МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

«Інноваційні технології підвищення надійності, енергетичної ефективності та екологічності суднових енергетичних установок»

САВЕНКОВ Олег Ігорович

БАРАБАНОВА Юлія Євгенівна

МОСКОВКО Олексі Олексійович

ПИРИСУНЬКО Максим Андрійович

2021

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 судновому валопроводу через з'єднувальний вузол «муфта-вал-муфта». Вказані перекоси 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.

<u>Науково-технічною проблемою</u>, 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 перекос осей з’єднуваних валів.

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

Наукові результати роботи:

1. Розроблено **концепцію** підвищення ефективності суднових енергетичних установок у складі пропульсивних комплексів виробництва механічної енергії в суднових головних двигунах внутрішнього згоряння 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 перекос осей з’єднуваних 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 газах 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 суднового 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 енергосоживання 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 (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 суднових 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-дослідніцький інститут технології суднового машинобудування» при проектуванні суднових приводів та науково-дослідному центрі «Фундаментально-прикладні проблеми сучасного редукторобудуванні».

Економічний ефект від впровадження результатів у розробках складає понад 2 млн. грн. на одну енергетичну установку, зважаючи на кількість суднових енергетичних установок що експлуатуються, економічний ефект може складати мільярди 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 низькопо-тенційних 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 56 статей у фахових і наукометричних, 71 тез і доповідей в матеріалах міжнародних конференцій, 46 патентів України.

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’єднуваних 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.

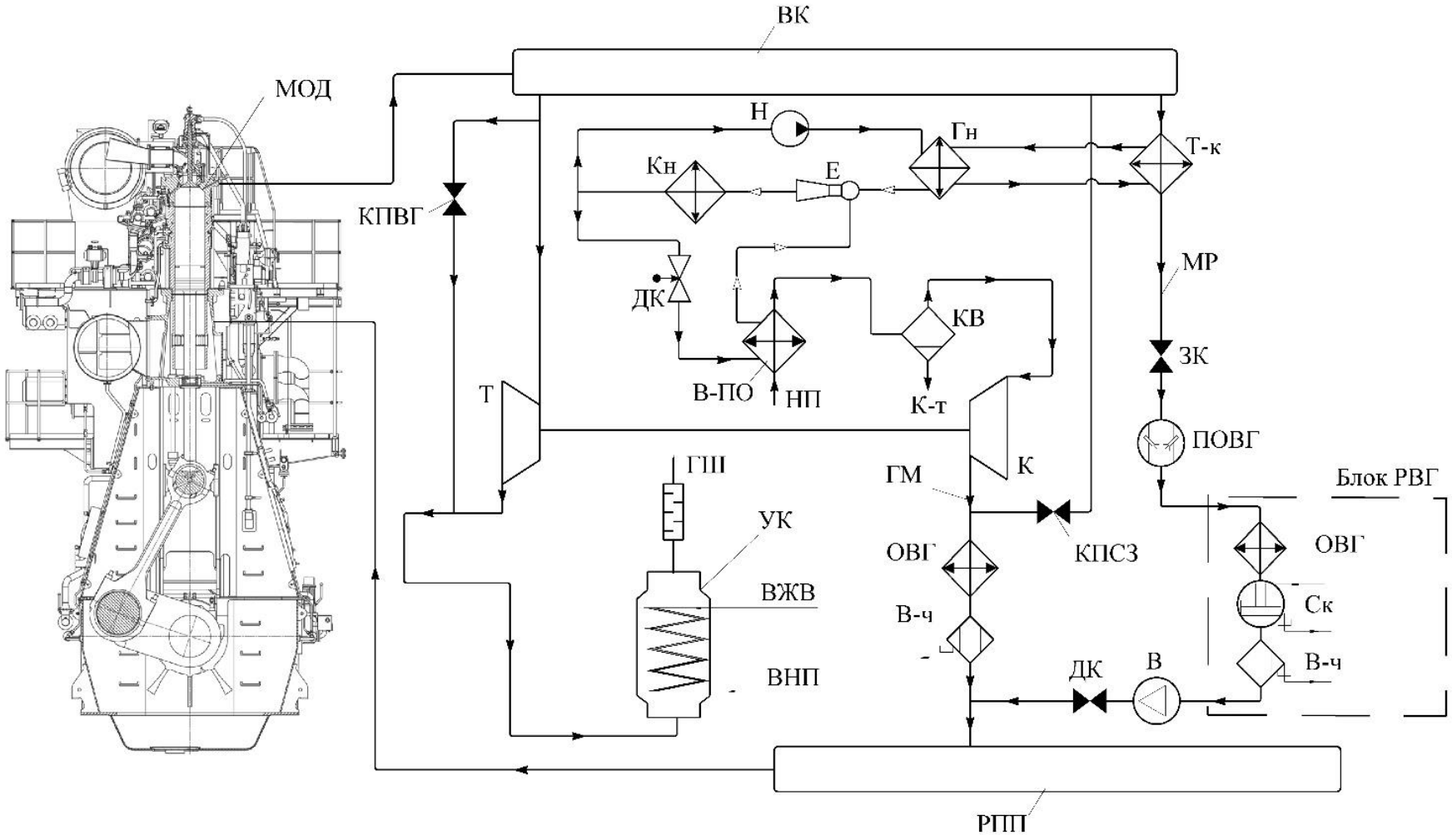
У другому розділі роботи показано, що зниження токсичності і кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами суднових ДВЗ є складною науково-технічною проблемою. Необхідність її вирішення диктується нормативно-законодавчими вимогами, які стають все більш жорсткими. Найчастіше їх виконання супроводжується 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 г/(кВт·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.

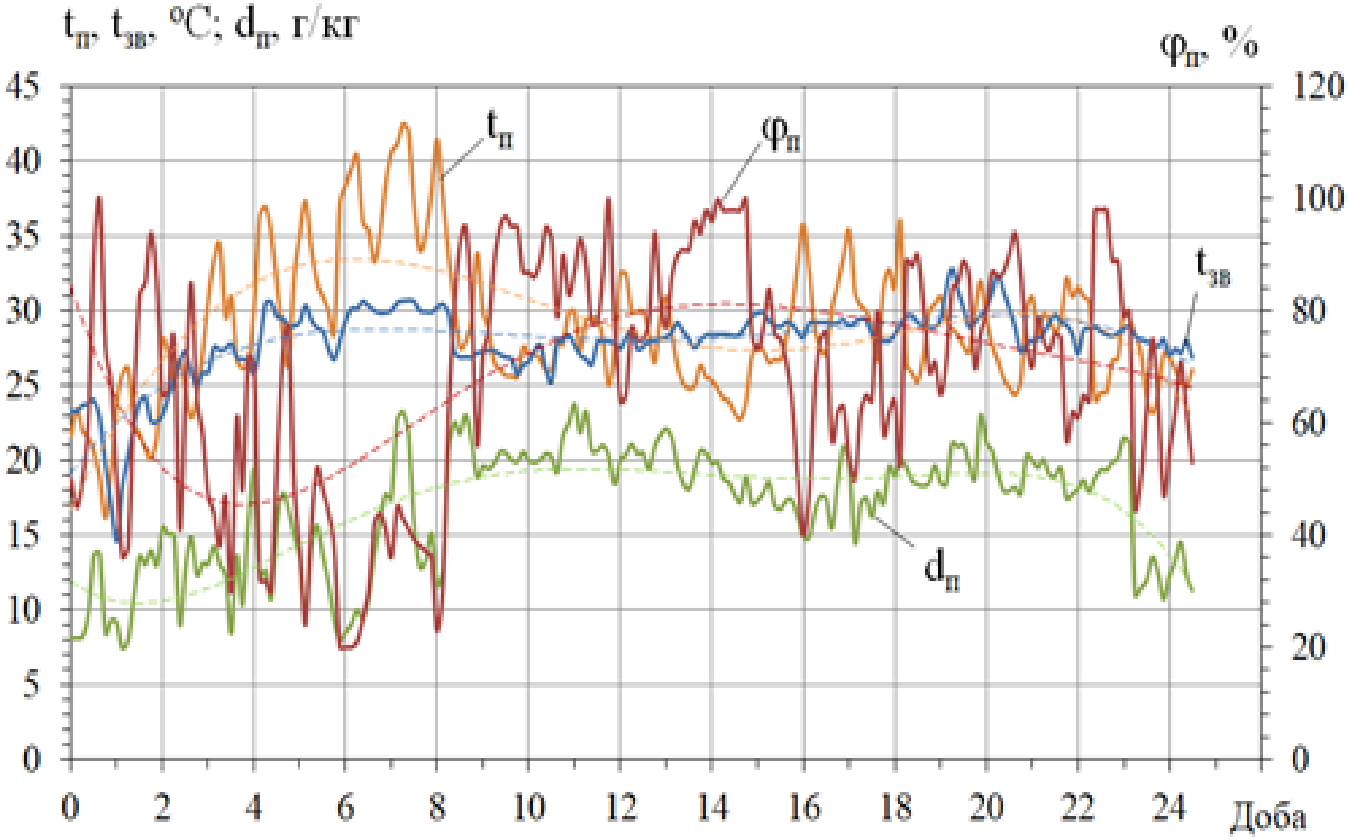
У третьому розділі представлено результати розробки експериментальних стендів і дослідження робочих та перехідних процесів у термоакустичних теплових машинах (ТАТМ) та їх елементах. Наведені результати серії експериментальних досліджень визначення пускових характеристик ТАТМ в залежності від повздовжнього 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 кріогенних 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 DeltaEC (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%.

