

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Вербовського Валерія Степановича

«Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією»

подану на здобуття науковою ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – «Двигуни та енергетичні установки»

Актуальність обраної теми. Загальновідомо, що подальший розвиток двигунів внутрішнього згоряння, рівно як і удосконалення конструкцій, які знаходяться в експлуатації, безпосередньо пов'язані зі зменшенням впливу на довкілля в широкому сенсі. Окремими і взаємозв'язаними проблемами тут є мінімізація шкідливих і токсичних викидів, покращення економічних показників, та відповідно, зменшення продукування парникових газів та долі неефективно використаної теплоти, а також мінімізація витрат на експлуатацію, діагностування, технічне обслуговування, ремонти та утилізацію. Таким чином, загальною проблемою енергетичних установок, та двигунів внутрішнього згоряння зокрема, є отримання суспільно необхідних обсягів механічної енергії при мінімізації суспільних витрат і втрат в життєвому циклі конструкцій.

Одним з напрямів, що швидко розвивається при використанні енергетичних установок і відповідає розв'язанню вище означених проблем, є застосування акумуляторів тепла (або теплових акумуляторів) як пристроїв, що забезпечують процеси акумулювання, зберігання і звільнення теплової енергії відповідно до вимог споживача. Подана до захисту дисертаційна робота націлена на отримання нових науково-прикладних результатів щодо накопичення скидної теплової енергії при роботі двигуна, яка буде використана під час відключення енергопостачання та в пусковий період.

При створенні газових двигунів та конвертації двигунів внутрішнього згоряння для роботи на газі виникають проблеми, пов'язані з необхідністю збереження його експлуатаційних характеристик. Якщо рішенням задач із забезпечення чи збереження потужності двигуна присвячена значна кількість досліджень, то стосовно пуску та прогріву газових двигунів приділено суттєво менше уваги. Тому тематику дисертаційної роботи доречно конкретизовано до завдань, пов'язаних з удосконаленням передпускової теплової підготовки та інтенсифікації прогріву стаціонарних газових двигунів.

Одним з ефективних заходів, що забезпечують скорочення часу пуску і прогріву двигуна та, як наслідок, зменшення витрати палива і викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами та збільшення параметричної надійності конструкції, є організація передпускового і післяпускового підігріву робочих рідин систем охолодження і мащення, а також відповідних елементів конструкції двигуна. Враховуючи особливості роботи стаціонарних газових

двигунів у складі систем базового, пікового та резервного енергопостачання слід зазначити, що ефективним рішенням тут є утилізація невикористаної теплової енергії, яка виділяється при згорянні палива. Вказане визначає значущість для двигунобудівної галузі дисертаційного дослідження, яке спрямоване на вибір і обґрунтування параметрів теплової передпускової та післяпускової підготовки систем газового двигуна за рахунок власної попередньо акумульованої теплової енергії і, саме тому, дисертаційна робота є **актуальною**.

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідницькою тематикою кафедри «Теплотехніка і теплові двигуни» Українського державного університету залізничного транспорту. Робота виконувалась відповідно до Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243, із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 587 від 14.07.2010, № 447 від 27.04.2011, № 105 від 25.01.2012. Наукові результати, що представлені в дисертації, отримані і використані в процесі виконання науково-дослідницьких робіт із державною реєстрацією, а саме: «Розробка і дослідження теплового акумулятора фазового переходу і системи комбінованого прогріву на основі двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14)», номер держреєстрації 0113U003625; «Дослідження системи передпускового розігріву газового двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14)», номер держреєстрації 0113U007127; «Розробка і дослідження теплового акумулятора фазового переходу транспортного засобу», номер держреєстрації 0119U101027.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна спираються на наступне.

Обґрунтованість отриманих результатів в першу чергу базується на чіткій узгодженості сформульованих теми і мети роботи (як скорочення часу забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів за рахунок використання акумульованої теплової енергії) та логічно сформульованих для досягнення поставленої мети задач (огляд інформаційних джерел; розробка принципової схеми та конструкції системи теплової акумуляції, розробка методики проведення досліджень та оцінювання ефективності прийнятих рішень, виконання теоретичних досліджень; проведення необхідних експериментальних досліджень; розробка методу раціональної теплової підготовки двигуна; розробка практичних рекомендацій щодо застосування результатів роботи). Слід відзначити, що чітке формулювання поставлених і вирішених задач суттєво підвищує вагомість ґрунтовності результатів і рекомендацій та звільняє їх від певної невизначеності, а неодмінні посилання по тексту роботи на власні публікації та інші джерела необхідної інформації суттєво спрощують перевірку прийнятих модельних уявлень і спрощень досліджуваних процесів, прийнятих припущень.

