

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Підвищення надійності, енергетичної ефективності та екологічності суднових енергетичних установок (СЕУ) – стратегічний напрям відродження та розвитку вітчизняного суднобудування, без чого Україні як морській державі, відомій у всьому світі, не обійтись і навіть неможливо боронити морські кордони, а відтак і рідну землю, та бути господарем у власних акваторіальних водах. Його реалізація потребує розроблення і впровадження новітніх технологій світового рівня, захищених патентами.

Суднобудування і суднова енергетика – галузі, що охоплюють практично весь спектр машинобудування та енергетики (як великої, так і комунальної), відповідно й інноваційні розробки в них носять міжгалузевий характер і знаходять широке впровадження в економіці України. Цьому підтвердження – широке впровадження результатів роботи.

Підвищення надійності, енергоефективності та екологічності СЕУ є невід’ємною частиною програм і завдань суднобудування України відповідно до Законів України «Про державну підтримку суднобудування» від 4 жовтня 2012 року, «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості» із змінами, внесеними згідно із Законом №1197-VII від 10.04.2014, ВВР, 2014, №24, ст. 883, суднобудування визнано пріоритетною галуззю економіки України, а з 1 січня 2013 року по 1 січня 2023 року проводиться економічний експеримент з метою створення підприємствам суднобудівної промисловості України умов, необхідних для підвищення конкурентоспроможності суднобудування.

Проблемою, що неминуче виникає в процесі експлуатації СЕУ, є втрата ефективної потужності, спричинена перекосами осей з’єднувальних валів суднових агрегатів, при її передачі від двигуна судовому валопроводу через з’єднувальний вузол «муфта-вал-муфта». Вказані перекоски осей призводить до погіршення характеристик двигунів і енергоустановок за екологічними властивостями, зокрема показниками шуму, вібрації та шкідливих викидів, погіршення експлуатаційних характеристик з енергоефективності та надійності: підвищення питомої витрати палива, зниження ефективного коефіцієнта корисної дії, безвідмовності, довговічності і ремонтної придатності.

Особливо гостро проблема енергозабезпечення стоїть для швидкісних енергонасичених кораблів берегової охорони в акваторіях півдня України, коли через високі температури циклового повітря зростає температура вихлопних газів, відповідно, тепловий слід-помітність кораблів, падають потужність і швидкість

ходу. На них як головні та допоміжні двигуни застосовуються газотурбінні двигуни (ГТД) та двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) зі значними втратами теплоти з випускними газами. Цю теплоту доцільно використовувати для охолодження циклового повітря на вході двигунів (ДВЗ, ГТД) і наддувного (ДВЗ) тепловикористальними холодильними машинами (ТХМ) з відповідним підвищенням потужності та скороченням питомої витрати палива.

Відоме використання тепла випускних газів ГТД регенеративного типу (температура 250 °С) в абсорбційних холодильних машинах (АБХМ) з охолодженням повітря на вході на кораблях берегової охорони Японії. Скидний енергопотенціал ГТД простого циклу кораблів берегової охорони набагато більший (температура випускних газів 400...550 °С), що свідчить про значні резерви його трансформації в холод і охолодження повітря на вході ГТД, що вельми актуально при експлуатації в акваторіях півдня України. Більшість досліджень зі зменшення теплового сліду-помітності кораблів зводяться до зниження температури продуктів згоряння шляхом їх змішування з зовнішнім повітрям або упорскуванням води без використання їх теплоти та зниження температурного рівня самих двигунів як джерел скидної теплоти, а відтак і теплового сліду.

При експлуатації суден і кораблів, передусім в акваторіальних водах, вельми гостро стоїть проблема скорочення шкідливих викидів. Вимоги щодо екологічної безпеки суден Морської міжнародної організації (International Marine Organization - ІМО) у вигляді стандартів ІМО, додатків і протоколів конвенції MARPOL 73/78 регламентують технічні, організаційні і правові питання захисту навколишнього середовища на морі. Технічними вимогами визначаються засоби і необхідне обладнання для очищення шкідливих викидів, обумовлюються граничні рівні токсичності відходів. Додаток VI конвенції MARPOL 73/78 регламентує викид оксидів азоту з відпрацьованими газами судових дизелів і вміст сірки в паливі. З 2016 р введено в дію норматив ІМО Tier 3, який передбачає зниження викидів оксидів азоту на 80%. Забезпечити такі жорсткі вимоги без інноваційних технічних рішень неможливо.