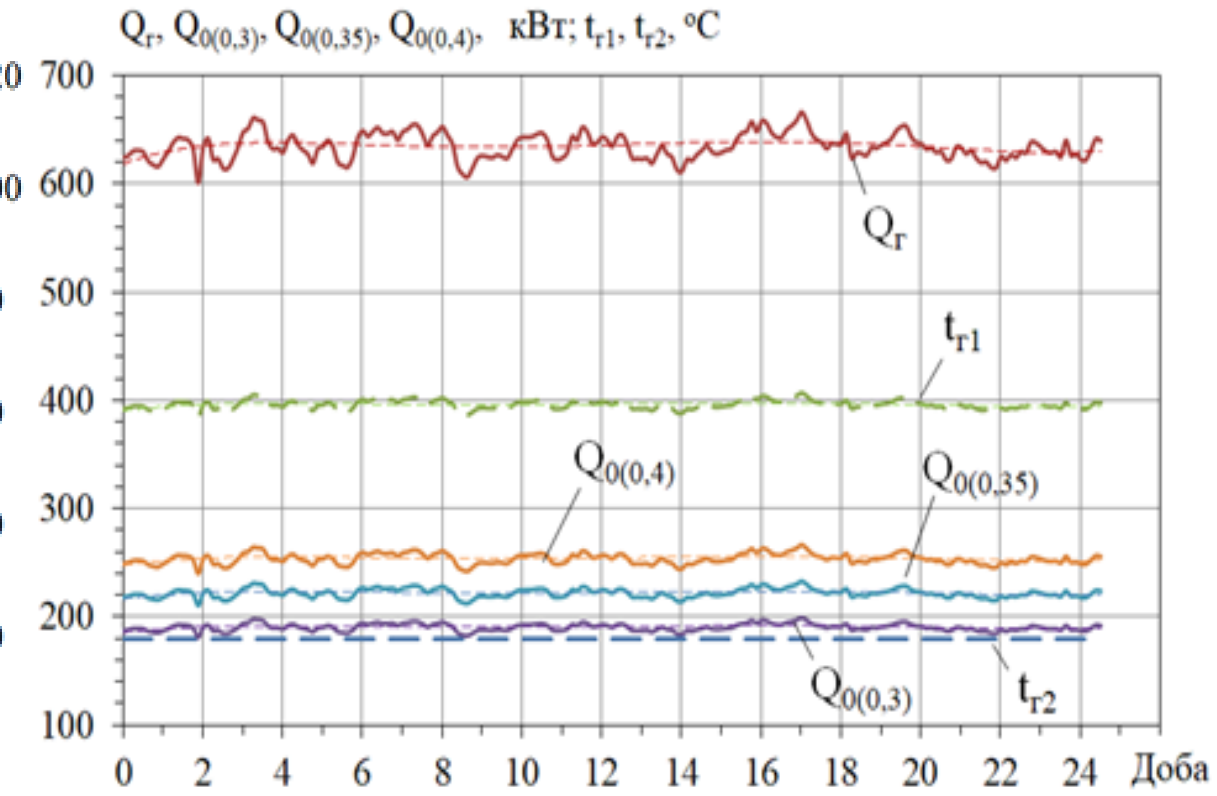
Схема системи рециркуляції відпрацьованих газів з байпасом МОД фірми MAN Energy Solution із охолодження повітря на вході, за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів в ЕХМ



К і Т – компресор і турбіна ТК; КВ– конденсатовідвідник; Н – насос; ВК – випускний колектор; РПП – ресивер продувочного повітря; НП – навколишнє повітря на вході до ТК; К-т – конденсат; Е – ежектор; Г – генератор; В-ПО – випарник-повітроохолоджувач; ДК – дросельний клапан; Кн – конденсатор хладону; МОД – малообертовий двигун; КПВГ – клапан перепуску відпрацьованих газів за турбіною; Т-к – теплообмінник; МР – магістраль рециркуляції; ЗК – запірний клапан; ПОВГ – попереднє очищення ВГ; ОВГ – охолоджувач ВГ; Ск – скрубер; В-ч – вологовідділювач; В – вентилятор; УК – утилізаційний котел; ГМ – головна магістраль; ВНП – вхід насиченого пару; ВЖВ – вхід живильної води; ГШ – глушник шуму

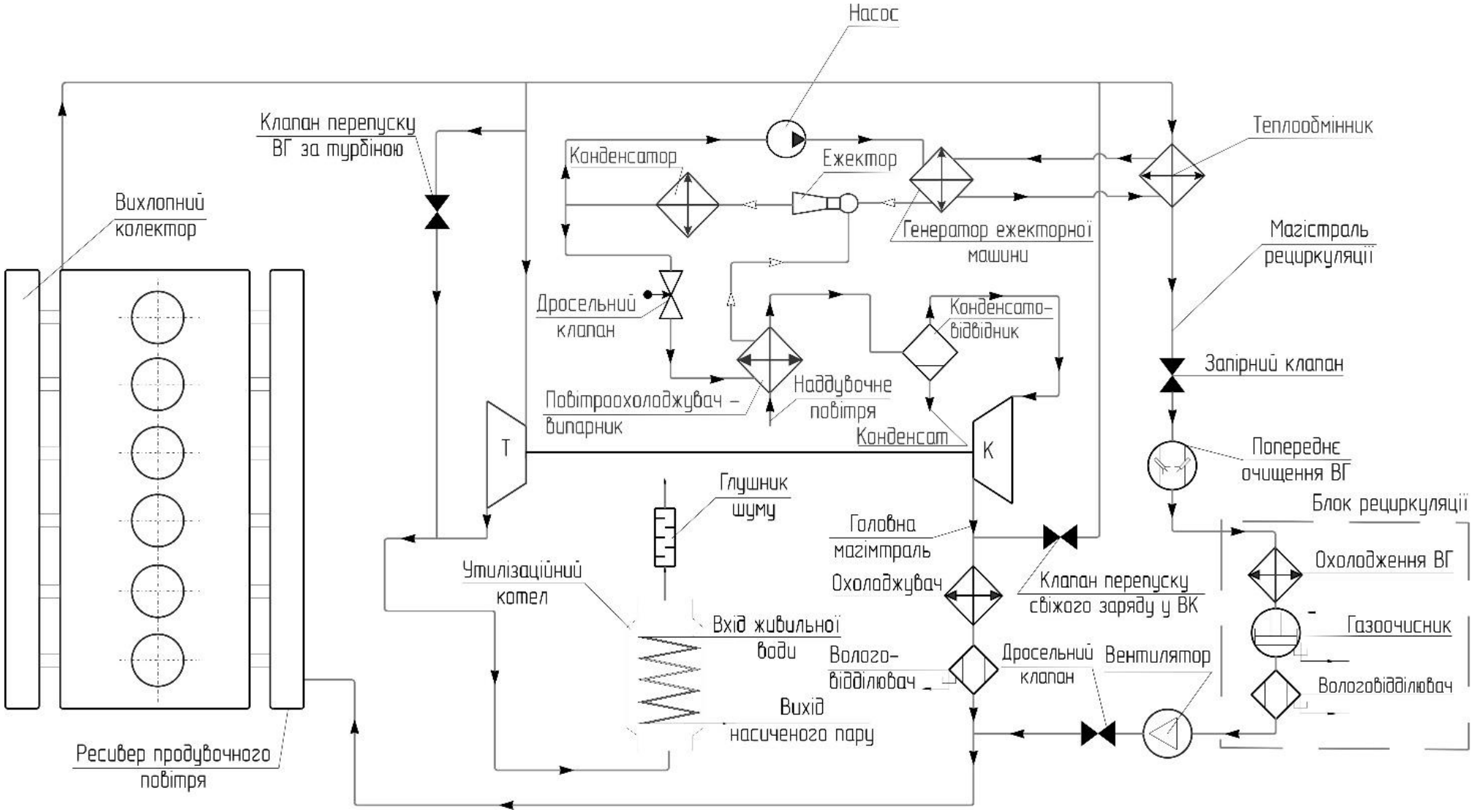


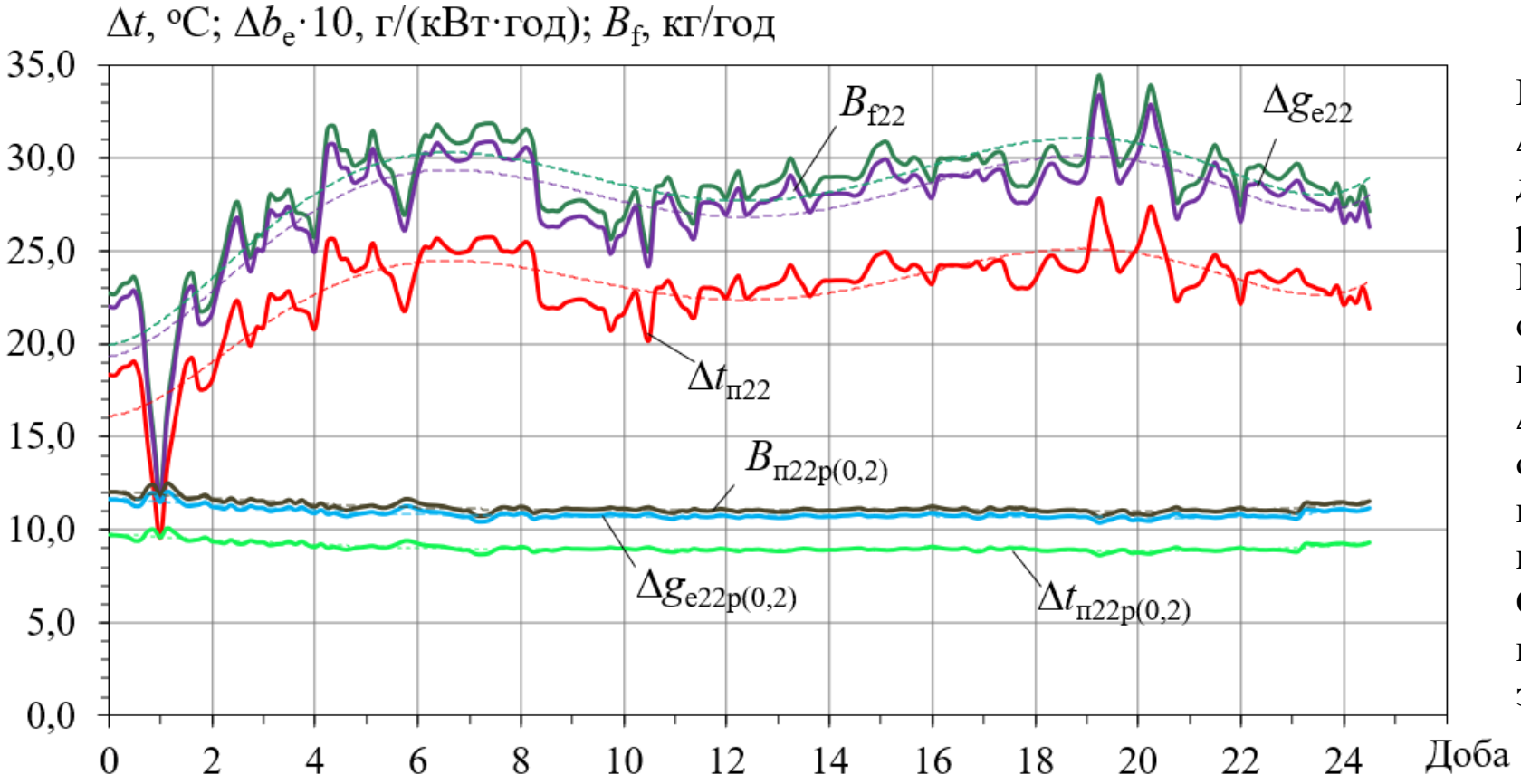
Залежності температури зовнішнього повітря $t_п$, температури забортної води $t_з$, вологовмісту зовнішнього повітря $d_п$ і відносної вологості $\varphi_п$ від доби рейсу суховантажного судна з Одеси (Україна) до міста Шанхай (Китай)



