

ВІДГУК

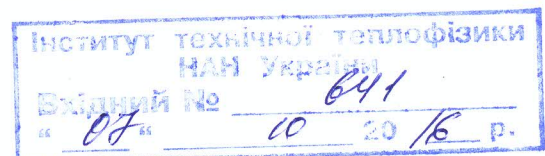
офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, в.о. головного наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Давиденка Бориса Вікторовича на дисертаційну роботу Богдана Юрія Олександровича «Теплообмін і гідродинаміка в теплообмінних апаратах з компактним розташуванням пучків труб для когенераційних установок на базі суднових поршневих двигунів внутрішнього згорання», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

В дисертаційній роботі Богдана Ю.О. розглядаються питання, що пов'язані з підвищенням ефективності роботи суднової енергетичної установки шляхом застосування когенераційних схем. Важливим елементом таких схем є теплообмінний апарат, призначений для утилізації теплоти відпрацьованих газів поршневих двигунів внутрішнього згорання. На основі проведеного в роботі експериментального аналізу газовипускного тракту когенераційної установки, а також розрахункових та експериментальних досліджень, розроблено нову конструкцію компактного теплообмінного апарата, призначеного для утилізації теплоти відпрацьованих газів поршневих двигунів внутрішнього згорання. Проведено аналіз гідродинамічних та теплообмінних процесів в розробленому теплообмінному апараті. Визначено його основні теплотехнічні характеристики та ступінь термодинамічної досконалості.

I. Актуальність теми дисертаційної роботи

Важливою проблемою для більшості сучасних енергетичних установок є застосування принципу когенерації. Його використання дозволяє підвищити як ефективність використання палива, так і коефіцієнт корисної дії установки у цілому. Перспективним слід вважати застосування когенераційних схем для суднових енергетичних установок, для яких характерними є високі значення температури відпрацьованих газів. Слід зазначити, що існуючі на сьогоднішній день схеми утилізації теплоти вторинних енергоресурсів для суднових поршневих двигунів внутрішнього згорання виявляються малоефективними та характеризуються низькою економічністю. Підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання за рахунок когенерації залежить від досконалості конструкцій його окремих елементів, зокрема теплообмінників-утилізаторів, що входять до складу когенераційних установок. Конструктивні особливості теплообмінників-утилізаторів та його режимні параметри суттєво впливають на енергетичну ефективність газовипускного тракту когенераційної установки.

Зважаючи на це, тему дисертаційної роботи, мета якої полягає у визначенні гідравлічної та теплової ефективності теплообмінних апаратів з компактним розташуванням пучків труб для когенераційних установок на базі суднових двигунів внутрішнього згорання, слід вважати важливою та актуальною.



II. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел зі 180 найменувань та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 220 сторінок машинописного тексту. Робота містить 80 рисунків та 16 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Приведено відомості про особистий внесок автора, апробацію, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

У *першому* розділі наведено результати аналізу літературних джерел, в яких розглядаються питання щодо енергозбереження, підвищення ефективності енергетичних установок та сучасного стану розвитку когенераційних технологій на водному транспорті. Визначаються основні поняття та принципи когенерації та наводиться класифікація когенераційних установок. Обговорюється проблема підвищення енергетичної ефективності установок, що створені на базі поршневого двигуна внутрішнього згоряння. Підкреслюється значимість аеродинамічної та теплообмінної досконалості конструкції теплообмінного апарата в системі газовипускного тракту когенераційної установки, який відіграє роль утилізатора теплоти відпрацьованих газів. Увага приділяється проблемі впливу теплообмінного апарата на роботу поршневого двигуна внутрішнього згоряння. Сформульовано основні задачі, які мають бути вирішеними при створенні компактного ефективного теплообмінного апарата для когенераційної установки. Розглядаються питання ексергетичного аналізу газовипускного тракту та математичного моделювання процесів теплопереносу в теплообмінному апараті.