Рециркуляція відпрацьованих газів в системах EGR (Exhaust Gas Recirculation) шляхом перепуску з випускного колектору до наддувного ресиверу та їх подачі в робочі циліндри уповільнює процес згоряння палива і, в кінцевому рахунку, призводить до різкого зменшення викидів  $\text{NO}_x$ . Разом зі зменшенням оксидів азоту зростає вихід продуктів неповного згоряння (зокрема, сажі), що супроводжується зниженням паливної економічності та енергетичними витратами на очищення газів з відведенням теплоти забортною водою, тобто скиданням її за

борт. Погіршення паливної економічності, супутнє рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), особливо відчутнє на повних навантаженнях. З цієї причини перепуск газів економічно виправданий лише на часткових режимах ДВЗ і при ступенях рециркуляції на рівні 10÷40%. Зазвичай величину  $K_R$  оптимізують шляхом управління перепускним клапаном в залежності від навантаження, частоти обертання, паливної економічності, концентрації  $NO_x$  і  $S$ .

Розроблена інноваційна система використання скидної теплоти тепловикористальними холодильними машинами (ТХМ) для охолодження циклового повітря двигунів забезпечує зниження температури рециркуляційних газів і витрат на їх рециркуляцію, відповідно теплового сліду – помітності суден і бойових кораблів, підвищує автономність плавання. До того ж охолодження циклового повітря двигунів в ТХМ з відповідним скороченням питомої витрати палива компенсує її зростання і відкриває можливість застосування рециркуляції газів і на повних навантаженнях практично упродовж всього рейсу, що було підтверджено результатами досліджень у другому розділі роботи.

Такі технології подвійного використання ефективні як для бойових кораблів, так і суден, а також стаціонарних енергоустановок.

В довгостроковій перспективі, основним найбільш доцільним варіантом зменшення шкідливих викидів до атмосфери з суден стануть газоподібні палива, як скраплені, так і стиснені. На перших етапах збільшиться об'єм використання скрапленого природного газу (СПГ), а в подальшому планується впровадити в якості основного виду палива на судах – скраплений аміак, що буде продукуватися за рахунок відновлюваних джерел енергії. На початку 2020 року розпочато широкомасштабні програми з вивчення можливостей використання аміаку в якості основного виду палива для суден. З'являється достатньо суттєва складова – криогенні вторинні енергоресурси (ВЕР) скрапленого палива. Розробка та впровадження систем утилізації криогенних ВЕР в СЕУ забезпечує більш повне використання тепла на борту судна, як наслідок зниження теплових викидів з суден та підвищення їх економічної ефективності.

Найбільш доцільним варіантом застосуванням систем утилізації криогенних ВЕР суднових ДВЗ є системи з виробленням електричної енергії як універсального типу енергії. В якості альтернативного існуючим в стаціонарній практиці варіанту системи утилізації криогенних ВЕР скраплених газоподібних палив авторами запропоновано застосування термоакустичних теплових машин (ТАТМ), розроблених у третьому розділі.

Конструктивно ТАТМ являє собою замкнутий резонатор який заповнений робочим тілом – газ (повітря, гелій, аргон, або їх суміш). В порожнині резонатору

розташований модуль термоакустичних перетворень (МТП) – пориста матриця (регенератор) – пористе тіло з мікроканалами, яка з обох боків оточена теплообмінниками – нагрівачем та охолоджувачем. Завдяки теплообмінникам – в матриці формується повздовжній градієнт температури. В МТП відбувається процес перетворення теплової енергії в акустичну (термоакустичні двигуни (ТАД), чи навпаки – акустичної енергії в теплову (термоакустичні теплові насоси (ТАТН)).

