

Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром

У роботі обґрунтовано необхідність та запропоновано можливі шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палива за допомогою теплового витратоміра. Необхідність зменшення похибки виникає за специфічних умов експлуатації теплового витратоміра на транспортних засобах та вимогами, які до нього пред'являються в таких випадках, оскільки теплові витратоміри, як правило, орієнтовані на вузький діапазон вимірювання витрат палив та стаціонарні режими витрат, що не може бути прийнятим для транспортних двигунів внутрішнього згорання, які тривалий час працюють на змінних швидкісних і навантажувальних режимах. Розширення діапазону виміру витрат палив тепловим витратоміром запропоновано використанням послідовно аксіально встановлених його секцій з різними діаметрами. Сформульовано умову вибору співвідношення діаметрів секцій теплового витратоміра за умови перекриття всього можливого діапазону витрат палив транспортним двигуном внутрішнього згорання. Показано можливість отримання різних швидкостей руху палива в секціях теплового витратоміра, значення яких можуть відрізнятися у декілька разів.

Проаналізовано шляхи впливу на показники радіального теплового потоку в тепловому витратомірі, що вплине на показники осьового теплового потоку, зробить їх більш інформативними, а це в свою чергу вплине на похибку вимірювання витрат палив.

Для багатосекційного витратоміра сформульовано умову вибору розподілу температур зі мінімальною похибкою вимірювання. Її можна отримати за показаннями термоперетворювачів саме тій трубки багатосекційного теплового витратоміра, де виміряно максимальну сумарну різницю температур між всіма сусідніми термоперетворювачами.

Ключові слова: *двигун внутрішнього згорання; витрата палива; тепловий витратомір; передача тепла; радіальний тепловий потік; осьовий тепловий потік; термоперетворювач; нагрівальний елемент.*

Вступ. Витрата палива двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобіля є комплексним показником його технічного стану. Відомо, що цей показник може бути прийнятий за діагностичний і є інформативним для всієї системи «автомобіль – водій – навколишнє середовище». На витрату палива ДВЗ транспортного засобу впливають всі конструктивні та експлуатаційні параметри названої системи. Тому можна стверджувати, що вимірювання витрат палив ДВЗ є обов'язковою для сучасної експлуатації транспортних засобів, важливою складовою управління їх технічним станом.

Вимірювання витрат палива ДВЗ автомобіля є необхідними для визначення несправностей, запобігання відмов усіх агрегатів, систем та вузлів автомобіля. Їх необхідно проводити в реальному часі безпосередньо в процесі експлуатації автомобіля і відповідно оперативно реагувати на їх наближення, прояв тощо. Такі вимірювання можна одноозначно вважати невід'ємною частиною процесу загальної діагностики транспортних засобів як в цілому, так й їх систем.

Оскільки паливо є однією з основних складових собівартості транспортного процесу, вимірювання витрати є необхідними для його обліку, планування маршрутів руху транспортних засобів, фактичної роботи на маршруті, навчання економічному водінню автомобілів тощо.

Здебільшого на транспортних засобах не встановлюють витратомірів палив. Використовується програмна реєстрація часу відкритого стану форсунок (інжекторів) системи живлення ДВЗ і за відомим тиском перед форсунками (інжекторами) та з урахуванням їх геометричних параметрів (прохідний перетин пари «сідло – голка» або подібних) розраховується кількість палива, що поступає через форсунку в камеру згорання ДВЗ. Тому такі вимірювання можна вважати умовними та наближеними, оскільки вони відображають лише відносну картину витрати палива. При цьому похибка вимірювань може бути значною і пов'язана, наприклад, з технічним станом насоса системи живлення ДВЗ, що подає паливо до форсунок, засміченням паливного фільтра, зі станом самих форсунок тощо. Абсолютна витрата в такому випадку подається як сума кожної такої реєстрації на маршруті руху транспортного засобу.

При експлуатації транспорту спеціалістів більше цікавить чисельне значення саме абсолютної витрати палива (за певний період, на певному маршруті, на певних режимах руху (завантаження) тощо). При цьому абсолютна витрата палива може бути значно іншою і суттєво відрізнятися від вимірної способом обліку часу відкриття форсунок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На автомобільному транспорті можна використовувати витратоміри палив різних типів, конструкцій та принципів дії. Але специфіка його експлуатації висуває багато принципових вимог до витратомірів, оскільки впливає на похибку вимірювання. Як приклад можна назвати витратоміри палива серії OGM-A [1].