Методологічно задачі поставлені вірно, хоча можна зауважити, що другу задачу, яка фактично є теоретичною базою роботи, можна було би подати не у вигляді декількох речень, а явно вказати на необхідну і достатню сукупність підзадач.

Об'єкт та предмет дослідження відповідають темі роботи та сформульованим задачам.

На обраній методологічній основі в дисертаційному дослідженні досягнуто необхідного взаємозв'язку між аналітичною, теоретичною та дослідницькою частинами.

Для вирішення поставлених в дисертації задач здобувач запропонував і обґрунтував схемне і конструктивне рішення системи прогріву газового двигуна, виконав низку розрахункових та експериментальних досліджень, провів моторні випробування двигуна, оснащеного дослідною системою прогріву. Розробив технічні та технологічні рекомендації щодо можливості використання скидної до довкілля теплової енергії у теплових акумуляторах фазового переходу.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження базується на використанні фундаментальних положень теорії двигунів внутрішнього згоряння, термодинаміки, тепломасообміну, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичній суті процесів, що описуються, і як висновок – коректністю модельних уявлень, математичних постановок та процедур математичного аналізу. У цілому математичний апарат використано достатньо грамотно.

У виконаних розрахунках процесів, що супроводжують прогрів двигуна, застосовано необхідні дані, які отримані експериментально. За результатами моторних випробувань стаціонарного газового двигуна визначено показники паливної економічності та характеристик зміни параметрів стану робочих речовин у системах двигуна, що виконано методичне вірно. У цілому достовірність експериментальних даних забезпечено використанням апробованих методів і засобів проведення випробувань.

Слід погодитись з формулюванням *наукової новизни дисертаційної роботи*, а саме:

1. Вперше запропоновано метод забезпечення раціональної теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії (СТП), у варіантах його застосування за багатоцільовим призначенням, що відрізняється від існуючих урахуванням особливостей теплової підготовки двигуна в залежності від використання за цільовим призначенням.

2. Вперше створено загальний метод отримання, обробки і дослідження результатів і залежностей часу прогріву від елементів СТП в різних комбінаціях її функціонування, паливної економічності та екологічних показників стаціонарного газового двигуна при застосуванні у варіантах багатоцільового призначення.

3. Удосконалено математичну модель робочого процесу системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна в

складі підсистем контактного теплового акумулятора та накопичувача моторної оливи з тепловими акумуляторами фазового переходу, з удосконаленою підсистемою одночасного прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини, що відрізняється від існуючих здатністю забезпечувати системний прогрів двигуна з варіантами можливої взаємодії між собою.

4. Дістав подальшого розвитку спосіб скорочення часу прогріву і покращення паливної економічності стаціонарних газових двигунів в режимах передпускового і післяпускового прогріву та зберігання двигуна за рахунок використання акумуляованої теплової енергії.

Також до наукової новизни доцільно віднести встановлені автором чисельні дані щодо темпу і часу прогріву газового двигуна 6Ч12/14 при застосуванні системи теплової підготовки з використанням теплових акумуляторів.

Висновки дисертаційного дослідження засвідчують, що поставлені в роботі задачі та сформульована мета є повністю досягнутими.

Дисертаційне дослідження має чітку практичну направленість та засвідчує, що створення ефективної системи теплової підготовки двигуна на основі застосування теплових акумуляторів є складною науковою задачею. Більшість основних висновків по роботі несе чисельну інформацію щодо ефективності обраних підходів та технічних рішень. Тому *значущість роботи для науки й практики* є очевидною.

Схема одночасного передпускового прогріву охолоджуючої рідини та моторної оливи, вибір матеріалів для системи теплового акумулявання, математична модель прогріву газового двигуна з тепловим акумулятором були використані при виконанні науково-дослідних і проектних робіт в Інституті газу НАН України.

Матеріали дисертаційного дослідження використані в ТОВ «Теплосоюз Україна» при проектуванні систем когенерації з двигунами, що працюють на альтернативних газових паливах.

Слід відзначити, що вагомість запропонованих технічних рішень також підтверджена дев'ятьма патентами України на винахід та корисні моделі; розроблені математичні моделі реалізовані у вигляді дев'яти програмних продуктів, внесених до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення України; дві комп'ютерні програми та алгоритм формування оперативної готовності двигуна внутрішнього згорання захищені Свідоцтвами України про реєстрацію авторського права.