Залежність температури відхідних газів на виході з колектору $t_{г1}$, температури газів на виході з генератора холодильної машини $t_{г2}$, теплового навантаження на генератор холодильної машини $Q_г$, холодопродуктивності випарника при різних теплових коефіцієнтах $Q_{0(0,3)}$, $Q_{0(0,35)}$, $Q_{0(0,4)}$ від доби рейсу суховантажного судна Одеса-Шанхай

Схема системи охолодження наддувного повітря двигуна 6G50ME-C9.6-TIII в ЕХМ

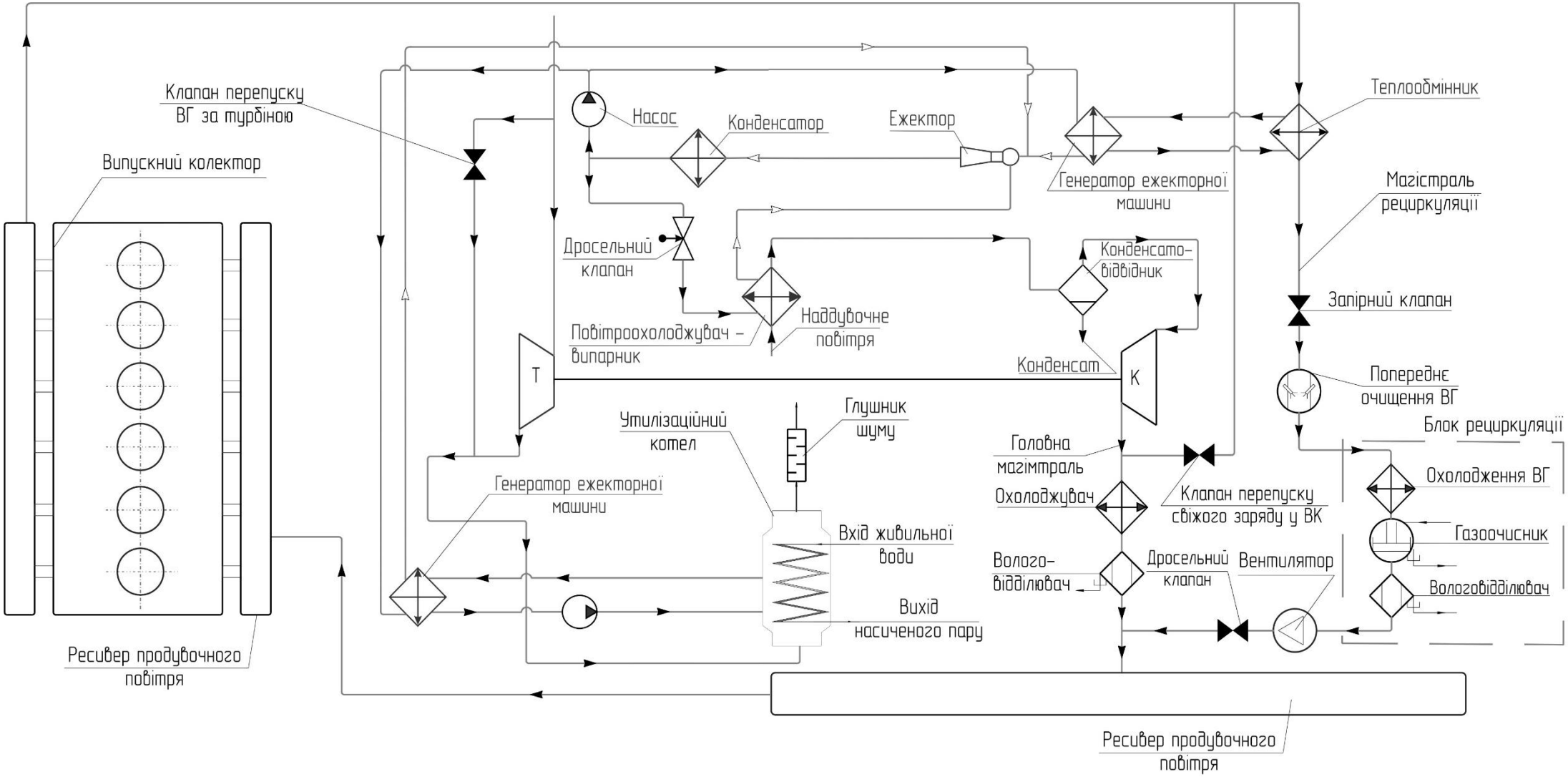


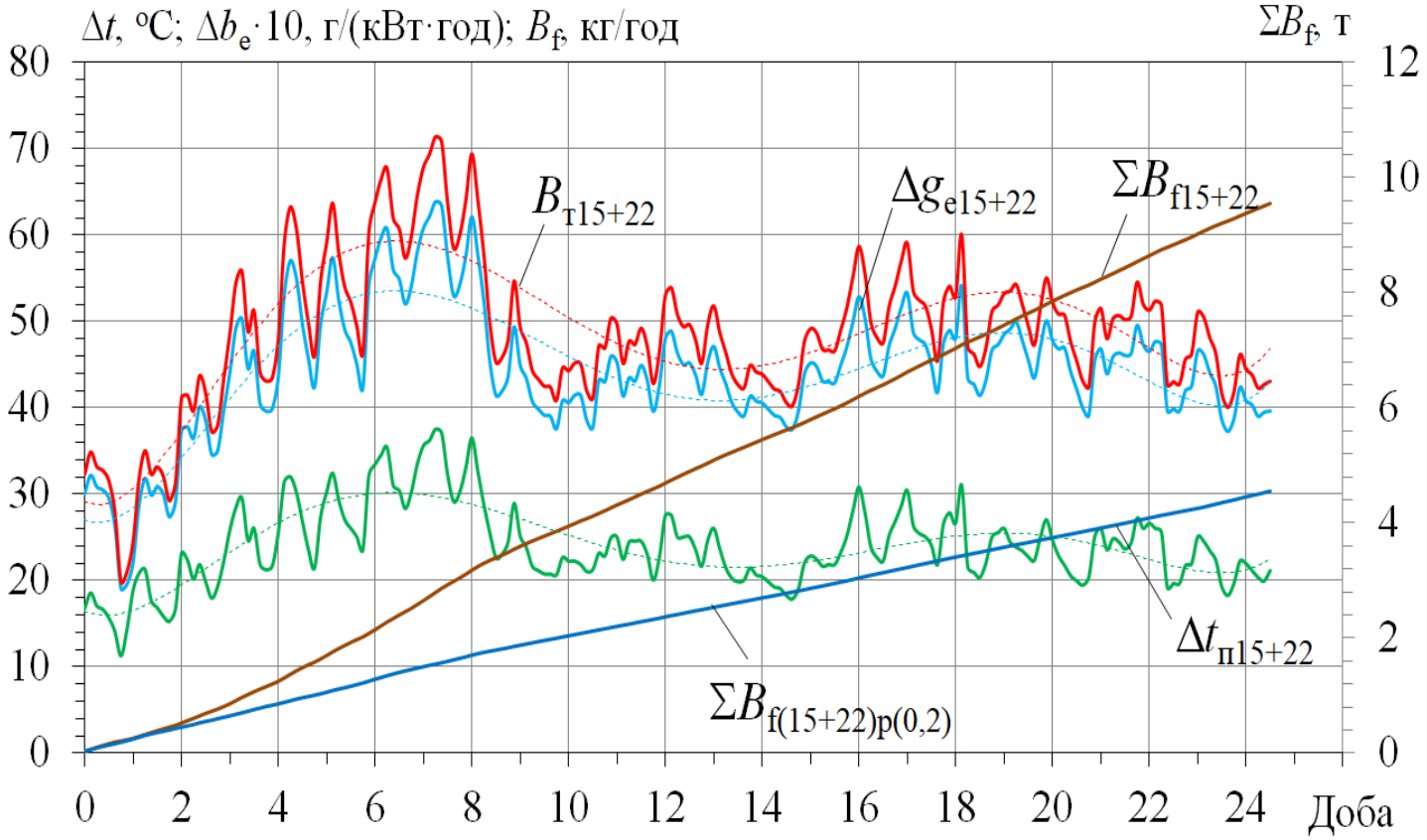


Поточні значення скорочення питомої $\Delta g_{e.р(0,2)}$ і годинної $B_{п22.р(0,2)}$ витрат палива для МОД 6G50ME-C9.6 MAN B&W за рахунок охолодження наддувного повітря в ЕХМ на величину $\Delta t_{п.р(0,2)}$ в порівнянні з його охолодженням забортною водою, тобто потенційно можливі скорочення питомої Δg_{e22} і годинної B_{f22} витрат палива при охолодженні наддувного повітря до $t_{п2}$ =22 °C на величину $\Delta t_{п22}$ при температурі наддувного повітря на виході з ОНП протягом рейсової лінії Одеса-Шанхай при температурі наддувного повітря на виході з ОНП $t_{г2}$ = 140 °C.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