Витратоміри палива та рідин серії OGM – прецизійні витратоміри витіснювального типу, конструкція яких являє собою два овальних ротори (лічильник рідини з овальними шестернями). Принцип виміру цього витратоміра полягає в обертанні двох зачеплених між собою овальних шестерень, які, обертаючись під дією потоку палива, пропускають при кожному обороті певний його об'єм. Обертання шестерень передається в лічильний механізм або на датчик Ріда (геркон).

Переваги такого способу вимірювання витрат палив – відносно висока точність вимірювання, також спосіб і конструкція витратоміра не висуває особливих вимог до профілю трубопроводів та довжин прямих ділянок до та після витратоміра палива. Витратоміри, що реалізують зазначений спосіб, мають високу надійність, що дозволяє використовувати їх для вимірювання кількості: дизельного палива, гасу, бензину та багатьох інших експлуатаційних рідин, що використовуються на транспортних засобах, і не тільки як паливо. При цьому цей витратомір здатний вимірювати витрату палива, що подається як самопливом, так і під тиском. Виробник зазначає основні переваги витратоміра: висока точність вимірювання (максимальна похибка $\pm 0,5\%$), компактність і простота роботи, він не потребує формування потоку перед витратоміром, легкість монтажу тощо. Але важливо розуміти, що на точність вимірювання витрати палива таким витратоміром впливає тертя в опорах роторів, пульсації тиску перед ним, а можливо і розташування витратоміра відносно горизонту та повздожньої осі автомобіля.

У той же час виробник підкреслює, що такий витратомір рекомендовано до використання тільки для внутрішньогосподарського обліку палива, що говорить про його «некоректну» роботу в умовах тряски, вібрацій, динамічних навантажень, які мають місце в процесі експлуатації транспортного засобу.

Промисловість пропонує дійсно велику кількість витратомірів палива, але вони в тому чи іншому сенсі не адаптовані для умов роботи транспортних засобів. Тому найбільш привабливими в цьому випадку вважаються витратоміри, робота яких основана на принципі реєстрації перенесення тепла тілом, витрата якого реєструється, – теплові витратоміри [2–4]. Вони мають суттєві переваги над витратомірами інших принципів дії. Важливими з них зазначаються: точність вимірювання не залежить від орієнтації витратоміра в просторі, що дозволяє встановлювати його на автомобілі в зручному місці підкапотного простору, кабіні, салоні тощо; на похибку вимірювання не впливають вібрації, ударні навантаження, тиск і пульсації палива на вході у витратомір; встановлення двоконтурного теплового витратоміра дозволяє зменшити похибку вимірювання витрати палива в системах живлення ДВЗ зі зворотнім зливанням палива в бак транспортного засобу [5]. Важливим недоліком теплового витратоміра є відносно вузький діапазон виміру витрат палив. Вони, як правило, орієнтовані на відносно стаціонарні витрати і таким чином теплові витратоміри не здатні охопити весь можливий діапазон витрат палива ДВЗ транспортного засобу на всіх можливих режимах його роботи. Ще один важливий недолік – теплові витратоміри мають непостійну похибку виміру витрат на різних швидкостях потоку палива (різних витратах, що реєструються) [6, 7]. Це необхідно враховувати в процесі виміру, і цей факт також потребує удосконалення конструкції теплового витратоміра, що може бути вирішено різними шляхами та підходами.

Мета та постановка завдання дослідження. Розробити шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив ДВЗ транспортного засобу за допомогою теплового витратоміра через удосконалення його конструкції.

