uniwersytety Koszalin, 2019. – P. 641-662. (*Розділ в колективній зарубіжній монографії. Внесок здобувача: розрахунок теплотехнічних характеристик утилізаційного контуру*).

106. Радченко Р.М., Коновалов Д.В., Пирисунько М.А., Чжан Цян, Луо Зевей. Охолодження повітря на вході головного суднового двигуна абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною в тропічних умовах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 2 (162). – С. 18–23. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розрахунок показників тепловикористовуючої холодильної машини, розробка програмного комплексу*).

107. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Чжан Цян, Лю Шаоцзюнь, Луо Зевей, Джі Ран. Охолодження наддувного повітря головного суднового двигуна ежекторною холодильною машиною в екваторіальних широтах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 2 (162). – С. 24–29. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації з врахуванням особливостей струминних технологій*).

108. Радченко А.М., Коновалов Д.В., Калініченко І.В, Чен Нінъ, Хан Баочен. Охолодження наддувного повітря головного суднового двигуна абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною в екваторіальних широтах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 2 (162). – С. 30–35. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та програмного комплексу для її реалізації*).

109. Радченко М.І., Коновалов Д.В., Воробйов Л.М., Попередне охолодження газо-повітряної паливної суміші газових двигунів у детандернотермопресорних холодильних машинах // *Обладнання та технології харчових виробництв: Зб. наук. праць ДонНУЕТ*. – Донецьк: ДонНУЕТ. – 2010. – Вип. 24. – С. 234–240. (*Наукове фахове видання України. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку та аналіз ефективності тепловикористовуючого контуру при застосуванні контуру перерозширення, формулювання висновків*).

110. Коновалов Д.В. Суднові струминні тепловикористовуючі холодильні установки технологічного призначення // *Наукові праці ОНАХТ*. – Одеса, 2009. – Вип. 35. – Т. 1. – С. 164-166. (*Наукове фахове видання України*).

111. Коновалов Д.В. Методологические принципы охлаждения наддувочного воздуха ДВС применением термопрессорных систем // *Сталий розвиток і штучний холод. Збірник наукових праць VIII Міжнар. наук.-техн. конф.* – Херсон: Гринь Д.С. (додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія». – Одеса: ОГАХ, 2012. – Вип. 4 (138)) 2012. – С. 269–274. (*Наукове видання України*).

112. Radchenko M., Radchenko R., Kornienko V., Konovalov D. Mathematical modeling of the pollution processes on the low-temperature surfaces of exhaust gas boilers with combustion of water-fuel emulsion // *Instal.* – 2019. –

Vol. 10. – С. 11–13. (*Зарубіжне наукове видання. Внесок здобувача: розробка структурної схеми математичної моделі*).

113. Kornienko V., Radchenko R., Kononov D., Andreev A., Pyrysunko M. Characteristics of the Rotary Cup Atomizer Used as Afterburning Installation in Exhaust Gas Boiler Flue. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2020. – Pp. 302–311. (*н.м.б. Scopus. Внесок здобувача: розрахунок характеристик тепловикористовуючого контуру*).

114. Forduy S., Radchenko A., Kuczynski W., Zubarev A., Kononov D. Enhancing the Gas Engines Fuel Efficiency in Integrated Energy System by Chilling Cyclic Air. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2020. – Pp. 500–509. (*н.м.б. Scopus. Внесок здобувача: розрахунок впливу охолодження повітря на характеристики газового двигуна*).

115. Патент України на винахід № 89429. Абсорбційна холодильна машина з ежектором. – Бюлетень № 2. – 2010 / Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Живиця В.В., Коновалов Д.В. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка методики розрахунку*).

116. Патент України на винахід № 89557. Абсорбційна холодильна машина з інжектором. – Бюлетень № 3. – 2010 / Радченко Р.М., Радченко А.М., Радченко М.І., Коновалов Д.В. та інші. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка схемного рішення, розробка методики розрахунку*).