Значний внесок у дослідження ефективності використання вторинних енергоресурсів у когенераційних технологіях внесли вітчизняні вчені Долинський А.А., Халатов А.А., Клименко В.М., Фіалко Н.М., Басок Б.І., Білека Б.Д., однак деякі питання адаптації вказаних технологій до судових умов експлуатації та розробки на їх основі багатофункціональних комплексів трансформації скидного енергопотенціалу СЕУ відповідно до змінних упродовж рейсу кліматичних умов і потреби у різних видах енергії (механічної/електричної, тепла та холоду) лишаються невирішеними, що стримує також зворотній процес – поширення інноваційних розробок в судовій енергетиці на стаціонарну й енергомашинобудування в цілому.

**Науково-технічною проблемою**, яка вирішується в роботі є, розробка систем утилізації теплоти вихлопних і рециркуляційних (екологічних) газів перепуску з випускного ресивера у впускний тепловикористальними холодильними машинами (ТХМ) охолодження циклового повітря двигунів з відповідним підвищенням їх потужності та скороченням споживання палива, а у разі скраплених газів – енергії регазифікації термоакустичними тепловими машинами (ТАТМ) з виробництва електроенергії, передачею потужності на валопровід зубчастими муфтами з рівномірним розподілом зусиль між спряженими парами зубів, як наслідок, зменшення витрат на ремонт і вірогідності виникнення аварійних ситуацій через перекося осей з'єднаних валів.

**Метою наукової роботи** є підвищення надійності, енергетичної ефективності та екологічності судових енергетичних установок (СЕУ) у складі пропульсивних комплексів виробництва механічної енергії в судових головних двигунах та її передачі на валопровід в реальних умовах експлуатації з перекося осей з'єднаних валів та негативного впливу підвищених температур повітря на вході двигунів і забортної води охолодження наддувного повітря, а також енергетичних витрат на очищення випускних газів в системі екологічної рециркуляції відведенням теплоти забортною водою та їх рециркуляцію.

**Наукові результати роботи:**

1. Розроблено **концепцію** підвищення ефективності судових енергетичних

установок у складі пропульсивних комплексів виробництва механічної енергії в суднових головних двигунах внутрішнього згорання і газотурбінних двигунах (ДВЗ і ГТД), що працюють як на природних паливах, так і скраплених газах, шляхом використання теплоти вихлопних і рециркуляційних (екологічних) газів перепуску з випускного ресивера у впускний тепловикористальними холодильними машинами (ТХМ) охолодження циклового повітря двигунів з відповідним підвищенням їх потужності та скороченням споживання палива, а у разі скраплених газів – енергії регазифікації термоакустичними тепловими машинами (ТАТМ) з виробництва електроенергії, передачею потужності на валопровід зубчастими муфтами з рівномірним розподілом зусиль між спряженими парами зубів, як наслідок, зменшення витрат на ремонт і вірогідності виникнення аварійних ситуацій через перекося осей з'єднаних валів.

Такі технології подвійного використання ефективні як для суден морського та річного флоту і кораблів берегової охорони, так і стаціонарних енергоустановок.

2. Обґрунтовано підхід до створення універсальних тепловикористальних енергокомплексів нового покоління, відповідно до якого скидну теплоту вихлопних і рециркуляційних екологічних газів, а також енергію регазифікації у разі використання як палива скраплених газів використовують для охолодження циклового повітря двигунів СЕУ в ТХМ з метою підвищення потужності і скороченням споживання палива та для отримання електроенергії в ТАТМ залежно від енергетичних потреб судна упродовж рейсу.

3. Визначено принципи взаємного функціонування підсистем охолодження циклового повітря двигунів СЕУ в ТХМ та отримання електроенергії в ТАТМ в єдиному енергокомплексі з перерозподілом енергетичних потоків відповідно до енергетичних потреб судна та змінних кліматичних умов експлуатації судна, що забезпечує максимальне за рейс скорочення споживання палива.

4. Розроблено наукові засади і методологію проектування систем глибокої утилізації енергії із застосуванням ТХМ і ТАТМ, які базуються на встановлених особливостях процесів глибокої утилізації теплоти вихлопних і рециркуляційних газів в ТХМ і ТАТМ, принципах їх взаємного функціонування, як єдиного універсального судового енергокомплексу з перерозподілом енергетичних потоків відповідно до змінних кліматичних умов і енергетичних потреб судна.