За результатами аналізу літературних джерел автор визначає основні напрямки досліджень за темою дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено питанням ексергетичного аналізу газовипускного тракту когенераційної установки на базі поршневого двигуна внутрішнього згоряння. Розглядається методика розрахунку теплової та електричної потужності когенераційної установки. Складено рівняння теплового балансу для окремих її елементів. Результати розрахунків теплової та електричної потужності покладено в основу визначення енергетичної ефективності когенераційної установки. Її сумарний ККД знаходиться як відношення виробленої механічної або електричної та теплової енергії до кількості теплоти, що виділяється при згорянні палива. Як важливі показники ефективності роботи когенераційної установки розглядаються також коефіцієнт економії палива та ефективність теплообмінної поверхні теплообмінного апарата.

Як більш досконала, застосовується також методика ексергетичного аналізу основних модулів та компонентів когенераційної установки. Наведено загальні положення ексергетичного аналізу та прикладну методику ексергетичного розрахунку газовипускного тракту когенераційної установки. За цією методикою

визначено коефіцієнти ексергетичної ефективності кожного з компонентів газовипускного тракту та коефіцієнт ексергетичної ефективності газовипускного тракту у цілому. Розроблено критерій ексергетичної ефективності поверхні теплообміну в теплообмінному апараті, що дозволяє визначити ступінь її досконалості.

У третьому розділі наведено результати чисельного моделювання гідродинаміки і теплопереносу в теплообмінному апараті з компактним розміщенням трубних пучків, що призначений для утилізації теплоти відпрацьованих газів. Теплообмінний апарат, що розглядається, є важливим елементом газовипускного тракту когенераційної установки. Розглядаються особливості конструкції запропонованого теплообмінника, схема руху теплоносіїв та теплофізичні процеси, що протікають в даному апараті. Наведено систему вихідних диференціальних рівнянь гідродинаміки і теплопереносу, що застосовується для чисельного моделювання теплопередачі від нагрітих відпрацьованих газів до води (холодний теплоносій) в теплообмінному апараті.

За результатами чисельного моделювання визначено поля швидкості, тиску і температури в каналах пучків труб для різних геометричних характеристик теплообмінника. Розрахункові дослідження виконувалися для різних режимів роботи двигуна при різній частоті обертання колінчастого валу. Для кожного режиму визначався розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру труб 1...4 ряду пучка. Розглядалися випадки як коридорного розташування труб в пучку, так і більш компактного розташування труб зі зміщенням.

Проведено оцінку ефективності досліджуваних теплообмінних поверхонь. Ефективність визначається за відношенням кількості переданої теплоти в теплообміннику до сумарної потужності, що витрачається на прокачування теплоносіїв. Як інший критерій ефективності застосовується фактор аналогії Рейнольдса, що визначається як відношення інтенсифікації теплообміну до збільшення втрат тиску. За результатами аналізу розрахункових даних визначено геометричні характеристики пучків труб, що забезпечують найбільшу ефективність роботи теплообмінника. Визначено закономірності тепловіддачі від трубних пучків різного компонування та умови для інтенсифікації теплообмінних процесів.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням гідродинаміки і теплообміну в розробленому теплообмінному апараті. Сформульовано їх мету і задачі. Розглядається схема експериментальної установки та геометричні характеристики досліджуваної теплообмінної поверхні. Наведено перелік вимірювального обладнання та схему його підключення. Проведено оцінку похибок експериментальних досліджень. Наводиться методика проведення експерименту та обробки його результатів.

Результати експериментальних досліджень представлено у вигляді графічних залежностей безрозмірної температури від масової витрати відпрацьованих газів, їх швидкості та частоти обертання колінчастого валу двигуна. Наведено залежності безрозмірної кількості теплоти від частоти обертання колінчастого валу, а також перепаду тиску і числа Ейлера від числа Рейнольдса. Розглядаються також залежності осереднених по поверхні труби

коефіцієнтів тепловіддачі та чисел Нуссельта від витрати та швидкості відпрацьованих газів, а також від числа Рейнольдса.