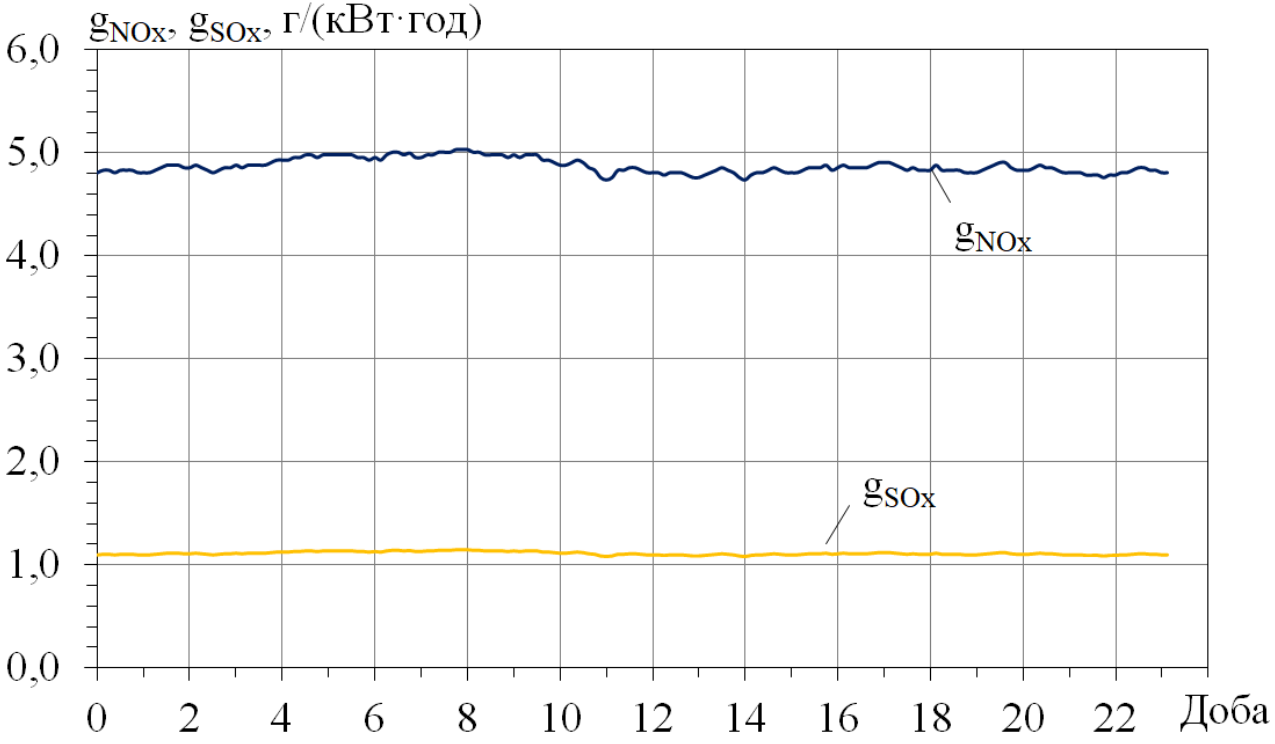
Схема системи охолодження наддувного повітря двигуна 6G50ME-C9.6-TIII в ЕХМ

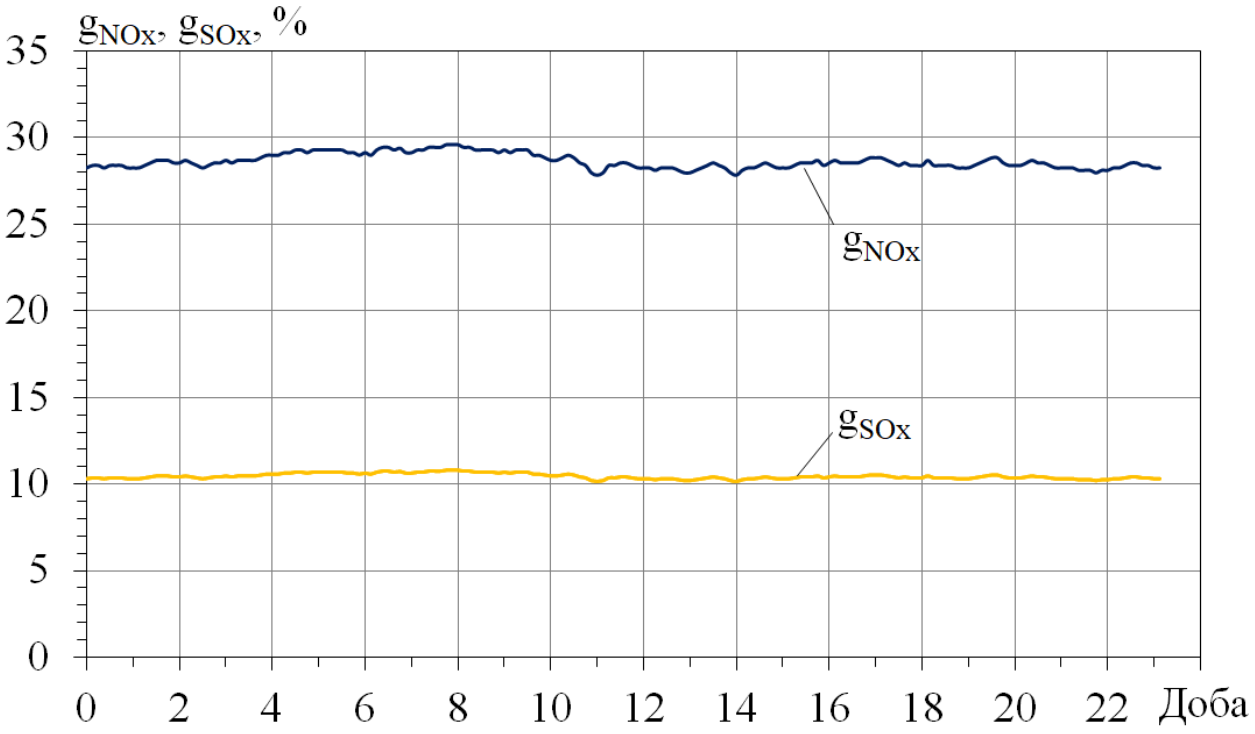




Поточні значення сумарного скорочення питомої $Dg_{e(15+22)p0,2}$ і годинної $B_{f(15+22)p(0,2)}$ витрат палива за рахунок охолодження повітря на вході в ТК в ЕХМ (при ζ = 0,2) на величину $\Delta t_{п15p(0,2)}$ (за рахунок теплоти відпрацьованих рециркуляційних газів) та наддувного повітря в ЕХМ (за рахунок його теплоти) на величину $\Delta t_{п22p(0,2)}$ в порівнянні з його охолодженням забортною водою, можливого скорочення питомої $Dg_{e(15+22)}$ і годинної $B_{f(15+22)}$ витрат палива при зниженні температури повітря на вході в ТК до $t_{п2}$ = 15 °C та наддувного повітря після охолоджувача забортною водою ОНП до $t_{п2}$ = 22 °C, а також сумарного скорочення витрат палива за нарощуванням упродовж рейсу за рахунок охолодження повітря на вході в ТК і наддувного повітря в ЕХМ (при ζ = 0,2) $\sum B_{f(15+22)p(0,2)}$ і потенційно можливого при охолодженні повітря на вході ТК до $t_{п2}$ =15 °C та наддувного повітря після охолоджувача забортною водою ОНП до $t_{п2}$ = 22 °C $\sum B_{f(15+22)}$ для МОД 6G50ME-C9.6 фірми MAN Energy протягом рейсу Одеса- Шанхай

Зниження шкідливих викидів за рахунок зниження температури повітря на вході при використанні теплоти відпрацьованих рециркуляційних газів для ЕХМ з ζ = 0,3 складає: ΔgNOx(0,3) = 26–29 % (4,8–5,1 г/(кВт год)); ΔgSOx(0,3) = 10–11 % (1,1–1,2 г/(кВт год)).

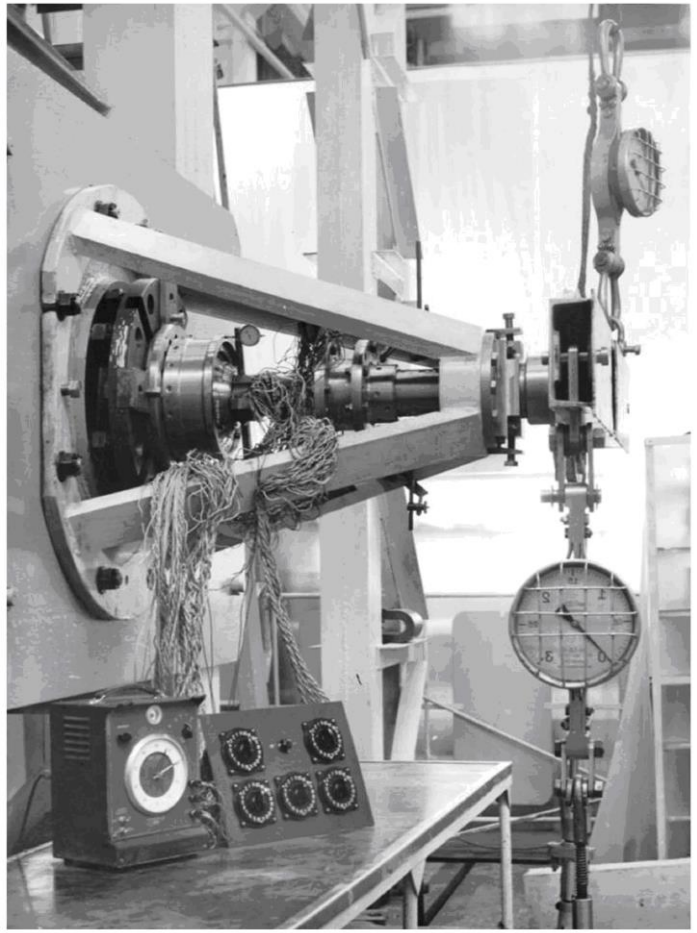




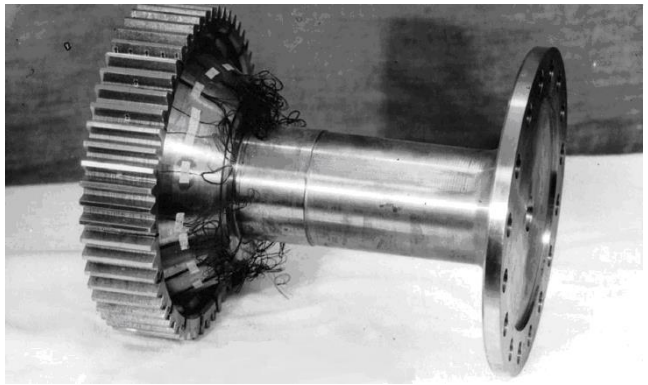
Залежності зменшення викидів NO_X і SO_X при охолодженні ЕХМ (ζ = 0,3) від доби рейсової лінії Одеса-Шанхай суховантажного судна

