

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

завідувача кафедри кондиціонування та рефрижерації  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова  
д.т.н., професора РАДЧЕНКА Миколи Івановича,  
на дисертаційну роботу Константінова Олега Ігоровича «Метод підвищення  
ефективності експлуатації суднової енергетичної установки шляхом утилізації  
теплоти охолодження головного чотиритактного двигуна»,  
подану на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

### **Актуальність теми дисертації.**

Дисертаційна робота Константінова О.І. присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності експлуатації суднових енергетичних установок шляхом використання низькопотенційної скиданої теплоти систем охолодження головних чотиритактних двигунів для виробництва електричної енергії за допомогою органічного циклу Ренкіна. Актуальність обраного напрямку досліджень не викликає сумнівів і обумовлена сучасними тенденціями розвитку морського транспорту.

Світове судноплавство перебуває на етапі масштабної трансформації, пов'язаної з реалізацією нової стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів. Введення показників ЕЕХІ, СІІ та інших екологічних інструментів змушує судовласників шукати рішення, які забезпечують зниження паливоспоживання вже існуючих енергетичних установок.

Серед найбільш перспективних напрямів підвищення енергоефективності суден важливе місце займають технології утилізації вторинної теплоти. Відомо, що лише 45–50 % хімічної енергії палива перетворюється на корисну механічну роботу, тоді як решта відводиться з відпрацьованими газами, охолоджувальною водою, мастилом тощо. Для середньооберткових чотиритактних двигунів частка теплоти, що відводиться системами охолодження, є досить значною, що створює передумови для її подальшого використання.

На відміну від високотемпературних джерел теплоти, таких як відпрацьовані гази, теплота охолоджувальної води характеризується більш низьким температурним потенціалом. Саме тому використання традиційних паросилових циклів для її утилізації є малоефективним. За таких умов однією з найбільш перспективних технологій є така, що базується на органічному циклі Ренкіна, що дає можливість утилізувати теплоту при температурах 70–100 °С.

В останні роки опубліковано значну кількість результатів досліджень, присвячених застосуванню технологій на основі органічного циклу Ренкіна у суднової енергетиці. Однак аналіз сучасних публікацій показує, що більшість робіт зосереджена переважно на дослідженні номінальних режимів роботи таких систем і недостатньо враховує особливості реальної експлуатації суден.

Саме ця обставина визначає наукову та практичну актуальність дисертаційної роботи. Автор цілком обґрунтовано виходить з того, що при аналізі доцільності впровадження суднових енергоустановок на основі органічного циклу Ренкіна необхідно враховувати не тільки потенціал джерел теплоти та характеристики циклу, а також і реальні річні профілі навантаження двигуна, температури забортної води, тип судна й обмеження встановленої потужності установки.

Отже, тема дисертації актуальна і відповідає сучасним напрямкам розвитку суднової енергетики..

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність та новизна**

Вагомою перевагою дисертаційної роботи є системний підхід до аналізу ефективності установок на основі органічного циклу Ренкіна у складі суднової енергетичної установки, відповідно і з урахуванням умов її експлуатації. То ж, на відміну від більшості досліджень, у яких система на основі органічного циклу Ренкіна розглядається як автономна, автор аналізує її як елемент суднової енергетичної установки, ефективність якого визначається не лише термодинамічними параметрами, але й умовами експлуатації судна.

Методологічною основою дослідження є поєднання класичного термодинамічного аналізу органічного циклу Ренкіна з аналізом реальних експлуатаційних режимів головного двигуна.

При проведенні досліджень автором використано:

- загально прийняті підходи до аналізу термодинамічних циклів і масового та енергетичного балансів;

- сучасні моделі термодинамічних і теплофізичних властивостей робочих тіл;

- характеристики реальної установки Climeon HeatPower 300 Marine, яка реалізує органічний цикл Ренкіна;

- експлуатаційні характеристики двигуна Wärtsilä 12V46F;

- реальні профілі навантаження суден різних типів.

Такий підхід забезпечує достатньо високий рівень практичної цінності та

достовірності отриманих результатів. Особливо слід відзначити, що дисертант відійшов від традиційного підходу, коли ефективність установки оцінюється лише на одному, номінальному, або декількох режимах роботи двигуна. Натомість запропоновано методичний підхід, який дозволяє інтегрувати результати термодинамічних розрахунків за річним профілем навантаження головного двигуна. Це дало можливість перейти від оцінки поточної ефективності до річних генерації електроенергії, економії палива та скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Саме цей аспект визначає наукову новизну дисертаційної роботи.

Важливим науковим результатом є також встановлення домінуючого впливу температури забортної води на енергетичну та екологічну ефективність системи на основі органічного циклу Ренкіна. З наукової точки зору даний результат є цікавим тим, що демонструє вирішальну роль температурних параметрів приймача теплоти у низькотемпературних циклах її утилізації. Отриманий висновок добре узгоджується з фундаментальними положеннями технічної термодинаміки, причому в роботі проаналізована величина ефекту саме для конкретних умов експлуатації системи на судах.

Ще одним важливим результатом є обґрунтування підходу до вибору встановленої потужності суднової установки утилізації вторинної теплоти на основі фактичного розподілу навантажень двигуна. У більшості відомих робіт потужність таких систем вибирається виходячи з максимального теплового потенціалу джерела теплоти. Автор переконливо показує, що такий підхід не завжди забезпечує максимальну річну ефективність установки і може призводити до нерациональних технічних рішень, спричинених завищеними встановленими потужностями.