Викладення основного матеріалу та результати дослідження. Класична конструкція теплового витратоміра наведена на рисунку 1. Він складається з корпусу-трубки 1, по якому протікає паливо, електронагрівального елемента 2 та термоперетворювачів 3. Розміри корпусу-трубки 1 можуть бути різними і обираються залежно від максимально можливої витрати, що вимірюється, та необхідної міцності, оскільки паливо може подаватися під різними тисками. Для ДВЗ транспортного засобу під час вибору конструкції теплового витратоміра для використання необхідно враховувати товщину стінки корпусу трубки для заданих значень тиску, що створює паливний насос системи живлення ДВЗ, та достатньої пропускної спроможності з врахуванням максимального споживання палива цим конкретним двигуном транспортного засобу (максимально можливої витрати палива). Такі параметри враховують на етапі розробки витратоміра і вони, як правило, наводяться в технічному паспорті на вже готовий виріб. Корпус-трубка 1 може виготовлятися з різних матеріалів, але в процесі розробки і виготовлення витратоміра треба врахувати теплопровідність матеріалу, зручність його механічної обробки для подальшого приєднання до системи живлення ДВЗ. Матеріал корпусу-трубки 1 буде впливати на процес передачі тепла від палива до атмосфери, тобто впливати на величину радіального теплового потоку в процесі виміру витрати палива. Оскільки кількість тепла на різних режимах витрати, яка при цьому буде відведена в атмосферу, буде різною, також різною буде і похибка вимірювання витрати палива. Для зменшення теплообміну між корпусом-трубкою 1 і навколишнім середовищем бажано обирати матеріал корпусу-трубки 1 з меншою теплопровідністю, що зменшить варіації радіального теплового потоку і втрати тепла в атмосферу для різних величин витрат палив, а це в свою чергу зменшить похибку вимірювання цих витрат.

Вище вже зазначалося, що корпус-трубка 1 повинен мати пропускну спроможність, щоб забезпечувати максимально можливу витрату палива ДВЗ, для якого обирається витратомір, на всіх можливих швидкісних і навантажувальних режимах його роботи. Таким чином внутрішній діаметр корпусу-трубки 1 має бути більшим за певну величину з точки зору пропускну спроможності витратоміра в цілому для цього конкретного ДВЗ.

Товщина стінки корпусу-трубки 1 витратоміра і його матеріал мають забезпечувати необхідну міцність, трубка повинна витримувати певний тиск у системі живлення двигуна без руйнування, жолоблення та/або втрати герметичності. В процесі вибору матеріалу корпусу-трубки 1 необхідно враховувати його коефіцієнт лінійного розширення. Транспортні засоби працюють у досить широкому діапазоні температур, наприклад, автомобіль КраЗ-6510-030 розрахований на експлуатацію в діапазоні температур $-45 \dots +50$ °С [8], при цьому корпус-трубка не має змінювати свої геометричні розміри, або ця зміна повинна бути мінімальною, що можна врахувати програмним способом у процесі використання теплового витратоміра з ком'ютерним поєднанням [5].

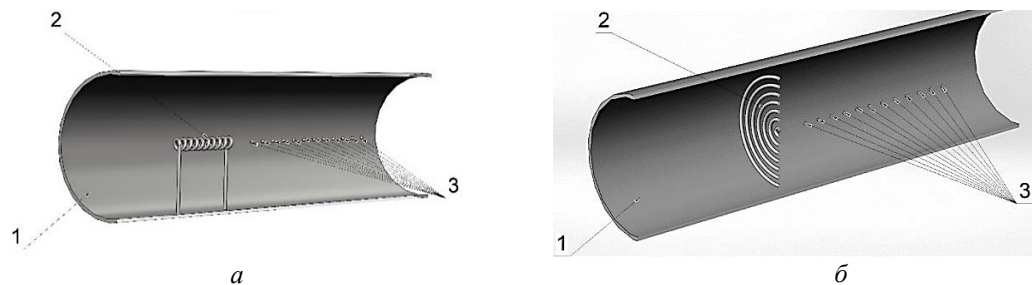


Рис. 1. Тепловий витратомір з різною формою та розташуванням електронагрівального елемента відносно осі корпусу-трубки: а – малого радіусу, вздовж осі; б – великого радіусу, в перетині, що перпендикулярний осі; 1 – корпус-трубка; 2 – електронагрівальний елемент; 3 – термоперетворювачі

Для зменшення радіального теплового потоку в корпусі-трубці 1 витратоміра можна рекомендувати його теплоізоляцію, яку можуть забезпечити різні матеріали. Але вони також мають відповідати певним вимогам, в тому числі бути стійкими до агресивного впливу самого палива. Авторами пропонується як теплоізоляційний матеріал корпусу-трубки 1 використовувати фторопласти.

Фторопласт Ф-4 являє собою кристалічний полімер. Він має температуру плавлення кристалітів 327 °С, температуру склування аморфних ділянок $-100 \dots -120$ °С. При температурі вище за температуру розкладання (415 °С) фторопласт Ф-4 не переходить у в'язкотекучий стан, а при 370 °С в'язкість його розплаву дорівнює приблизно 1011 П, тобто в 10^6 разів більше в'язкості, необхідної для лиття під тиском.