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

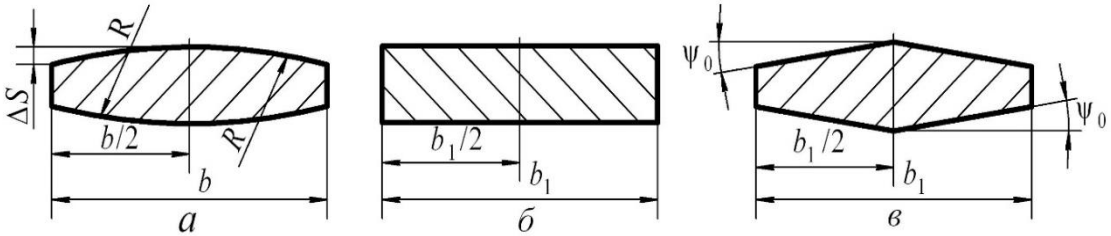
Стенд для експериментальних досліджень зубчастих муфт



Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження зубчастих муфт в статичних умовах



Досліджувана втулка з бочкоподібними зубами і розміщеними на них тензодатчиками і досліджувана обойма



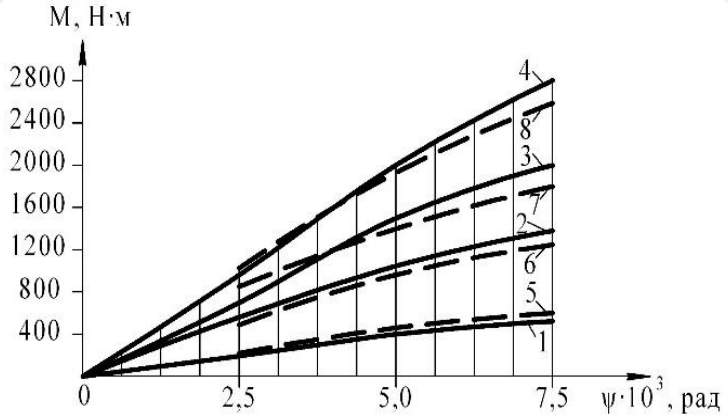
Перерізи зовнішнього бочкоподібного зуба втулки (*а*) і внутрішніх прямого (*б*) і скошеного (*в*) зубів обойми

Експериментальні величини пружних згинальних моментів від неврівноважених зусиль визначалися

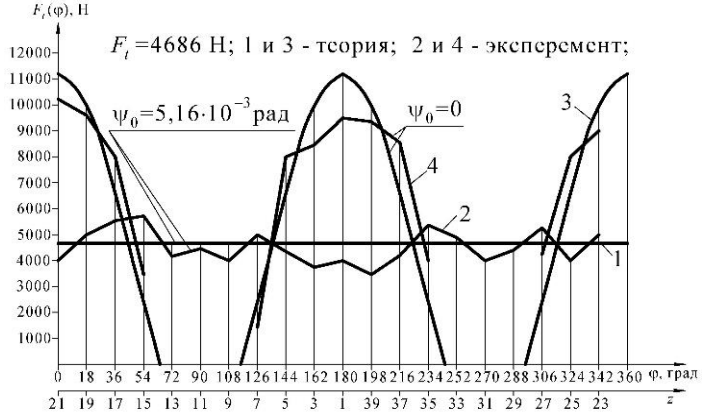
$$M = \frac{\varepsilon_{Li}\pi E(S - L_i)(1-\alpha^4)D_н^3}{32(1-\nu^2)S}$$

Експериментальних зусиль на зубах визначалися за формулою

$$F_э = \frac{\varepsilon_i S^2 E}{6(1-\nu^2)K_м K_\sigma}$$

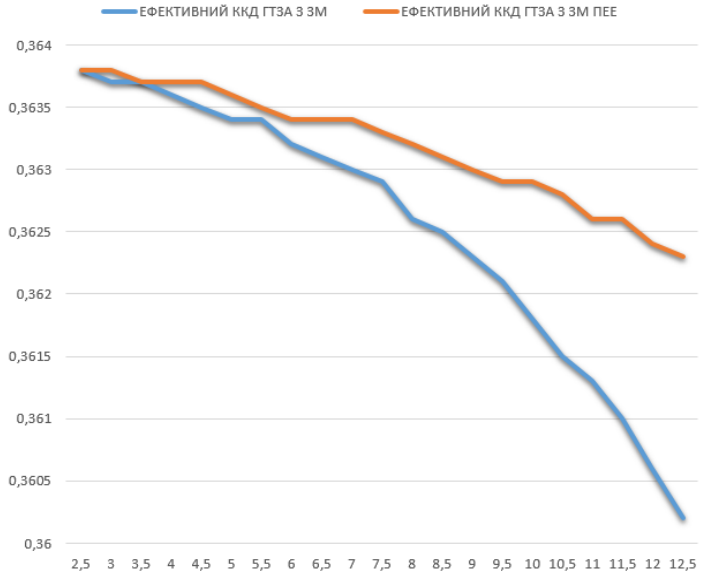


Теоретичні 1 – 4 і експериментальні 5 – 8 криві згинальних моментів при ψ_0 = (1,72; 3,44; 5,16)·10^{-3} рад в залежності від кута ψ і навантаження F_t.

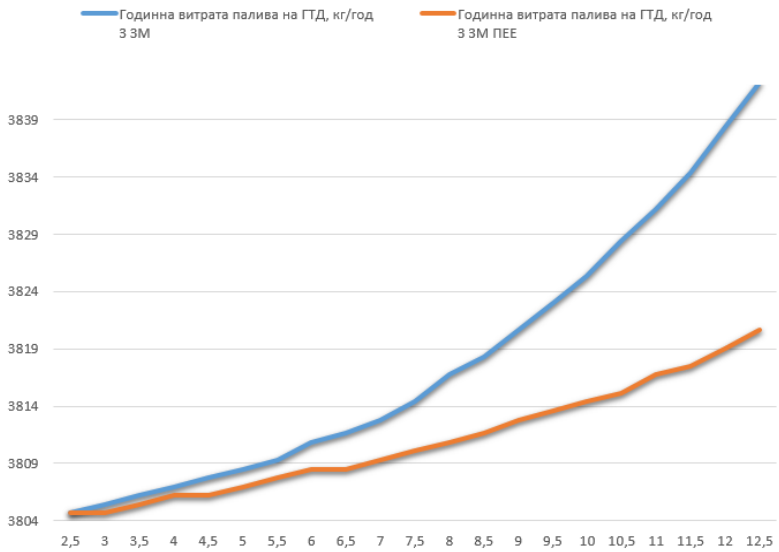


Розподіл зусиль між зубами при ψ_0 = 5,16·10^{-3} рад; ψ = 7,5·10^{-3} рад (лінії 1 і 2) і при ψ ψ_0 = 0; y = 7,5·10^{-3} рад (лінії 3 і 4)

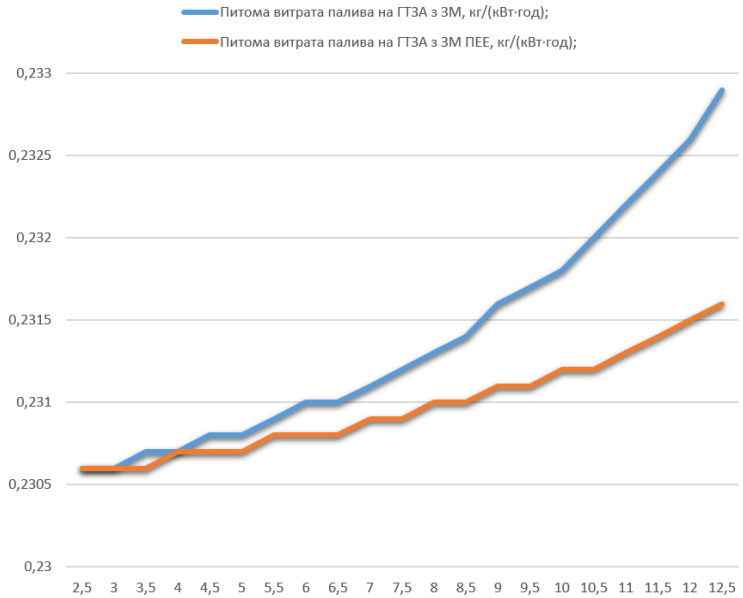
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА



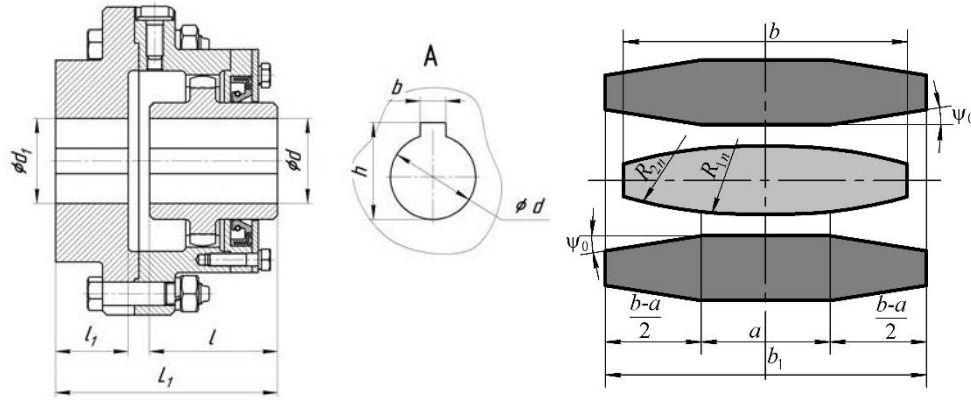
Залежність зміни ефективного ККД ГТЗА при збільшенні кута перекосу осей з'єднувальних валів в діапазоні $\psi = (2{,}5\text{-}12{,}5)\cdot 10^{-3}$ рад