Результати експериментальних досліджень порівнюються з результатами комп'ютерного моделювання. Відзначається їх задовільне узгодження.

П'ятий розділ присвячено питанням практичного використання і впровадження результатів дисертаційної роботи. Наведено результати порівняння технічних характеристик запропонованого в роботі теплообмінного апарата та теплообмінника традиційної конструкції. Відзначаються переваги нового теплообмінника по масовим та габаритним показникам в порівнянні з традиційними теплообмінниками за умов однакової теплової потужності. Проведено техніко-економічний розрахунок контуру утилізації теплоти когенераційної установки з запропонованим новим утилізатором теплоти. Розглядаються питання щодо можливості застосування розробленого теплообмінного апарата в системі когенерації суднового дизель-генератора.

У **висновках** наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

III. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній

- розроблено прикладну методику ексергетичного аналізу когенераційної установки на базі поршневого двигуна внутрішнього згорання. На її основі проведено комплексну оцінку ексергетичної ефективності її газовипускного тракту.

- розроблено теплообмінний апарат нової конструкції для утилізації теплоти відпрацьованих газів поршневого двигуна внутрішнього згорання, що характеризується покращеною ефективністю і техніко-експлуатаційними показниками порівняно з існуючими аналогами;

- за результатами чисельних досліджень визначено закономірності гідродинаміки та теплопереносу в компактних пучках труб теплообмінного апарата нової конструкції. Визначено вплив геометричних характеристик теплообмінних поверхонь на ефективність, компактність та габаритні показники зазначеного теплообмінного апарата;

- отримані нові експериментальні дані щодо середніх коефіцієнтів тепловіддачі компактних пучків труб при поперечному обтіканні теплоносієм. Визначено залежності теплообмінних характеристик для компактних пучків труб малого діаметру, що застосовуються в теплообмінному апараті нової конструкції, від динамічних та теплофізичних параметрів теплоносіїв.

IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

- розроблена методика ексергетичного аналізу когенераційних установок може застосовуватися для оцінки ефективності систем утилізації теплоти відпрацьованих газів поршневих двигунів внутрішнього згорання;

- на основі одержаних наукових даних можуть розроблятися нові компактні теплообмінні апарати для утилізації або охолодження теплоносіїв;

- технологія виготовлення розробленого теплообмінного апарата може застосовуватися при створенні нових типів даних пристроїв;

- на основі отриманих результатів можуть бути визначені перспективні напрямки щодо створення нових конструкцій теплообмінних апаратів, а також галузі їх застосування.

Отримані результати роботи були використані при проектуванні теплообмінних апаратів на ПАТ «Акціонерна компанія «Південтрансенерго» та при аналізі енергетичних установок на ДП «Укрводшлях».

Про практичне значення роботи свідчить також отриманий дисертантом зі співавторами патент України на винахід

V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

Достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується коректною постановкою задач дослідження, обґрунтованою постановкою задач чисельного моделювання, використанням надійної вимірювальної техніки для експериментальних досліджень і коректних методів математичної обробки експериментальних даних. Достовірність результатів підтверджується також задовільним узгодженням розрахункових результатів з даними експериментів, що одержані здобувачем.

VI. Повнота викладення наукових положень та висновків.

Основні положення дисертаційної роботи викладено у 26 друкованих наукових працях. З них 9 статей опубліковано у фахових наукових виданнях, 6 з яких включено до наукометричних баз даних. 14 робіт опубліковано у вигляді тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій. Опубліковано також 1 патент України на винахід.

Автореферат дисертації Богдана Ю.О. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертації.