117. Патент України на винахід № 90747. Абсорбційна холодильна машина зі струминним апаратом. – Бюлетень № 19. – 2010 / Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Коновалов Д.В. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка схемного рішення, розробка методики розрахунку*).

118. Патент України на винахід № 89560. Абсорбційна холодильна машина з рециркуляцією в абсорбері. – Бюлетень № 3. – 2010 / Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Коновалов Д.В. та інші. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка та аналіз схемного рішення*).

119. Патент України на винахід № 84550. Спосіб перетворення теплоти в механічну роботу в паротурбінній установці. – Бюлетень № 21. – 2008 / Радченко М.І., Сирота О.А., Радченко Р.М., Коновалов Д.В. та інші. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка та аналіз схемного рішення*).

120. Патент України на винахід № 89558. Парокомпресорна холодильна машина з ежектором. – Бюлетень № 3. – 2010 / Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Сапармамедов А.Н., Коновалов Д.В. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка схемного рішення, розробка методики розрахунку*).

121. Патент України на винахід № 89559. Абсорбційна холодильна машина з інжектором. – Радченко А.М., Радченко Р.М., Радченко М.І., Гоголь М.І., Коновалов Д.В. (*Патент на винахід. Внесок здобувача: розробка схемного рішення, розробка методики розрахунку*).

АНОТАЦІЯ

Коновалов Д.В. Розвиток науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми розвитку науково-технічних основ аеротермопресорних технологій використання вторинної теплоти енергетичних установок для охолодження робочого тіла. На основі представленого комплексу фізичних і математичних моделей процесів використання вторинної теплоти енергетичних установок в аеротермопресорах було розроблено методологію раціонального проектування таких систем, яка враховує неповне випаровування упорскуваної рідини та вплив дисперсності. Також була розроблена концепція підвищення економічності енергетичних установок на основі аеротермопресорних технологій, яка забезпечує ефективне дрібно-дисперсне розпилення рідини для наступного ізотермування процесу стиснення в компресорах з додатковим підвищенням повного тиску повітря. На основі численних розрахунків та проведеного експериментального дослідження були встановлені закономірності та особливості процесів в аеротермопресорах при охолодженні 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. Виходячи з цього визначено принципи застосування аеротермопресорів для проміжного охолодження повітря ГТУ, охолодження наддувного повітря ДВЗ, а також для тепловикористовуючих систем на базі ежекторних холодильних машин.

Ключові слова: ефект термогазодинамічної компресії, утилізація теплоти, проміжне охолодження, наддувне повітря, робоче тіло, дисперсність, коефіцієнт корисної дії.

SUMMARY

Kononov D.V. Development of scientific and technical bases of aerothermopressor technologies use power plants secondary heat. – Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.14.06 – Technical thermophysics and industrial heat

engineering. – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and applied problem of scientific and technical bases development of aerothermopressor technologies using for secondary heat of power plants for working fluid cooling. Based on the presented complex of physical and mathematical models of use processes of power plants secondary heat in an aerothermopressor the methodology of such systems rational design, which considers incomplete evaporation of the injected liquid and influence of dispersion was developed. The concept of increasing the power plants efficiency based on aerothermopressor technologies was also developed, which provides efficient high-dispersed spraying of liquid for after isotherming of the compression process in compressors with an additional increase in total air pressure. Based on numerical calculations and experimental research the regularities and characteristics of processes in aerothermopressor at air cooling as a working fluid component and high-utilization of products energy of power plants combustion were established, specifically influence of incomplete evaporation in the aerothermopressor on high-dispersion efficiency. Therefore, increase the capacity and power plant efficiency. Based on this, the principles of aerothermopressor application for intercooling of gas turbine air, charge air cooling of internal combustion engines, as well as for heat-using systems based on ejector refrigeration machines are determined.

Key words: thermogasdynamic compression effect, heat utilization, intercooling, charge air, working fluid, dispersion, efficiency.