Залежність годинної витрати палива газотурбінного двигуна в залежності від збільшення кута перекосу осей з'єднувальних валів ГТЗА в діапазоні $\psi = (2{,}5\text{-}12{,}5)\cdot 10^{-3}$ рад

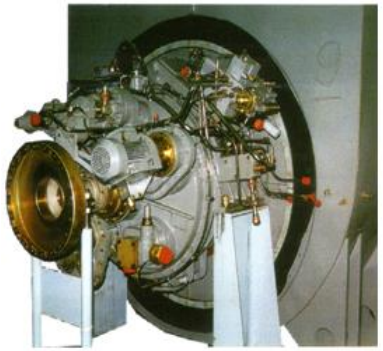


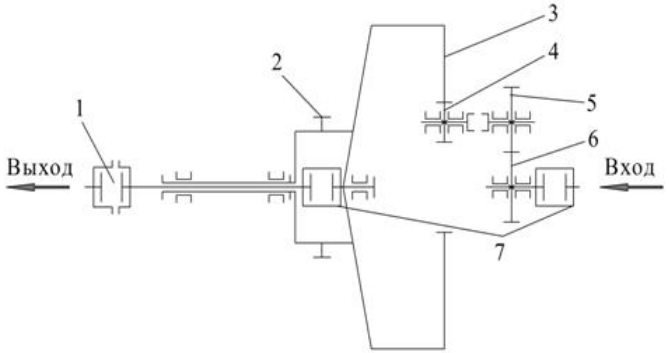
Залежність питомої витрати палива ГТЗА в залежності від збільшення кута перекосу осей з'єднувальних валів в діапазоні $\psi = (2{,}5\text{-}12{,}5)\cdot 10^{-3}$ рад



Загальний вигляд зубчастої муфти типу МЗП і переріз зубів з поздовжньою модифікацією бічних твірних поверхонь

Загальний вигляд зубів втулки





Загальний вигляд вбудованого редуктора і його кінематична схема:
1 - муфта граничного моменту; 2 - приводний шестерня; 3 - ведене колесо; 4, 5 - проміжна шестерня; 6 - ведуча шестерня; 7 - зубчаста муфта

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Розроблено зубчасті передачі з точковою системою зачеплення зубів, із підвищеною навантажувальною здатністю, зменшеними вегогабаритними показниками і поліпшеними віброакустичними характеристиками, що досягається за рахунок заміни прямолінійних твірних бічних поверхонь зубів шестерні на криволінійні з постійним радіусом кривизни

Стан готовності розробки

Створено експериментальний зразок, який пройшов випробування

Перевірка працездатності зубчастої передачі

Для перевірки працездатності запропонованої зубчастої передачі був використаний II ступінчастий редуктор, у якого I ступінь була виконана з точковим зачепленням зубів, причому довжина зубів була зменшена в 1,75 рази.

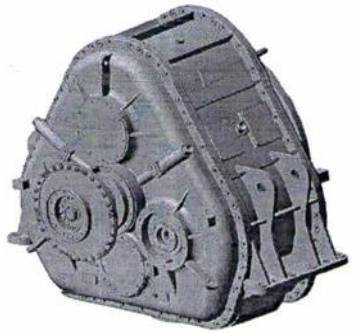
При цьому навантажувальна здатність I ступені редуктора з точковим зачепленням зубів по контактним напруженням була вища за таку I ступені редуктора з лінійним контактом зубів в 2,3 рази, а по напруженням вигину - в 1,6 рази. Крім того, зниження рівня вібрації і шуму склало 12 децибел. Редуктор в процесі випробувань відпрацював $128 \cdot 10^6$ циклів, і показав при цьому відмінні експлуатаційні якості.

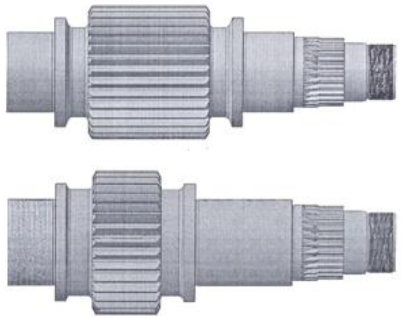
Перевірка точкового контакту зубів у статиці

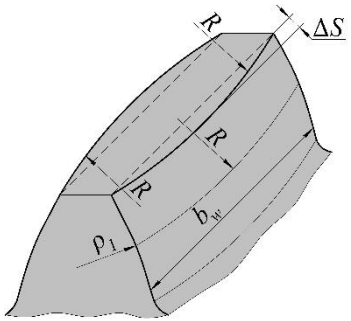
У запропонованій зубчастої передачі точковий контакт зубів в процесі навантаження перетворюється в еліптичну ділянку контакту з малою *a* і великою *b* півосями еліпса.

Для перевірки розрахункових величин *a* і *b* були проведені статичні випробування на спеціальному пристрої шляхом стиснення між собою кругового і бочкоподібного циліндрів силами F_n = (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0)·10^4 Н.

Знайдені при цьому, шляхом замірів, величини півосей *a* і *b* в межах ± 2,5% збіглися з розрахунковими величинами зазначених півосей.







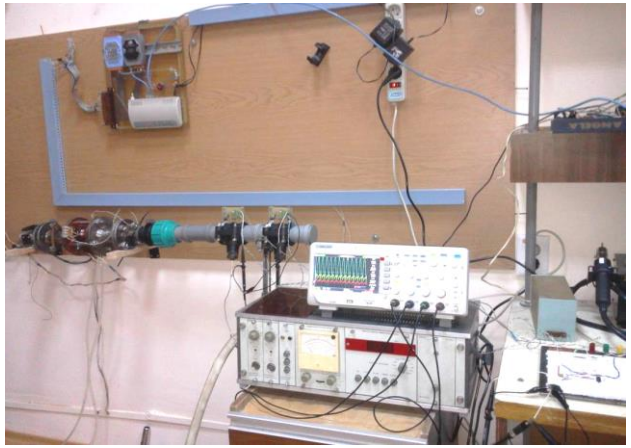
Основні переваги розробки

1. Навантажувальна здатність зубчастих передач по контактним напруженням і по напруженням вигину вище традиційних зубчастих передач відповідно в 2,3-3,2 і в 1,45-1,65 рази.
2. Для вказаних передач характерно істотне зменшення вагогабаритних показників. Так, наприклад, в суднових редукторах, котрі передають потужності від 16500 кВт до 26500 кВт, можна зменшити їх вагу з 34-56 т до 23-38 т, тобто на 11-18 т.
3. У передачах з точковою системою зачеплення зубів можливе зниження шуму на 10-25 децибел і вібрації з 90-95g до 30-35g.
4. При хороших умовах змащення і твердості зубів HRC ³ 60 при точковому зачепленні зубів допустимі контактні напруження в 1,5-2 рази вище ніж при лінійному контакті зубів.

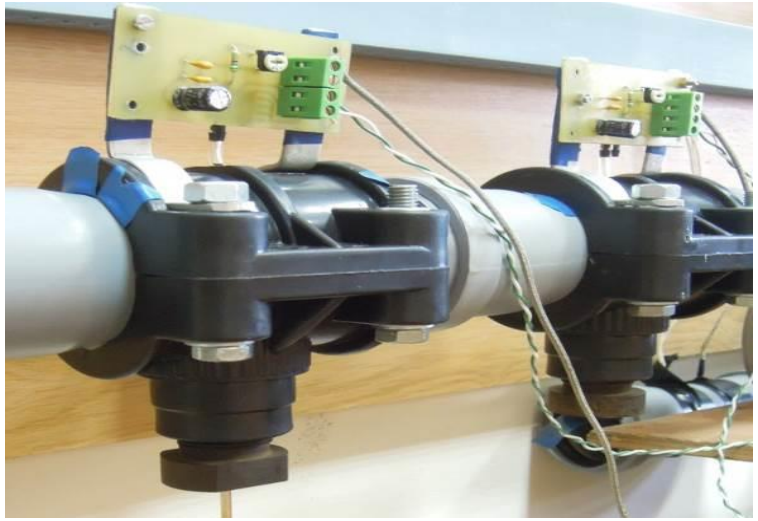
Тип редуктора	Потужність	Лінійний контакт	Точковий контакт
	N, кВт	m, т	m, т
Р055	26500	56000	37333
Р057	18380	55000	36667
Р058	17020	37000	24667
РБ54	16550	34000	22667
РБ52	7353	25000	16667
Р025	16550	19000	12667
Р063	6250	16000	10667
Р1Д50	14706	3500	2333
Р076	3676	2900	1933
РД77	8824	2850	1900
РД50	14706	2500	1667

Вид контакту	Евольвентне зачеплення (лінійний контакт)				Евольвентне зачеплення (точковий контакт)			
Тип редуктора	N, кВт	Масса m, кг	Висота, м	ξ, кг/кВт	N, кВт	Масса m, кг	Висота, м	ξ, кг/кВт
Р076	3676	2900	1,39	0,789	3676	2000	0,960	0,544
РД77	8824	2850	1,54	0,323	8824	1966	1,100	0,223
РД50	14706	2900	1,60	0,170	14706	2130	1,143	0,118
Р1Д50	14706	3500	0,95	0,238	14706	2414	0,680	0,164
Р034-1	4412	1200	1,45	0,272	4412	828	1,036	0,188
Р034-2	1471	454	0,90	0,309	1471	326	0,643	0,222
Р035-10	7353	1674	1,47	0,228	7354	1196	1,050	0,163
Р035-20	7353	790	1,58	1,106	7353	558	1,229	0,077
Р071	7353	600	1,69	0,089	7353	429	1,207	0,059
Р1071	5147	650	0,65	0,129	5147	465	0,465	0,00903
Р2072	3088	450	2,02	0,146	3088	322	1,443	0,104

