



УДК 621.4 : 629.113.01

**CHANGE IN THE SENSITIVITY OF THE THERMANOEMOMETRIC
BIOFUEL FLOWMETER****АНАЛІЗ ЗМІНИ ЧУТЛИВОСТІ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ВИТРАТОМІРА
БІОПАЛИВ**

A.V. Pchenko / A.B. Ільченко

c.t.s., as. prof / к.т.н., доц.

Polissya National University, Zhytomyr, Staruy boulevard, 10008

Анотація. В роботі розглянуто процес зміни чутливості термоанемометричного витратоміра біопалив в залежності від витрати палив, відстані між нагрівачем та термоперетворювачами. Показано, що для поліпшення чутливості приладу необхідно узгоджувати вказані параметри між собою. Наведено залежність часу виходу витратоміра на робочій режим від питомої теплоємності біопалива для заданих параметрів нагрівача.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, біопаливо, витрата палива, термоанемометричний метод, термоанемометричний витратомір.

Вступ. Останнім часом необхідність переведення двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) на альтернативні види палива стає все більш актуальним. Для бензинових двигунів альтернативою є сумішеві біопалива (БП) з додаванням спиртів різних об'ємних концентрацій. Для дизельних двигунів в якості БП пропонується біодизель (БД), як суміш рослинної олії і метилового спирту в співвідношенні 7:1...10:1. БД (дизельне БП, МЕРО, РМЕ, FAME, EMAG, SME, SFME, біонафта тощо) – це вид БП (домішка), яку отримують з олій рослинного походження (ОРП), тваринного жиру тощо.

БД може використовуватись окремо або в суміші дизельним паливом (ДП) і позначається, наприклад, В100 (100 % БД), В40 – 40 % БД в нафтовому ДП.

БД найчастіше виробляють з ріпакової (84 % вмісту), соняшнікової (13 %) олій, кукурудзяної, конопляної тощо. ОРП є сумішшю тригліцеридів, ефірів, поєднаних з молекулою гліцерину. В процесі виготовлення БД видаляється гліцерин з заміною його на спирти (метиловий, етиловий, ізопропіловий тощо). В результаті цього утворюються ефіри жирних кислот та гліцерин. Для запобігання впливу мікробів на БД в процесі очищення і стабілізації БП використовують біоциди (спеціальні присадки), проводять зневоднення та обробку ультразвуком. При використанні етанолу отримують етилові ефіри БД, але ця технологія складніша, тому метанол є більш привабливим в даному випадку.

Витрата палива ДВЗ автомобіля є комплексним показником його технічного стану, залежить від конструктивних, експлуатаційних, регулювальних параметрів всіх його систем і агрегатів. Відомо, що її в процесі загального діагностування автомобіля приймають за діагностичний параметр. Витрата палива відповідає всім вимогам щодо діагностичних параметрів: інформативність, однозначність, а стабільність і чутливість залежать від прийнятого методу і засобів вимірювання. Можна стверджувати, що контроль витрати палива автомобілів в експлуатації є необхідним і сприяє підвищенню ефективності їх експлуатації.



Для стаціонарних ДВЗ контроль витрати палива не представляє великих труднощів, оскільки в таких умовах стають доступними до використання об'ємний і/або ваговий методи. Процес контролю витрат палив автомобіля пов'язаний з особливостями умов його експлуатації, які впливають на роботу засобу вимірювання (витратоміра) і, відповідно, на похибку вимірювання витрат. Контроль витрат палива необхідно проводити постійно в процесі експлуатації і вважати невід'ємною частиною процесу загальної діагностики автомобілів. Відомо, що паливо являється однією з основних складових собівартості технологічних та транспортних процесів, де задіяно ДВЗ. Контроль витрати палива є необхідною складовою в цілому для його обліку, планування робіт, навчання, обслуговування, виконання супутніх процесів тощо.

На автомобілях або не встановлюють витратомірів палив, або використовують програмну реєстрацію часу відкриття інжекторів (форсунок) і за відомим тиском перед ними та з урахуванням їх геометричних параметрів розраховують кількість поданого в циліндр ДВЗ палива. Таким чином, дані вимірювання можна вважати наближеними, при цьому їх похибка залежить від режиму роботи ДВЗ (миттєвої витрати палива) і пов'язана з технічним станом системи живлення ДВЗ (насос, форсунки, фільтри тощо). За абсолютну в даному випадку приймається витрата як сума кожної такої реєстрації за певний час роботи ДВЗ. В процесі експлуатації автомобіля важливою є абсолютна витрата палива, але внаслідок причин, що наведено вище, вона може суттєво відрізнятись від вимірної способом обліку часу відкритого стану інжекторів (форсунок).

На автомобільному транспорті для вимірювання витрат палив можна використовувати різні методи та витратоміри різних типів. Умови експлуатації конкретного транспортного засобу висувають специфічні вимоги до витратомірів, впливають на надійність їх роботи, похибку вимірювання тощо.