Для врахування зміни теплового потоку для різних матеріалів корпусу-трубки 1 теплового витратоміра і для виміру витрат різних палив необхідно аналізувати їх властивості передавати тепло, тобто коефіцієнти теплопровідності (табл. 1).

Таблиця 1

Теплопровідність деяких нафтових палив, матеріалів корпусу-трубки та ізоляційних матеріалів теплового витратоміра, $t = 20$ °С [9–10]

Матеріал / речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
Паливо	
Дизельне	0,108
Бензин	0,106
Корпус-трубка і/або ізоляція	
Дюралюміній	160
Латунь	110
Фторопласт Ф-5	0,25

З таблиці 1 видно, що коефіцієнти теплопровідності палив мають значно менші значення, ніж матеріали корпусу-трубки 1 і/або його ізоляції. Щоб максимально виключити вплив теплопровідності матеріалу корпусу-трубки 1 теплового витратоміра на радіальний тепловий потік, і відповідно на похибку вимірювань витрат палив, необхідно знайти матеріали з таким коефіцієнтом теплопровідності, за якого повністю виключити передачу тепла в радіальному напрямку, що можливо лише теоретично. Таким чином, повне усунення передачі тепла в радіальному напрямку в теплому витратомірі вибором матеріалу корпусу-трубки 1 і/або ізоляції практично неможливо.

Електронагрівальний елемент 2 (рис. 1) підігріває потік палива до певної температури, яка за умов безпеки не має перевищувати його температури спалаху. Температура спалаху – це найнижча температура палива, за

якої за встановленими умовами над його поверхнею утворюється паливо-повітряна суміш, яка здатна спалахувати в повітрі під впливом джерела запалювання. При цьому така суміш утворюється повільно і не здатна стійко горіти. Чим вища температура кипіння нафтопродуктів, тим вища температура спалахування. Бензинові фракції мають температуру спалахування до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, гасові – понад $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, масляні від $130\text{...}350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура спалахування дає уяву про наявність у паливі легколетучих фракцій і вказує на рівень пожежонебезпечності і вибухонебезпечності нафтопродуктів. Фактично температура спалахування – це температура, за якої починається горіння. Сучасні українські стандарти встановлюють межу температури спалахування $61\text{ }^{\circ}\text{C}$, нижче якої палива належать до легкозаймистих, вище – до горючих рідин.

Також треба мати на увазі, що в корпусі-трубці 1 витратоміра відсутнє повітря і утворення паливо-повітряної суміші практично неможливе. Паливо знаходиться під певним тиском, що утворює паливний насос системи живлення двигуна, а під час зупинки двигуна в системі має залишатися тиск вище за атмосферний, щоб запобігти підтіканню палива (попаданню повітря в систему). Тому можна брати до уваги температуру спалахування в закритому тиглі і/або кипіння, в тому числі з пожежних міркувань. Для дизельного палива температура кипіння знаходиться в межах $170\text{...}380\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12], оскільки ці значення визначено для нормальних атмосферних умов, вважається за можливе підігрівати дизельне паливо в тепловому витратомірі максимум до $170\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Електронагрівальний елемент 2 може мати різну геометричну форму. Як правило, він виготовляється з дроту високого питомого опору (ніхрому) і встановлюється аксіально з віссю корпусу-трубки 1. Якщо електронагрівальний елемент 2 виготовляється з дроту, він частіше має форму спіралі відносно малого (рис. 1, *a*) або великого радіусів (рис. 1, *b*), що також впливає на величину радіального і осьового теплових потоків і потребує додаткового дослідження. Електронагрівальний елемент 2 може бути встановлений на зовнішню поверхню корпусу-трубки 1, що полегшує вирішення питань забезпечення підводу до нього електричного струму (має бути враховано теплопровідність матеріалу корпусу-трубки 1) і створює інший розподіл температур, змінюючи величину і напрям радіального теплового потоку в паливі, витрата якого вимірюється. Термоперетворювачі 3 також переважно розташовані по осі корпусу-трубки 1 теплового витратоміра. Вони можуть бути різного принципу дії та типу і реєструють температури палива в процесі його протікання вздовж осі корпусу-трубки 1 на певних відстанях від електронагрівального елемента 2. Вказаний розподіл температур є підставою для розрахунку швидкості руху палива і відповідно його об'ємної витрати, які зв'язані відомою залежністю, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = VS, \quad (1)$$

де V – швидкість потоку палива, $\text{м}/\text{с}$; S – площа перетину корпусу-трубки за внутрішнім діаметром, м^2 .