В перспективі слід очікувати поширення результатів дослідження на інші типи стаціонарних двигунів та двигунів інших призначень.

Вагомо, що результати досліджень можуть бути застосовані щодо двигунів, які вже знаходяться в експлуатації. Такий підхід до результатів роботи слід розглядати як прискорений шлях зменшення техногенного навантаження енергетичних установок з двигунами внутрішнього згорання на довкілля та покращення тактико-технічних характеристик останніх.

Водночас викликає запитання відсутність в дисертації відомостей щодо впровадження результатів роботи в навчальний процес, наприклад,

Українського державного університету залізничного транспорту, де виконувалась робота. Також результати дисертаційного дослідження слід рекомендувати до використання в навчальному процесі інших закладів вищої освіти, де здійснюється підготовка здобувачів за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування», зокрема за освітніми програмами, пов'язаними з проектуванням та експлуатацією двигунів внутрішнього згорання.

Повнота викладення основних наукових положень і результатів в опублікованих працях є достатньою. Матеріали дисертаційного дослідження опубліковано в 21 науковій праці, з яких одна є монографією, 6 подано у фахових виданнях України, 4 статті – в іноземних виданнях, з них одна індексована в Scopus, 4 – у матеріалах науково-технічних конференцій. Три праці видані одноосібно. Результати роботи достатньо повно апробовані на науково-технічних конференціях і є відомими широкому загалу фахівців.

Автореферат в цілому ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації та достатньо повно відображає сформульовані в ній основні наукові результати, що отримані здобувачем.

Оцінка змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається з переліку скорочень і умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел, п'яти додатків. Загальна кількість сторінок – 268. Список використаних джерел складає 143 найменування.

Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам. Виклад змісту і результатів досліджень виконано досить лаконічно, логічно і аргументовано.

У вступі стисло подано сутність і стан наукової проблеми, означено тему дисертаційної роботи та її актуальність, сформульовано мету та основні задачі, наведено особистий внесок здобувача в роботу, наведено інші обов'язкові дані щодо виконаного дослідження.

У першому розділі, «Аналіз результатів робіт із забезпечення теплової підготовки двигунів внутрішнього згорання в низькотемпературних умовах експлуатації», розглянуто вплив температури довкілля на ефективність пуску і роботи двигунів внутрішнього згорання, подано аналіз досліджень впливу умов експлуатації на час прогріву двигунів, виконано аналіз запропонованих рішень з підвищення ефективності експлуатації двигунів в низькотемпературних умовах. Подані складові аналізу виконані достатньо детально і якісно. Зроблено висновок про доцільність використання теплоти відпрацьованих газів для передпускового і післяпускового підігріву у тепловому акумуляторі.

Зауваження до першого розділу:

- в роботі відсутнє визначення чисельної межі для поняття низькотемпературних умов експлуатації двигунів, тим більше, що і в першому розділі, і в роботі в цілому питання пуску і прогріву двигуна розглядаються і для мінусових, і для плюсових температур;

- у розділі відсутні дані щодо відповідних досліджень закордонних науковців і фірм (окрім Російської Федерації), хоча виходячи з численних отриманих патентів автором такий аналіз виконувався;

- у розділі фактично апріорі прийнято до розгляду тепловий акумулятор фазового переходу, класифікація і аналіз відомих теплових акумуляторів за їх певними ознаками відсутні;

- також відсутнє висвітлення особливостей роботи і пуску газових двигунів зі зовнішнім сумішоутворенням.

У другому розділі, що має назву «Удосконалена методика розрахунку процесів забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів використанням акумуляованої енергії», запропоновано принципову схему системи теплової підготовки газового двигуна з акумуляторами теплоти та варіації її використання; здійснено вибір методу визначення показників стаціонарного газового двигуна, оснащеного системою теплової підготовки з акумуляторами теплоти на основі фазових переходів; розкрито сутність удосконалення методики розрахунку процесів забезпечення теплової підготовки охолоджуючої рідини і моторної оливи в процесі здійснення передпускового і післяпускового прогріву двигуна використанням акумуляованої енергії. Удосконалена методика, що подана автором, включає дев'ять сформульованих відмінностей, усі з яких стосуються врахування запропонованої схеми системи теплової підготовки двигуна. У розділі також наведено основні рівняння, що відповідають розрахунку досліджуваних процесів та надано методичку і задекларовано результати перевірки адекватності основних залежностей удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки двигуна.