5. Отримали подальший розвиток теоретичні засади глибокої утилізації теплоти вихлопних і рециркуляційних газів двигунів СЕУ, що працюють на природних паливах і скраплених газах, як основи створення енергокомплексів нового покоління, які завдяки сумісному застосуванню ТХМ і ТАТМ найбільшою мірою адаптовані до зміни кліматичних умов та енергоспоживання судна.

6. Вперше розроблена математична модель розрахунку оптимальних масо-габаритних та геометричних параметрів ТАТМ, яка враховує залежність впливу темпу підведення тепла на пускові характеристики, що в свою чергу дозволяє розраховувати реальні робочі температурні діапазони та оптимізувати теплоутилізаційний контур в цілому.

7. Розроблена і захищена патентами України на винаходи система примусового запуску ТАТМ із застосуванням додаткового електричного нагрівача для гарантування його безперервної роботи на перехідних режимах, що дозволяє збільшити повноту утилізації до 87%, як наслідок підвищити використання енергії регазифікації до 14%.

8. Підтверджено теоретично й експериментально поліпшення характеристик суднових енергетичних установок, котрі працюють в реальних умовах перекосів осей з'єднувальних валів, застосуванням розроблених зубчастих муфт підвищеної експлуатаційної ефективності за показниками енергоефективності, надійності та екологічності: зменшенням втрат потужності на тертя в 1,3-3 рази, підвищення навантажувальної здатності в 1,2-4 рази, збільшення терміну служби в 1,3-6 разів, зменшення рівня вібрації і шуму на 2-12 дБ.

9. Результати досліджень впроваджено у практику проектування та експлуатації суднових і стаціонарних енергетичних установок з економічним ефектом понад 2 млн. грн.

Отримані науково-технічні результати відзначаються принциповою новизною, захищеною 46 патентами України на винаходи та корисні моделі, і свідчать про те, що *робота відповідає кращим світовим аналогам і перевищує існуючі вітчизняні розробки.*

**Достовірність результатів досліджень** забезпечена коректною постановкою завдань теоретичного й експериментального досліджень, коректним застосуванням фізично і математично обґрунтованих сучасних розрахунково-експериментальних методів дослідження, прийнятною точністю отриманих експериментальних даних та їх математико-статистичною обробкою, задовільним узгодженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень та натурних випробувань.

Науковий та інноваційний рівень розроблених технологій підтверджено резолюціями близько 60 авторитетних міжнародних наукових форумів на Україні та за кордоном: м.-н. н.-т. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2011-2020); «Сучасні проблеми триботехніки» (Миколаїв, 2005, 2009); «Судова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, 2005-2019); «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, 2013–2015),

«Проблеми якості та довговічності зубчастих передач, редукторів їх деталей і вузлів» (Севастополь, 2011-2013; Одеса-Кароліно-Бугаз, 2015, 2019); «Сучасний стан та проблеми двигунобудування». (Миколаїв, 2011, 2018-2020); «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування» (Миколаїв, 2016, 2018, 2020); «Сучасні проблеми взаємозамінності та стандартизації у машинобудуванні» (Миколаїв, 2018); «Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професорів Фомина Ю. Я. і Семенова В. С. (FS - 2019)» (Одеса – Стамбул, 2019); «Сучасні інформаційні технології на транспорті» (Херсон, 2014–2015), акустичний симпозіум "КОНСОНАНС-2013" (Київ, 2013); «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (Одеса, 2018-2020); «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (Харків, 2018); «Scientific achievements of modern society» (Liverpool, England, 2020); «Priority directions of science development.» (Lviv, 2020); «Topical issues of the development of modern science» ( Sofia, Bulgaria, 2020).