З (1) логічно випливає, що для заданої об'ємної витрати палива зі зменшенням площі перетину S пропорційно зростає швидкість потоку палива V і навпаки, зі збільшенням площі перетину S швидкість потоку пропорційно знижується. Це дає можливість корегувати вигляд розподілу температур для різних значень швидкостей потоку (витрат палива).

Кількість термоперетворювачів 3 та відстань між ними, відстань від електронагрівального елемента 2 до першого термоперетворювача 3 впливають на загальну картину розподілу температур для даної конкретної витрати палива. Вони залежать від діапазону швидкостей (діапазону можливих витрат, що вимірюються), які необхідно зареєструвати витратоміром. Для автомобільного ДВЗ цей діапазон може бути великим – від нуля (відсутня подача палива в ДВЗ) в режимі примусового холостого ходу до максимального значення, що відповідає максимальній миттєвій витраті палива цього ДВЗ. З (1) неважко розрахувати, що, наприклад, для витрати палива від $0,05\text{...}0,25\text{ м}^3/\text{год}$ швидкість руху палива в трубках діаметрами $0,01\text{...}0,1\text{ м}$ буде становити $1,77\text{...}884,6\text{ мм}/\text{с}$. Такий широкий діапазон швидкостей вимагає розробки конструктивних рішень щодо можливості реєстрації миттєвих значень температур палива в заданий момент часу.

Також неважко дійти до висновку, що параметри процесу перенесення тепла в радіальному та в осьовому напрямках в корпусі-трубці 1 теплового витратоміра на різних швидкостях палива будуть суттєво різнитись, і це не завжди дасть можливість визначити температури в точках розташування термоперетворювачів 3 та розрахувати швидкість потоку палива, його витрату [6, 7]. Наприклад, якщо при збільшенні швидкості палива (витрати) буде для певної швидкості термоперетворювачами 3 зареєстровано температуру, яка мало або практично не відрізняється від температури, що зареєстровано двома послідовно встановленими термоперетворювачами 3, то це може означати, що швидкість потоку палива досягла критичного значення, вище якого її визначення неможливе. Постає алгоритмічне завдання: для зменшення похибки вимірювання витрати палива на даному режимі роботи ДВЗ брати до уваги температури двох сусідніх термоперетворювачів з більшою різницею показань (для всіх послідовно встановлених термоперетворювачів 3). Тоді в процесі вимірювання необхідно впливати (змінювати в необхідному діапазоні) на швидкість потоку палива для конкретного значення (діапазону) його витрат. Такі міркування наводять на думку щодо використання корпусу-трубки теплового витратоміра з іншим діаметром. Таким чином тепловий витратомір (рис. 1) має обмеження щодо діапазону виміру витрат палива ДВЗ транспортного засобу.

Розширення діапазону виміру витрат палива ДВЗ (зменшення похибки вимірювань) можна досягти використанням декількох послідовно встановлених трубок 1 різних діаметрів, кількість яких залежить від діапазону витрат палива, що вимірюються, тобто створенням багатоступінчастого витратоміра (рис. 2). Він складається з трубок 1, з'єднаних послідовно і аксіально конусами 2 (в прикладі розглядається чотири трубки 1). Величина конусності конусів 2 обирається з міркувань виключення (або мінімізації) завихрування потоку палива на всіх швидкостях його руху через всі трубки 1. Зазначений факт потребує додаткових досліджень.