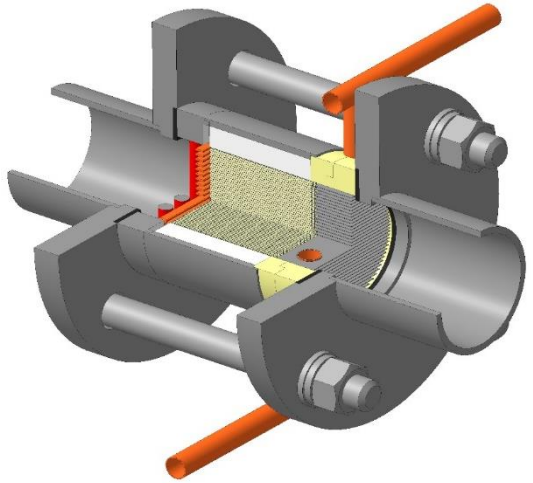
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА



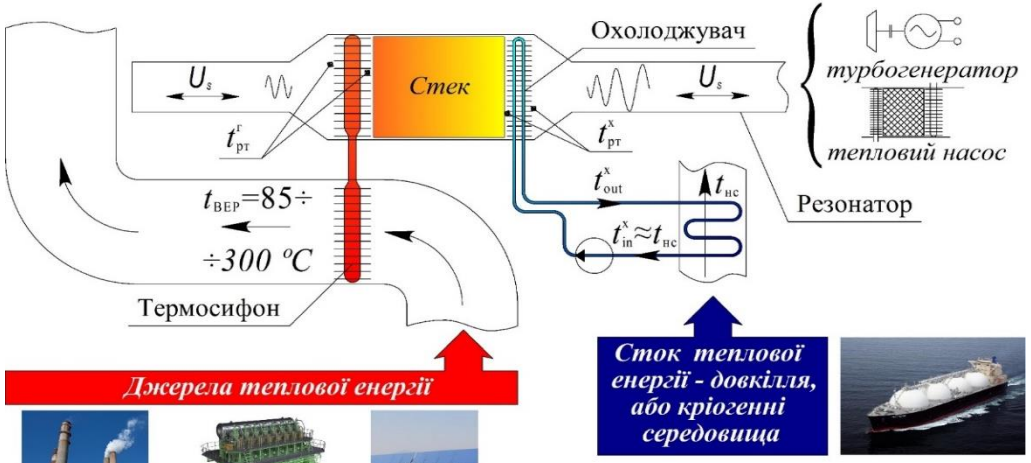
Загальний вигляд експериментальної установки ТАД



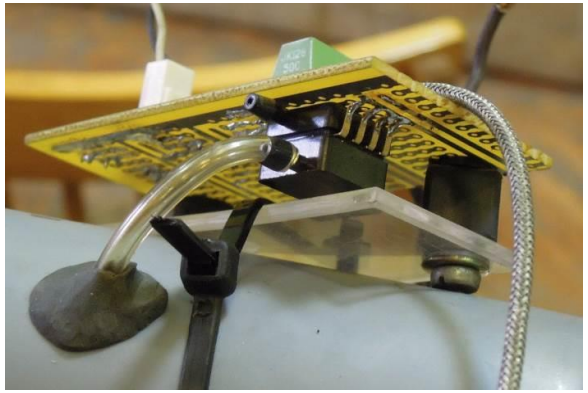
Комбінований блок датчиків термоанемометру та акустичного тиску встановлений на резонаторі дослідного ТАД

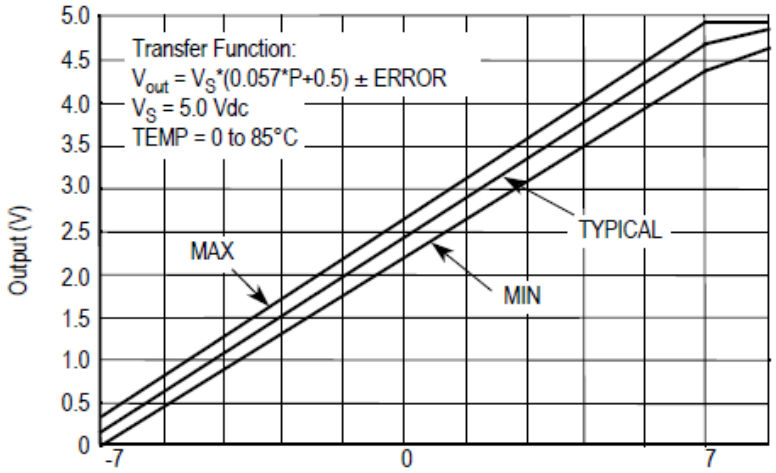


Модуль термоакустичного перетворювача



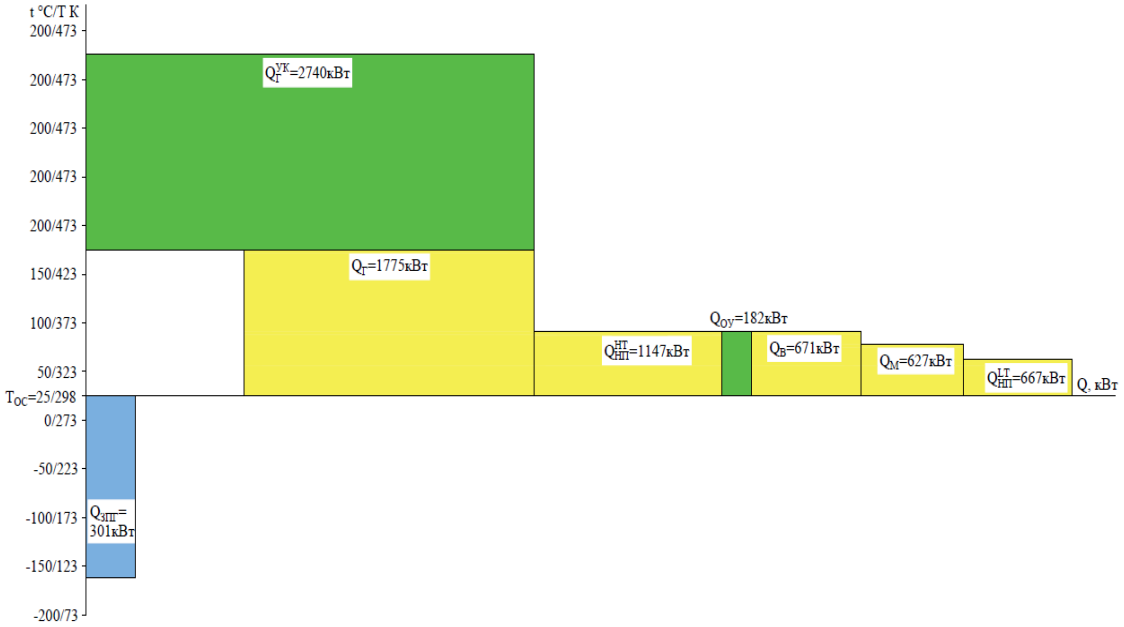
Принципова схема системи утилізації ВЕУ ЕУ з гравітаційними термосифонами в ТАТМ