**Впровадження результатів досліджень.** Результати досліджень впроваджені у проектних та конструкторських установах енергетичного машинобудування та суднобудування як вітчизняних, так і за кордоном, зокрема в Державному підприємстві Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» при проектуванні судових турбоагрегатів, Публічному акціонерному товаристві «Миколаївський суднобудівний завод «Океан» при ремонті та відновленні машинних агрегатів, Товаристві з обмеженою відповідальністю «Д. Енерджи» при проектуванні систем утилізації скидної теплоти з використанням розроблених в роботі схемно-конструктивних рішень та рекомендацій, Відкритому акціонерному товаристві «Український науково-дослідницький інститут технології судового машинобудування» при проектуванні судових приводів та науково-дослідному центрі «Фундаментально-прикладні проблеми сучасного редукторобудування».

Економічний ефект від впровадження результатів у розробках цих організацій складає понад 2 млн. грн.

Тематика роботи пов'язана із галузевими планами суднобудівних і машинобудівних підприємств України, спрямованих на підвищення довговічності, працездатності, надійності та економічності енергетичних установок.

Представлені матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних авторами відповідно до тематичного плану фундаментальних НДР НУК у рамках держбюджетних та госпрозрахункових тем: НДР № 0115U000301 "Дослідження та розробка модулю термоакустичного перетворювача теплових викидів

енергетичних установок транспорту та промисловості"; НДР № 0115U000301 "Розробка теоретичних основ проектування термоакустичних турбогенераторів систем використання теплових скидних енергетичних ресурсів транспортних засобів"; НДР № 0111U002311 "Розробка теоретичних основ проектування термоакустичних систем використання низькопотенційних вторинних та відновлювальних енергоресурсів", №654 «Дослідження впливу твірних бічних поверхонь зубів на навантажувальну здатність нових конструкцій зубчастих муфт»; №1334 «Теоретичні дослідження інтенсивності тепловиділення і тертя в зоні контакту криволінійних поверхонь довільних розмірів»; №1526 «Розробка методології та теоретичні основи дослідження підвищення працездатності і надійності суднових зубчастих передач з урахуванням нових технічних рішень»; №1675/1989 «Розробка зубчастих механізмів, що володіють високою навантажувальною здатністю»; №1717/2021 «Розробка суднових зубчастих механізмів, що володіють високою навантажувальною здатністю і поліпшеними віброакустичними характеристиками».

Ряд новітніх технологій розроблено сумісно з науковими центрами КНР (Цзяньсуньським університетом науки і технології, м. Цзеньцзянь), Польщі (Західно-Померанським, м. Щецин, та Кошалінським, м. Кошалін, технічними університетами), з якими проводяться сумісні наукові дослідження у рамках договорів, міжнародні конференції.

За темою роботи авторами опубліковано 173 наукові праці, у тому числі 58 статей у фахових і наукометричних виданнях, 69 тез і доповідей в матеріалах міжнародних конференцій, 46 патентів України на винаходи і корисні моделі.

**У першому розділі** обґрунтовано підвищення надійності, енергоефективності та екологічності суднової енергетичної установки за рахунок усунення негативного впливу перекосі осей з'єднувальних валів шляхом застосування компенсуючих пристроїв. Розроблено зубчасті передачі, які характеризуються, у порівнянні з традиційними, підвищеною навантажувальною здатністю в 1,8-2,5 рази, зменшенням вагогабаритних показників до 26%; зниженням шуму на 10-25 дБ і вібрації з 90-95g до 30-35g. Розроблено зубчасті муфти підвищеної експлуатаційної ефективності з комбінованою поздовжньою модифікацією зубів, які в реальних умовах експлуатації з перекосом осей з'єднаних валів суднових енергетичних установок за рахунок перерозподілу зусиль з найбільш навантажених на менш навантажені пари зубів забезпечують передачу ефективної потужності від головного двигуна на валопровід з мінімальними втратами, що забезпечує високу працездатність судна без відмов і позапланових зупинок на ремонт протягом заданого часу, планову провізну здатність судна, знижує



вірогідність виникнення аварійних ситуацій, та було підтверджено результатами експериментальних досліджень і натурних випробувань.