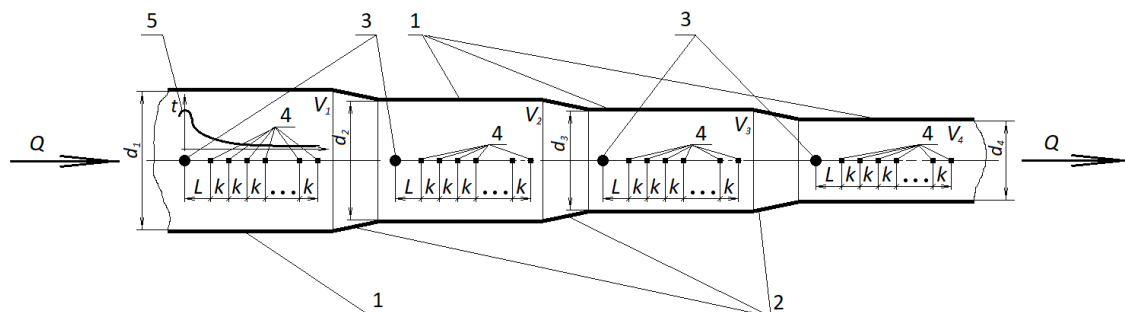


Рис. 2. Схема багатоступінчастого теплового витратоміра [13]: 1 – трубка; 2 – конус; 3 – електронагрівальний елемент; 4 – термоперетворювач; 5 – температура вздовж осі трубки, °С; Q – об'ємна витрата палива, м³/с; $d_1 - d_4$ – діаметри трубок; $V_1 - V_4$ – швидкості палива вздовж осей трубок, м/с; L – відстань від нагрівального елемента до першого термоперетворювача, м; k – відстані між термоперетворювачами, м

Використання трубок 1 діаметрів $d_1 - d_4$ дозволяє варіювати швидкістю палива, що протікає через трубки 1 теплового витратоміра, а також впливати на температуру його нагріву в збільшеному діапазоні витрат. Це дозволяє зареєструвати максимально можливі різниці температур палива в потоці за допомогою одного термоперетворювача 4 до наступного, що розташовується в потоці на відстані k .

Правильним вибором діаметрів $d_1 - d_4$ трубок 1 можна досягти перекриття широкого діапазону можливих витрат палива. Їх вибирають на основі простих міркувань: якщо прийняти до уваги закон безперервності потоку рідини та встановити, наприклад, що $d_4 = d_3 / 2 = d_2 / 4 = d_1 / 8$, не важко отримати, що швидкість V_1 в 64 рази менша за швидкість V_4 . Тому вибором кількості трубок теплового витратоміра та співвідношенням їх діаметрів можна охопити практично весь можливий діапазон витрат палив транспортного ДВЗ будь-якої потужності. Узагальнена формула для визначення співвідношень діаметрів трубок теплового витратоміра і швидкостей потоку палива має такий вигляд:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = \left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)^2, \quad (2)$$

де $i = (1 \dots n-1)$ – порядковий номер трубки теплового витратоміра в напрямку руху палива; n – кількість трубок теплового витратоміра.

Термоперетворювачі 4 та електронагрівальні елементи 3 встановлюються аксіально з трубками 1. Перший в потоці палива термоперетворювач 4 розташований на відстані L від електронагрівального елемента 3, відстань від якого до наступного термоперетворювача 4 та далі між наступними термоперетворювачами дорівнює k (рис. 2). Кількість термоперетворювачів залежить від величини витрати Q і обирається таким чином, щоб можна було за їх показаннями відтворити розподіл температур по осі кожної трубки 1 з максимально можливою різницею температур між всіма сусідніми термоперетворювачами. Вже згадувалося, що для значення витрати палива Q його швидкість руху вздовж осі трубки ($V_1 - V_4$) буде тим вища, чим більша значення Q і/або менший діаметр ($d_1 - d_4$).

Зі збільшенням швидкості потоку палива в трубці 1 витратоміра термоперетворювачі 4 будуть реєструвати все більш однакову температуру, а після встановлення швидкого теплоперенесення показання термоперетворювачів 4 не будуть суттєво відрізнятися і вони будуть наближатися до температури палива біля нагрівального елемента 3. Відсутність (зменшення) різниці показань між сусідніми термоперетворювачами 4 підвищує похибку визначення температури (похибку вимірювання витрат палива) або взагалі робить неможливим визначати різницю температур (витрату). Тоді можна запропонувати зменшити швидкість палива, що в нашому випадку може спостерігатися в трубках 1 більшого діаметра. І навпаки, зі зменшенням швидкості руху палива уповільнюється теплоперенесення, термоперетворювачі 4 можуть зареєструвати несуттєву зміну температури потоку, що також призведе до збільшення похибки вимірювання витрати палива. В такому разі необхідно збільшити швидкість палива, що в запропонованій конструкції витратоміра може спостерігатися в трубках 1 меншого діаметра. Таким чином не тільки розширюється діапазон виміру витрат палива, але і зменшується похибка вимірювання витрат рідких палив тепловим витратоміром.

Для отримання розподілу температур у потоці палива максимальної інформативності (з найбільшою різницею між сусідніми термоперетворювачами 4), тобто для зменшення похибки вимірювання витрат палив, треба брати для аналізу температур саме ту трубку 1 витратоміра, де він наближається до виду, коли виконується умова:

$$\sum_{y=1}^x (|t_y - t_{y+1}|) \rightarrow \max, \quad (3)$$

де x – кількість термоперетворювачів у трубці 1 теплового витратоміра; y – порядковий номер термоперетворювача в потоці палива, $y = 1 \dots x - 1$; t – температура, що зареєстрована перетворювачем за номером y .