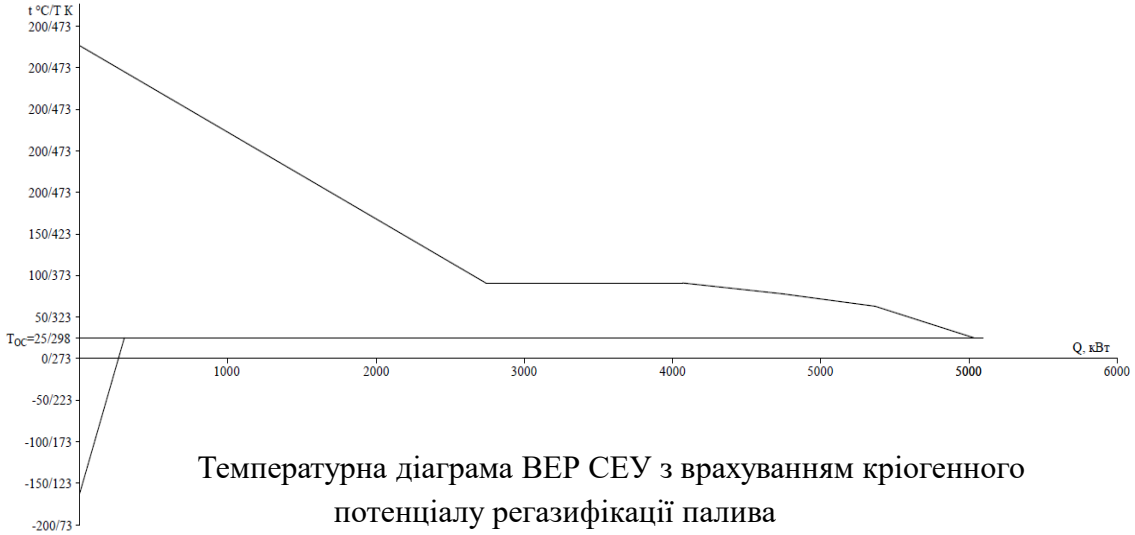




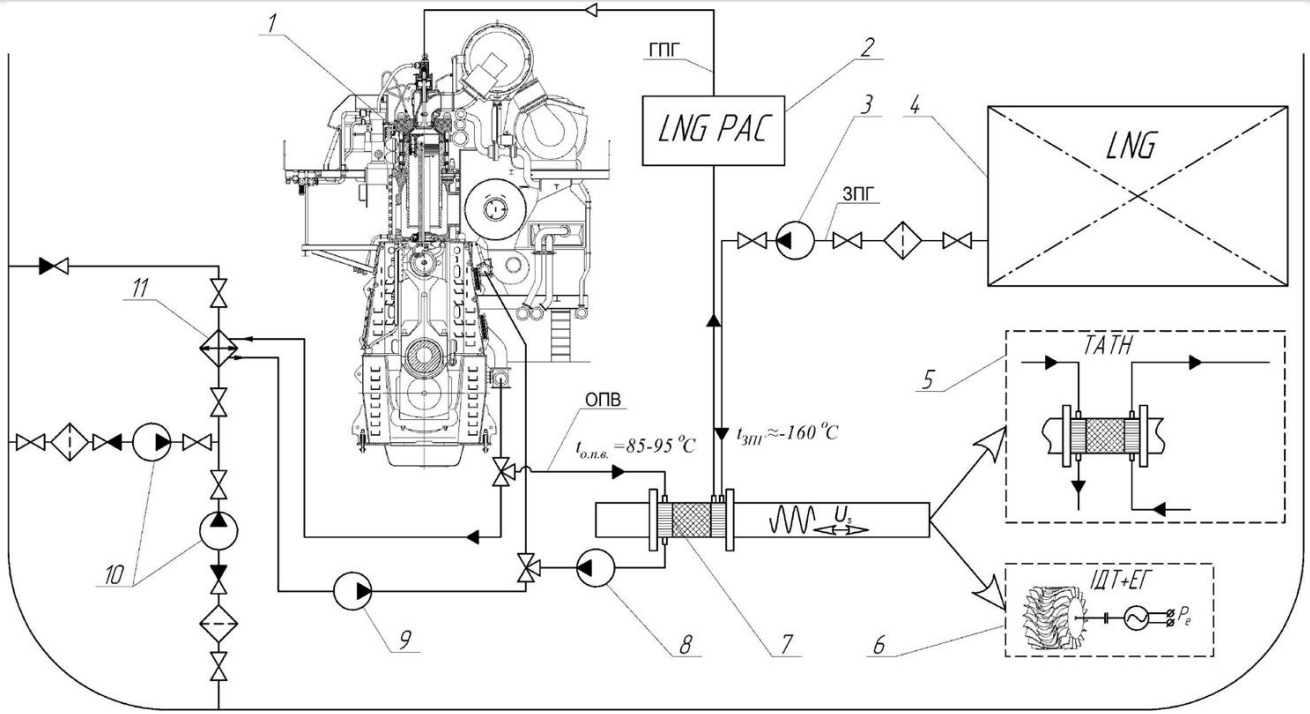
Датчик вимірювання тиску MPXV7007DP та залежність вихідної напруги датчика від тиску, що вимірюється

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

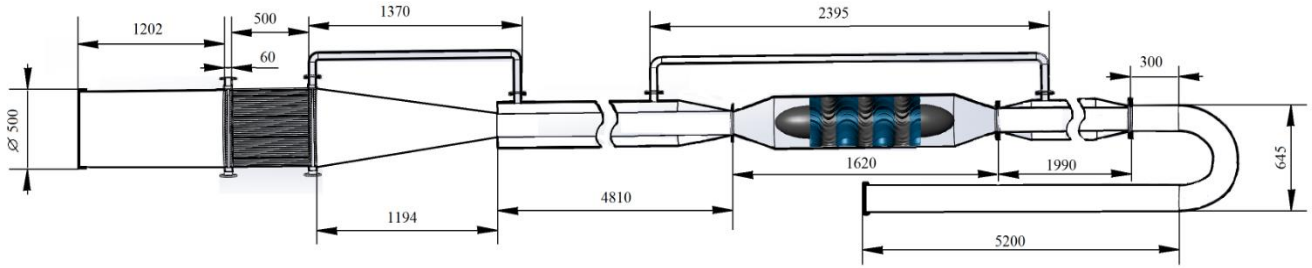




Температурна діаграма ВЕР СЕУ з врахуванням кріогенного потенціалу регазифікації палива



Принципова схема утилізації ВЕР суднової енергетичної установки з енергогенеруючою «кріогенною» ТАТМ: 1 – МОД, 2 – LNG PACK, 3- бустерний насос LNG палива, 4 – ємності з LNG паливом, 5 - корисне навантаження



Поперечний переріз спроектованої утилізаційної установки на базі ТАТМ з імпульсною двонаправленою турбіною в якості корисного навантаження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено концепцію підвищення ефективності суднових енергетичних установок у складі пропульсивних комплексів виробництва механічної енергії в суднових головних двигунах внутрішнього згоряння 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 ресиверу у впускний ресивер на вході в циліндри 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 вал зубчастими муфтами з рівномірним розподілом зусиль між спряженими парами зубів, як наслідок, зменшення витрат на ремонт і вірогідності виникнення аварійних ситуацій через перекос осей з’єднуваних валів.

2. Вперше експериментально доведена доцільність використання стартового нагрівача примусового запуску термоакустичних теплових машин (ТАТМ), на основі додаткового електричного нагрівача, при роботі на часткових або перехідних режимах суднової енергетичної установки (СЕУ), та за результатами натурних випробувань отримані напівемпіричні залежності питомої теплової потужності стартового нагрівача системи примусового запуску ТАТМ. Отримані залежності дозволяють стверджувати, що потужність системи примусового запуску повинна бути не менш, як 15% від потужності основного нагрівача МТП.

3. Розроблено систему утилізації кріогенних та низькотемпературних скидних теплових ресурсів суднових енергетичних установок на основі ТАТМ, що дозволяє утилізувати теплові ресурси в інтервалі робочих температур від -163 °С до 90 °С. Та в залежності від енергетичних потреб судна може бути застосована або підвищення температур інших робочих середовищ (в якості теплового насосу), або для вироблення електричної енергії, як найбільш універсального виду енергії.

4. Визначено принципи взаємного функціонування систем утилізації кріогенних та низькотемпературних скидних теплових ресурсів суднових енергетичних установок із застосуванням ТАТМ. Та на основі створеної математичної моделі в програмному середовищі DeltaEC (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% від підведеної теплоти, з виробленням електричної енергії до 40 кВт, тим самим зменшивши теплове забруднення від енергетичної установки на 1,2%.

5. 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.

6. 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%.

7. 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 газах 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.

8. Запропоновано та проаналізовано схемно-конструктивне рішення застосування ТХМ для попереднього охолодження повітря на вході головного суднового двигуна. Для забезпечення роботи ЕХМ пропонується використовувати теплоту вихлопних і рециркуляційних екологічних газів перед скрубером системи EGR.

9. Робота ЕХМ проаналізована із врахуванням змінних кліматичних умов протягом рейсу судна. Показано, що застосування ЕХМ для попереднього охолодження дозволяє знизити температури повітря на вході головного двигуна в середньому на $\Delta t_п$ = 5–10 оС, при тепловому навантаженні на генератор за рахунок теплоти вихлопних і рециркуляційних екологічних газів – $Q_г$ = 1450–1520 кВт.

10. Визначено, що зменшення питомої витрати палива двигуном при застосуванні ЕХМ складає в середньому Δg_e = 0,5–1,5 г/(кВт год), при цьому зменшення шкідливих викидів від роботи існуючої штатної системи рециркуляції – Δg_{NOx} = 29–35 %; Δg_{SOx} = 10–12 %.

11. Вперше науково обґрунтовано, що підвищення надійності, енергетичної ефективності та екологічності суднових енергетичних установок зі сполучними вузлами «двигун-муфта-вал-муфта-редуктор», шляхом зниження негативного впливу перекосів осей з'єднувальних валів, досягається застосуванням зубчатих муфт підвищеної експлуатаційної ефективності за рахунок поздовжньої модифікації зовнішніх зубів втулок та зовнішніх і внутрішніх зубів втулок та обойм, котра дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл зусиль та зубчастих передач з просторовою точковою системою зачеплення зубів.

12. В результаті досліджень, встановлено властивість зубчастої муфти з комбінованої поздовжньої модифікацією зубів, що полягає в тому, що при певних співвідношеннях між кутами скосів внутрішніх зубів і радіусами бочкоподібності зовнішніх зубів з урахуванням заданих величин кутів перекосу осей, розмірів зубчастих муфт і параметрів зачеплення зубів в процесі навантаження зубчастої муфти спостерігається рівномірний розподіл між зубами, котрий підтверджує нечутливість розглянутої зубчастої муфти до перекосів осей з'єднувальних валів головних машинних агрегатів.

13. Вперше встановлено і експерементально підтверджено, що розроблені зубчасті муфти в порівнянні з традиційними, в межах кутів перекосу осей з'єднувальних валів суднових енергетичних установокв, рівних $\psi = (2{,}5\text{-}12{,}5)\cdot 10^{-3}$ рад, не тільки залишаються працездатними, а й характеризуються збільшення терміну служби в 1,29-5,9 рази, зменшенням втрат потужності на тертя в 1,3-3 рази, підвищенням навантажувальної здатності в 1,23-3,92 рази, зниженням величин результуючих згинальних моментів в 1,12-4,38 рази, зменшенням рівня вібрації і шуму на 2-12 дБ.

14. 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, в межах кутів перекосу $\psi = (5\text{-}10)\cdot 10^{-3}$ рад, виражено у зниженні питомої витрати палива ГТЗА на 0,05-0,6 г/(кВт·год), економії годинної витрати палива головного двигуна на 1,5-11 кг/год, підвищенні ефективного ККД ГТЗА на 0,3-1,2%.

15. Розроблено зубчасті передачі з просторово точковою системою зачеплення еволвентних зубів, які характеризуються, у порівнянні із традиційними редукторами, підвищеною навантажувальною здатністю по контактним напруженням в 1,8-2,5 рази; зниженням впливу напружень вигину в 1,3-1,6 рази; стабілізованою формою плями контакту; зменшенням вагогабаритних показників до 26%; зниженням шуму на 10-25 дБ і вібрації з 90 - 95g до 30 - 35g,

16. Підвищення надійності, енергетичної ефективності та екологічності суднових енергетичних установок, за рахунок забезпечення норм центровок компенсуючими пристоями, призводить до поліпшення показників безвідмовності, довговічності та ремонтної придатності головних суднових агрегатів, зменшення вірогідності виникнення аварійних ситуацій і позапланових зупинок енергетичних установок на ремонт (забезпечуючи провізну здатність суден) та економії додаткових витрат.

17. Результати досліджень впроваджено у практику проектування та експлуатації суднових енергетичних установок з економічним ефектом понад 2 млн. грн. Враховуючи кількість суднових енергетичних установок, які експлуатуються на теперішній час, та відповідальність за перевезення вантажу економічний ефект від впровадження може обчислюватися мільярдами гривень (в залежності від типу судна, рейсу, вантажу та інш.)