**У другому розділі** роботи показано, що зниження токсичності і кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами суднових ДВЗ є складною науково-технічною проблемою. Необхідність її вирішення диктується нормативно-законодавчими вимогами, які стають все більш жорсткими. Найчастіше їх виконання супроводжується зниженням економічних та енергетичних показників двигунів. Так при екологізації дизельних двигунів шляхом рециркуляції відпрацьованих газів в системах EGR (Exhaust Gas Recirculation) з їх подачею знову в робочі циліндри має місце суттєве зниження паливної економічності, зумовлене уповільненням процесів згоряння палива та енергетичними витратами на очищення газів з відведенням теплоти забортною водою, тобто скиданням її за борт. Використання скидної теплоти для охолодження циклового повітря двигунів забезпечує скорочення питомої витрати палива, зниження температури вихлопних газів і витрат на їх рециркуляцію. Розроблено новітні системи комплексного охолодження циклового повітря (повітря на вході турбокомпресора і стисненого наддувного повітря після нього) суднових малообертових двигунів тепловикористальними холодильними машинами (ТХМ) абсорбційного та ежекторного типу, які утилізують теплоту наддувного повітря, вихлопних і рециркуляційних (екологічних) газів, що дає можливість не тільки компенсувати падіння паливної економічності, зумовлену рециркуляцією відпрацьованих газів та підвищенням температури повітря на вході двигунів та забортної води охолодження наддувного повітря, але й скоротити питомі витрати палива понад  $3 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$  та підвищити потужність на 2-4 % залежно від кліматичних умов на рейсових лініях судна.

При аналізі ефективності розроблених систем утилізації з охолодженням циклового повітря суднових двигунів порівняння здійснено з базовою системою з рециркуляцією відпрацьованих газів для малообертових двотактних дизельних двигунів фірми MAN відповідно до умов екологічності Tier III.

**У третьому розділі** представлено результати розробки експериментальних стендів і дослідження робочих та перехідних процесів у термоакустичних теплових машинах (ТАТМ) та їх елементах. Наведені результати серії експериментальних досліджень визначення пускових характеристик ТАТМ в залежності від повздовжнього градієнту температури. Встановлено, що в діапазоні температур 100-350 °С запуск та стабільність роботи ТАТМ залежить не лише від створюваного повздовжнього градієнту температури, а й від темпу підведення тепла. Запропоновано систему примусового запуску ТАТМ з

додатковим електричним нагрівачем при роботі на часткових або перехідних режимах суднової енергетичної установки (СЕУ). Отримані експериментальні залежності дали підстави стверджувати, що потужність системи примусового запуску повинна бути не менш як 15% від потужності основного джерела.

Розроблено структурні схеми систем утилізації низькотемпературних та криогенних скидних ресурсів СЕУ в ТАТМ з активним навантаженням, яким можуть бути, в залежності від суднових потреб, термоакустичний тепловий насос (ТАТН) – для підвищення рівня теплового потенціалу робочого середовища, або імпульсна двонаправлена турбіна (ІДТ) як привід електрогенератора.

На основі створеної математичної моделі у програмному середовищі DeltaES (програмний продукт для розрахунку основних характеристик ТАТМ) – визначено раціональні характеристики термоакустичного апарату, перш за все його теплові режими навантаження та геометричну конфігурацію з оптимальним розташуванням активного навантаження, а саме ІДТ, що забезпечило підвищення коефіцієнта корисної дії утилізаційної установки на рівні 14%, завдяки чому зменшити теплове забруднення від енергетичної установки на 1,2%.

За темою роботи авторами опубліковано 173 наукові праці, у тому числі 56 статей у фахових і наукометричних виданнях (в наукометричних базах – 49, з них 4 – в базах Scopus та 3 – в базі Web of Science), 71 тез і доповідей в матеріалах міжнародних конференцій (закордонних - 3), 46 патентів України на винаходи і корисні моделі. Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів 14, h-індекс (за роботою) = 3; згідно бази даних Web of Science загальна кількість посилань на публікації авторів 6, h-індекс - 0; згідно бази даних Google Shcolar загальна кількість посилань - 130, h-індекс (за роботою) = 12.

Автори:

Савенков О.І.

Барабанова Ю.Є.

Московко О.О.

Пирисунько М.А.