Витрата палива ДВЗ транспортного засобу на різних швидкісних і навантажувальних режимах його роботи може змінюватись як в бік збільшення, так і в бік зменшення. Знак модуля в (3) дає можливість проаналізувати саме величину різниці температур між сусідніми термоперетворювачами. Саме в тій трубці, де буде виконана умова (3), тобто розподіл вимірних температур з максимальною різницею між всіма сусідніми термоперетворювачами, отримана більша інформативність щодо зміни швидкостей потоку (витрати палива).

Окремо треба зауважити, що необхідною є перевірка руху потоку палива в трубках на турбулентність, оскільки вона може суттєво впливати на різницю показань між сусідніми термоперетворювачами (похибку вимірювання). Наявність турбулентного руху сприятиме вирівнюванню показань термоперетворювачів і залежить від інтенсивності турбулізації потоку. Турбулентний рух може проявлятися на окремих режимах руху палива і бути характерним для деяких режимів і/або для деяких трубок теплового витратоміра. Такий рух може вносити непостійну похибку в процес вимірювання температур і подальший розрахунок швидкостей (витрат) палива.

Висновки. Запропоновано шляхи та конструктивні рішення зменшення похибок вимірювання витрат палив тепловим витратоміром для ДВЗ транспортних засобів, які полягають у розширенні діапазону вимірювання витрат, визначенні кращого розподілу температур (швидкостей) в потоці палива, використанні матеріалів для трубок теплового витратоміра з певними фізичними властивостями. Намічено шляхи щодо подальшого удосконалення конструкції теплового витратоміра з метою зменшення похибок вимірювання витрат палива ДВЗ транспортного засобу.

Сформульовано умову щодо інформативності показників осьового теплового потоку витратоміра: мінімальну похибку можна отримати за показаннями термоперетворювачів саме тієї трубки багатосекційного теплового витратоміра, де отримано максимальну сумарну різницю температур між всіма сусідніми термоперетворювачами.

Список використаної літератури:

1. Витратоміри палива серії OGM-A [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://prock.com.ua/cowell-to-oval/>.
2. Korobiichuk I. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement / I.Korobiichuk, A.Ilchenko // Sensors. – 2022. – № 22. DOI: 10.3390/s22228882.
3. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation / I.Korobiichuk, O.Bezvesilna, A.Ilchenko and other // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT. – 2017. – January. – P. 975–979.
4. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport / I.Korobiichuk, O.Bezvesilna, A.Ilchenko, Y.Trostenyuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – № 519. – P. 443–448.
5. Безвесільна О.М. Розроблення калориметричного витратоміра моторного палива з підвищеною точністю вимірів регулюванням температури на вході / О.М. Безвесільна, А.В. Ільченко // Восточно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2014. – № 6/7 (72). – С. 50–54.
6. Bezvesilna O. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels / O.Bezvesilna, M.Kamiński, A.Ilchenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – № 550. – P. 505–511.
7. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів / О.М. Безвесільна, А.В. Ільченко, А.Г. Ткачук, С.О. Пархоменко // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – Вип. 3–4. – С. 216–222.
8. Самоскид КрАЗ-6510-030 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/ibbio>.
9. Модифікований фторопласт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/ibbiw>.
10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/ibbjh>.
11. Мала гірнича енциклопедія у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Д. : Східний видавничий дім, 2013. – Т. 3. – 644 с.
12. Дизельне паливо [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://unk.ua/uk/dizelnoe-toplivo-1>.
13. Ільченко А.В. Удосконалення конструкції теплового витратоміра рідких моторних палив / А.В. Ільченко // Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : Тези XI-ї Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – С. 136–138.
14. Ільченко А.В. Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згорання / А.В. Ільченко, О.М. Безвесільна, Ю.В. Тростенюк // Вісник НТУ. – 2013. – № 28. – С. 186–191.
15. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter / I.Korobiichuk, O.Bezvesilna, A.Ilchenko and other // Sensors. – Switzerland. – 2015. – № 15 (9). – P. 22899–22913.