Слід зазначити, що автором удосконалено методологічний підхід до термодинамічного та енергетичного аналізу суднових систем на основі органічного циклу Ренкіна шляхом урахування змінних параметрів джерела та приймача теплоти, режимів роботи двигуна та обмежених габаритів теплообмінного обладнання.

Позитивної оцінки заслуговує також те, що в роботі розглядаються не лише показники термодинамічного циклу, а й показники ефективності суднової енергетичної установки за певний період експлуатації – річна генерація електроенергії, економія палива та скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Такий підхід суттєво підвищує прикладну цінність отриманих результатів.

Загалом наукові положення, висновки та рекомендації дисертації є достатньо обґрунтованими, логічно пов'язаними між собою і підтверджені виконани-

ми розрахунками.

### **3. Практичне значення одержаних результатів**

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у створенні методологічного інструменту для оцінки доцільності впровадження установок утилізації вторинної теплоти на основі органічного циклу Ренкіна на морських судах різних типів.

Запропонований підхід може бути використаний:

- на етапі проектування нових суден;
- при модернізації існуючих судових енергетичних установок;
- при виборі параметрів систем утилізації вторинної теплоти;
- для прогнозування економії палива та скорочення викидів парникових газів;
- під час техніко-економічного обґрунтування інвестиційних рішень.

Особливої уваги заслуговує розроблений метод визначення раціональної встановленої потужності установки для конкретних типу судна та профілю навантаження головного двигуна.

Практичний інтерес становлять отримані автором результати оцінки потенційної економії палива та скорочення викидів CO<sub>2</sub> для різних типів суден. Вони можуть бути реалізовані при розробленні програм підвищення енергоефективності флоту на виконання вимог міжнародних екологічних нормативів.

Результати роботи також можуть бути використані в освітньому процесі при викладанні дисциплін, пов'язаних із судовою енергетикою, холодильними та теплоутилізаційними системами.

### **4. Оцінка змісту дисертації та її завершеності**

Структура дисертації є логічною та відповідає меті та завданням дослідження.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану проблеми, розглянуто вимоги ІМО щодо декарбонізації морського транспорту, проведено огляд сучасних технологій утилізації вторинної теплоти та визначено місце систем на основі органічного циклу Ренкіна у структурі судових енергетичних установок.

Другий розділ присвячено формуванню методичного підходу до дослідження. Автором обґрунтовано вибір базового двигуна Wärtsilä 12V46F, проаналізовано характеристики установки-прототипу та сформовано математичну модель дослідження.

Третій розділ містить результати термодинамічного аналізу системи. Про-

ведено порівняння різних конфігурацій циклу та робочих тіл, визначено раціональне схемне рішення для подальших досліджень.

У четвертому розділі виконано дослідження впливу експлуатаційних факторів на ефективність установки утилізації вторинної теплоти та проведено оцінку її річної ефективності для різних типів суден.

Висновки дисертації повністю відповідають поставленим задачам дослідження та випливають із отриманих результатів.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено поставлене науково-прикладне завдання.

## **5. Академічна доброчесність**

Аналіз тексту дисертації, публікацій автора та представлених матеріалів не дає підстав сумніватися у дотриманні принципів академічної доброчесності. Ознак академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації результатів досліджень не виявлено. Посилання на використані джерела оформлені належним чином.

## **6. Повнота викладення результатів у наукових публікаціях**

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені в наукових публікаціях автора. За темою дисертації опубліковано три статті у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, чотири фахові статті, матеріали міжнародних конференцій та патент України на корисну модель.

Результати досліджень пройшли апробацію на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях. Обсяг і рівень публікацій є достатніми для дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії.

## **7. Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Доцільно було б за отриманими автором даними з генерації електричної енергії (відповідно й економії палива) упродовж року побудувати кумулятивну характеристику у вигляді залежності річної генерації електричної енергії (економії палива) від навантаження системи утилізації на основі органічного циклу Ренкіна з метою визначення його раціональної величини, а відтак і потужності установки, які забезпечували б максимальний або близький до нього ефект.

2. Відсутній аналіз ефективності турбіни на часткових навантаженнях.

3. Потребує пояснення, чому автор у розділі 3 аналізує спочатку два робочих тіла: пентан і R134a, а у наступному розділі знову пентан, R245fa та R1233zd(E). Доцільно було б об'єднати такий аналіз.

4. В роботі не враховано, як будуть сумісно працювати запропонована система утилізації теплоти та суднові дизель-генератори. Генерація електроенергії запропонованою системою може призвести до нестабільної неефективної роботи дизель-генераторів.

5. В роботі наведена річна економія від впровадження розглянутої системи, яка складає від 55,2 до 156,6 \$США. Однак, така економія отримана лише завдяки скороченню витрат палива. При цьому не враховувалися витрати на монтаж та експлуатацію системи, що може нівелювати оцінений ефект.

6. Зниження емісії парникових газів оцінювалось лише завдяки скороченню споживання палива. При цьому не враховано ефект, отриманий завдяки скороченню теплових викидів.

Однак, наведені зауваження не мають принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## **8. Загальний висновок**

Дисертаційна робота Константінова Олега Ігоровича на тему: «Метод підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки шляхом утилізації теплоти охолодження головного чотиритактного двигуна» є завершеним самостійним науковим дослідженням, в якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок шляхом застосування установки на основі органічного циклу Ренкіна для утилізації низькопотенційної теплоти, відведеної при охолодженні головного чотиритактного двигуна.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю отриманих результатів, практичним значенням і рівнем виконання дисертаційна робота відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р. «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії», а її автор, Константінов Олег Ігорович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт.

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова



Микола РАДЧЕНКО