Зауваження до другого розділу:

- запропонована укрупнена структурна схема методики розрахунку системи теплової підготовки задекларована щодо газового двигуна 6Ч 12/14 (K159M2). Насправді вона носить узагальнений характер та використана щодо досліджень газового двигуна 6Ч 12/14;

- в роботі не пояснено, чому для циліндричних поверхонь теплообміну між відпрацьованими газами та теплоакумулюючим матеріалом в (2.11), між моторною оливою та теплоакумулюючим матеріалом в (2.27) використано залежності як для плоскої стінки;

- коефіцієнт теплопередачі від багат шарового корпусу теплового акумулятора до довкілля за (2.21) передбачає наявність ідеального контакту між окремими шарами корпусу, але ефективність багат шарових корпусів полягає саме у забезпеченні неідеальності контактів;

Третій розділ, «Програма, методика та результати експериментальних досліджень», висвітлює зміст розробленої програми проведення натурних експериментів; подає досліджувані об'єкти і використане обладнання, вимірювальні прилади; наводить методику формування циклу передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2); розкриває алгоритми роботи системи теплової підготовки газового двигуна при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та зберігання теплової енергії; представляє результати експериментальних досліджень та відповідні висновки.

Комплексом досліджень передбачено безмоторні експерименти щодо складових системи прискореного прогріву двигуна, а моторними – отримання необхідного масиву даних для двигуна К-159 М2 штатної та модернізованої комплектації, встановленого в лабораторії відділу переробки і транспортування природного газу Інституту газу НАН України (м. Київ).

Опис характеристик вимірювальної апаратури та іншого необхідного обладнання наведено достатньо інформативно і якісно, що дозволяє стверджувати про високу достовірність отриманих автором роботи результатів. Заслужує уваги детальне подання методик проведення експериментальних досліджень та об'єми і якість отриманих експериментальних результатів. Усі експерименти виконані автором на високому технічному рівні. Останні мають окреме вагоме значення для науки і практики.

Зауваження по третьому розділу:

– на загальній схемі експериментальної силової установки (рис. 3.1) контактний тепловий акумулятор схематично подано як такий, що не повністю теплоізолює зовнішні поверхні двигуна, а на поперечному перерізі двигуна (рис. 3.2) контактний тепловий акумулятор і випускний колектор не представлені. Через це виникає питання, чи має для повітря, яке знаходиться між зовнішніми поверхнями двигуна і внутрішніми поверхнями контактного теплового акумулятора, явище природної конвекції та теплообмін з довкіллям, і тому, чи відповідає практично застосована конструкція моделі теплообміну, поданій в розділі 2;

– на загальній схемі експериментальної силової установки (рис. 3.1) відсутній витратомір повітря, в тексті роботи вказується на його присутність, а на стор. 140 і 141 мають місце розбіжності в маркуванні газового лічильника повітря;

– за текстом роботи при посиланні на теплоакumuлюючий матеріал (стор. 131) вказується, що використано «поліетилен високого тиску (рис. 3.3)», а в заголовку відповідного рисунка мова іде про поліетилен високої густини;

У четвертому розділі, «Теоретичні дослідження роботи газового двигуна в процесі передпускового і післяпускового прогріву з використанням системи теплової підготовки», наведено результати розрахункових досліджень в інтервалі температур довкілля $-20...+20^{\circ}\text{C}$. Визначено ефективність комбінацій елементів системи підігріву, наведено оцінки доцільності прийнятих рішень щодо передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2).

Розроблено рекомендації щодо комплектації системи відповідно до функціонального призначення двигуна. Такий підхід на сьогодні є необхідним, відповідає концепції сегментації ринку двигунів та вирішенню задач отримання суспільно необхідних обсягів механічної енергії при мінімізації суспільних витрат і втрат в життєвому циклі конструкцій.

Зауваження до четвертого розділу:

– потребує пояснення, яким чином в роботі використовувались результати розрахунку робочого процесу в програмі DIESEL-RK. Отримані за допомогою даного програмного комплексу дані представляють практичний інтерес, тому їх доцільно було би навести;

– в табл. 4.1 заявлено дані щодо годинної витрати палива двигуна при використанні варіацій розробленої системи у порівнянні зі штатною конструкцією двигуна, але цей показник в процесі прогріву не є константою;

– у розділі поняття термінові і часові результати прогріву використовуються як синоніми, що не є коректним;

– у розділі є посилання на роботу [146], що не відповідає списку джерел інформації.