References:

1. Vytratomyry palyva serii OGM-A, [Online], available at: <http://prock.com.ua/cowell-to-oval/>
2. Korobiichuk, I. and Ilchenko, A. (2022), «Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement», *Sensors*, No. 22, doi: 10.3390/s22228882.
3. Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A. et al. (2017), «Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation», *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT*, January, pp. 975–979.
4. Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A. and Trostenyuk, Y. (2017), «Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, No. 519, pp. 443–448.
5. Bezvesilna, O.M. and Ilchenko, A.V. (2014), «Rozroblennia kalorymetrychnoho vytratomira motornoho palyva z pidvyshchenoiu tochnistiu vymiriv rehuliuvanniam temperatury na vkhodi», *Vostochno-evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, Kharkiv, No. 6/7 (72), pp. 50–54.
6. Bezvesilna, O., Kamiński, M. and Ilchenko, A. (2017), «Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, No. 550, pp. 505–511.
7. Bezvesilna, O.M., Ilchenko, A.V., Tkachuk, A.H. and Parkhomenko, S.O. (2013), «Metody vymiriuvannia vytrat ridyny ta konstruksii vytratomiriv», *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy*, Issue 3–4, pp. 216–222.
8. *Samoskyd KrAZ-6510-030*, [Online], available at: <http://surl.li/ibbio>
9. *Modyfikovanyi ftoroplast*, [Online], available at: <http://surl.li/ibbiw>
10. [Online], available at: <http://surl.li/ibbjh>
11. Biletskoho, V.S. (ed.) (2013), *Mala hirnycha entsyklopediia u 3 t.*, Skhidnyi vydavnychiy dim, D., Vol. 3, 644 p.
12. *Dyzelne palyvo*, [Online], available at: <http://unk.ua/uk/dizelnoe-toplivo-1>
13. Ilchenko, A.V. (2023), «Udoskonalennia konstruksii teplovoho vytratomira ridkykh motornykh palyv», *Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*, Tezy XI-y Mizhnarodnii naukovo-tekhnichnii internet-konferentsii, VNTU, Vinnytsia, pp. 136–138.
14. Ilchenko, A.V., Bezvesilna, O.M. and Trosteniuk, Yu.V. (2013), «Zmina radialnoho teplovoho potoku termoanemometrychnoho vytratomira biopalyv dvyhuna vnutrishnoho zghorannia», *Visnyk NTU*, No. 28, pp. 186–191.
15. Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A. et al. (2015), «A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter», *Sensors*, Switzerland, No. 15 (9), pp. 22899–22913.

Ільченко Андрій Володимирович – доцент, кандидат технічних наук, член-кореспондент Транспортної академії України, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7927-874X>.

Наукові інтереси:

– сталий транспорт, енергозберігаючі технології та використання альтернативних джерел енергії на транспорті;

– екологія транспорту.

E-mail: avi_77@ukr.net.

Багінський Олександр Олександрович – аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– енергозберігаючі технології на автомобільному транспорті.

E-mail: katt_booo@ztu.edu.ua.

Ilchenko A.V., Bahinskyi O.O.

Ways to reduce the error of measuring fuel consumption with a heat flowmeter

The work substantiates the need and suggests possible ways to reduce the error of measuring fuel consumption using a heat flow meter. The need to reduce the error arises under the specific conditions of operation of the heat flow meter on vehicles and the requirements placed on it in such cases, since heat flow meters are usually focused on a narrow range of fuel flow measurement and stationary flow modes, which cannot be accepted for transport internal combustion engines that operate for a long time at variable speed and load modes. Expansion of the range of measurement of fuel consumption with a heat flowmeter is proposed by the use of sequentially axially installed sections with different diameters. The condition for choosing the ratio of the diameters of the sections of the heat flowmeter is formulated, provided that the entire possible range of fuel consumption is covered by the internal combustion transport engine. The possibility of obtaining different speeds of fuel movement in sections of the heat flowmeter, the values of which can differ several times, is shown.

The ways of influencing the indicators of the radial heat flow in the heat flow meter have been analyzed, which will affect the indicators of the axial heat flow, make them more informative, and this, in turn, will affect the error in the measurement of fuel losses.

For a multi-section flow meter, a condition for choosing a temperature distribution with a minimum measurement error is formulated, it can be obtained from the readings of the thermotransducers of that particular tube of the multi-section heat flow meter, where the maximum total temperature difference between all adjacent thermotransducers was measured.

Keywords: internal combustion engine; fuel consumption; heat flow meter; heat transfer; radial heat flow; axial heat flow; heat converter; heating element.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2023.