VII. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація оформлена згідно вимог до оформлення. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

VIII. Зауваження до дисертації

1. В запису рівнянь динаміки турбулентної течії (3.9) є певні неточності. В правих частинах цих рівнянь повинні міститися похідні від компонентів тензора турбулентних напружень, як це видно, наприклад, з рівнянь (3.1). Рівняння ж у формі (3.9) справедливі лише за умов постійної величини динамічного коефіцієнту в'язкості, а рівняння Рейнольдса містять турбулентну в'язкість, яку не можна вважати постійною величиною. Рівняння динаміки (3.9), (3.10) записані для варіанту стисливої рідини, а рівняння енергії (3.11) - як для нестисливої (густина – постійна величина). У визначенні величини G_k , що входить до рівнянь k -ε моделі турбулентності (3.12), міститься описка. Треба зазначити, що ці неточності у цілому не впливають на результат чисельного моделювання, тому що розрахунки проводилися за допомогою програмного пакета ANSYS Fluent.

2. Граничні умови (3.13) записано в надто загальному вигляді. Вони повинні записуватися конкретніше, відповідно до розрахункової схеми, наведеної на рис. 3.1. Тобто, необхідно вказувати, які параметри потоку відпрацьованих газів задаються на вході в теплообмінний апарат (вказана тільки швидкість, а де температура?), а також які умови задаються на виході з теплообмінного апарата. Зважаючи на те, що рівняння (3.9) та (3.10) записані для моделі стисливої рідини, система вихідних рівнянь повинна доповнюватися рівнянням стану газового середовища. При цьому, хоча б в одній розрахунковій точці необхідно задати значення тиску. Доречніше значення тиску задавати в граничних умовах у вихідному перетині теплообмінного апарата. Тоді на рисунках (3.9), (3.14) та (3.18) шкали для визначення тиску не містили б негативні значення.

3. На рис. 3.27...3.35 наведено розподіли локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях перших чотирьох труб пучка. Як видно з графіків, за деяких значень поздовжньої або кутової координати на поверхні труби коефіцієнти тепловіддачі приймають нульові значення. Такий результат вимагає пояснення.

4. Для порівняння енергетичної ефективності різних теплообмінних поверхонь автор використовує фактор аналогії Рейнольдса, значення якого містить коефіцієнт гідравлічного опору досліджуваного міжтрубного каналу f . Але математичне визначення цієї величини відсутнє. Не вказано також, як ця величина визначається за результатами комп'ютерного моделювання.

5. На рис. 4.12...4.14 наведено залежності безрозмірної температури від масової витрати відпрацьованих газів, їх швидкості та від частоти обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання. Але що це за температура і як виконується її обезрозмірювання в дисертаційній роботі не сказано.

6. В четвертому розділі наведено залежності коефіцієнтів тепловіддачі та чисел Нуссельта від масової витрати відпрацьованих газів, їх швидкості та числа Рейнольдса. Коефіцієнти тепловіддачі та числа Нуссельта – величини пропорціональні. Тому можна було б обмежитися розглядом однієї з цих величин. Або, наприклад, залишити залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості (розмірні величина) та числа Нуссельта від числа Рейнольдса (безрозмірні величини).

7. В тексті дисертаційної роботи часто застосовуються різні системи одиниць фізичних величин, а також і несистемні одиниці. Наприклад, на сторінці 50 розмірність коефіцієнта теплопровідності визначається, як $\text{кДж}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град})$.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Богдана Юрія Олександровича «Теплообмін і гідродинаміка в теплообмінних апаратах з компактним розташуванням пучків труб для когенераційних установок на базі суднових поршневих двигунів внутрішнього згорання» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові

наукові результати щодо підвищення ефективності теплообмінного обладнання когенераційної установки. Робота виконана на сучасному науковому рівні, а одержані результати мають наукову новизну та практичну цінність. Сформульовані в роботі наукові висновки характеризуються високим ступенем обґрунтованості. На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Богдана Ю.О. відповідає вимогам пп. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567, а її автор, Богдан Юрій Олександрович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
в.о. головного наукового співробітника
Інституту технічної теплофізики НАН України



Б.В.Давиденко

Підпис доктора технічних наук Давиденка Б.В. засвідчую:
Вчений секретар
Інституту технічної теплофізики НАН України
кандидат технічних наук



О.І.Чайка