Додатки містять копії довідок та акти впровадження результатів дисертаційної роботи, програми розрахунку, переліки патентів та інших охоронних документів, які доповнюють основний зміст дисертації, про що йшла мова вище.

Загальні зауваження по роботі.

Крім зауважень, наведених при оцінці змісту окремих розділів дисертаційної роботи необхідно вказати на таке:

1. В переліку використаних методів дослідження автор вказує, крім іншого, на теорію горіння, що потребує пояснення.

2. Автором роботи вірно вказується, що для формування бази вихідних даних можливим є використання експериментальних або розрахункових даних параметрів робочого процесу двигуна. В роботі обрано шлях застосування програмного комплексу DIESEL-RK. Більш доцільним було б застосування розрахункової методики щодо моделювання робочого процесу при роботі двигуна на режимі холостого ходу.

3. З наведеної в роботі інформації не ясно, чи враховує автор залежності теплофізичних характеристик матеріалів від температури. Особливо це стосується числа Прандтля, через який, окрім іншого, встановлюється значення критерію Нусельта.

4. В роботі стверджується, що «за допомогою математичної моделі визначено вплив швидкості циркуляції робочих рідин у системах двигуна на час його прогріву». Знайти математичну інтерпретацію такої залежності у дисертації виявилось проблематично.

5. В роботі здійснена перевірка адекватності отриманих на основі експериментів емпіричних залежностей сукупності необхідних параметрів. Але інформація щодо області адекватності моделей явно не представлена.

6. Дисертація перевантажена скороченнями, що ускладнює її сприйняття. (наприклад, «Використання НМО в СТП для МО в СМ дозволяє на протязі 960 хв, зберігати теплову енергію МО для СМ, накопичену в НМО від МО в межах $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ »). Спостерігається певна неохайність у термінології, деякі друкарські неточності, у т.ч. щодо розмірності фізичних величин.

Загальний висновок по роботі

Загальна оцінка роботи є позитивною та засвідчує достатньо високий рівень знань здобувача в галузі двигунобудування, його вміння самостійно розв'язувати складні наукові завдання.

Окремо слід звернути увагу на значно великий об'єм виконаних досліджень та перспективи їх подальшого використання, наприклад, при прогнозуванні впливу умов пуску двигуна на його параметричну надійність.

Окремо слід вказати, що робота автора є гарним зразком щодо захисту прав інтелектуальної власності в науково-технічній сфері та повинна слугувати прикладом для широкого розповсюдження.

Аналізуючи зміст дисертаційної роботи в цілому, варто відзначити наступне:

1. Виконана дисертаційна робота безпосередньо стосується питань, які визначаються паспортом наукової спеціальності, та присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної з впровадженням прогресивних систем передпускового і післяпускового прогріву стаціонарного газового двигуна, що сприяє покращенню експлуатаційних характеристик установок резервного енергопостачання, стаціонарних двигунів інших призначень.

2. Дисертація є завершеною науковою роботою, яка виконана з використанням сучасних методів дослідження, містить нові науково обґрунтовані результати та технічні рішення, впровадження яких сприяє розширенню теоретичних основ проектування двигунів внутрішнього згорання, фізичного та математичного моделювання в двигунобудуванні, аналізу і синтезу термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних та інших процесів у двигунах, енергоустановках і їх елементах, узгодження їх з характеристиками об'єктів призначення. Дисертаційне дослідження методологічно виконано вірно, поставлені задачі дослідження виконано.

3. Запропоновані в дисертації математичні моделі, методики експериментальних досліджень, отримані експериментальні результати, сформульовані рекомендації можуть бути використані в двигунобудуванні для створення перспективних і удосконалення існуючих систем передпускового і післяпускового прогріву двигунів, а також в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування».

4. Текст автореферату та публікації автора достатньо повно відображають зміст і основні наукові результати виконаного дослідження.

5. Перелічені у відгуку зауваження і недоліки щодо тексту дисертаційної роботи не впливають на загальні результати виконаного дослідження, які пройшли широко апробацію, не ставлять під сумнів їх наукової та практичної цінності.

На основі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота «Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією» відповідає п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Вербовський Валерій Степанович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри двигунів
внутрішнього згоряння
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
доктор технічних наук, професор



Підпис: Володимир Пильов
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕННИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
Заковоротний О.Ю.
" 15 " 05 2024 р.