Наприклад, промисловість сьогодні пропонує витратоміри палива серії OGM-A витиснювального типу, прецизійні, з достатнім рівнем надійності. В їх конструкції використано два овальних ротори, які механічно зв'язані, обертаються і перепускають фіксований об'єм палива за оберт. Лічильна система фіксує кількість обертів роторів (сумарний об'єм палива) [1]. Абсолютна похибка вимірювання витрати палива в такому витратомірі дорівнює об'єму палива, що проходить за один оберт роторів витратоміра, і чим більше літраж ДВЗ, тим більше повинен бути об'єм палива, що відраховується за оберт (більша пропускна спроможність витратоміра), і відповідно, більша абсолютна похибка.

Як зазначає виробник, витратоміри OGM-A мають відносно високу точність вимірювання, його конструкція не пред'являє особливих вимог до форм та довжин прямих ділянок паливопроводів перед та після витратоміра, достатня надійність дозволяє використовувати їх для вимірювання витрат різних палив (дизельного, бензину, гасу тощо) з максимальною похибкою $\pm 0,5\%$ та не потребує формування потоку на вході. Однак, на точність вимірювання в даному випадку впливають деякі фізичні властивості палива (в'язкість, сила поверхневого натягу), тертя в підшипниках роторів, проникнення палива через ущільнення ротора, можливі пульсації потоку палива, сили інерції руху палива і роторів, розташування витратоміра відносно осі транспортного засобу.



В той же час виробник рекомендує використовувати даний витратомір лише для внутрішньогосподарського обліку об'ємів палива, що може свідчити про його «некоректну» роботу в реальних умовах експлуатації автомобіля (удари, вібрації, тряска, інерційні динамічні навантаження під час розгону/уповільнення автомобіля, відцентрові сили тощо).

Сьогодні промисловістю пропонується велика кількість витратомірів рідин, але вони не повною мірою відповідають реальним умовам експлуатації автомобілів. Тому, найбільш привабливими є витратоміри, принцип дії яких полягає в реєстрації процесу перенесення тепла тілом, витрата якого вимірюється - термоанемометричні витратоміри (ТАВ) [2-4]. Вони мають суттєві переваги відносно витратомірів інших принципів дії. Важливими з них зазначаються: точність вимірювання, яка не залежить орієнтації витратоміра в просторі, що дозволяє встановлювати його на автомобілі в зручному місці підкапотного простору, кабіні, салоні автомобіля; на похибку вимірювання не впливають вібрації, ударні навантаження, тиск і пульсації палива на вході у витратомір; встановлення двоконтурного ТАВ дозволяє зменшити похибку вимірювання витрати палива в системах живлення ДВЗ зі зворотнім зливанням палива в бак автомобіля [5].

Важливим недоліком ТАВ є відносно вузький діапазон вимірювання витрат палив. Вони як правило орієнтовані на стаціонарні витрати і таким чином не здатні охопити весь можливий діапазон витрат палива на всіх можливих режимах роботи ДВЗ. Ще один важливий недолік – ТАВ мають непостійну чутливість (відповідно, похибку вимірювання) на різних швидкостях потоку палива [6, 7]. Важливо розуміти, що робота ТАВ пов'язана зі створенням та підтриманням на його вході температурного поля з певними характеристиками в широкому діапазоні змінних температур експлуатації автомобіля. Підтримання температурного поля досягається роботою апаратних та програмних засобів ТАВ і потребує дослідження та подальшого врахування в алгоритмі роботи ТАВ.

Мета роботи: визначення факторів, що впливають на зміну чутливості ТАВ за різних витрат БП для зменшення похибок вимірювання їх витрат, та особливостей зміни часу виходу ТАВ на робочій температурний режим.

Основний матеріал. Початок роботи ТАВ, як приладу теплового принципу дії (рис. 1.), завжди пов'язаний з часом його виходу на заданий температурний режим з можливістю передачі тепла потоку БП, що рухається. При цьому важливо розглядати передачу тепла як в осьовому, так і в радіальному напрямках [8].

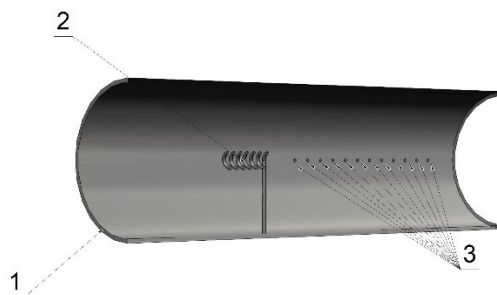


Рисунок 1 – ТАВ:

1 – трубка; 2 – нагрівач; 3 – термометрові (ТП)



В трубі 1 ТАВ встановлений нагрівач 2 електричного типу. Він підігріває потік палива до певної температури, яка не повинна перевищувати температуру спалаху БП. Температура БП по осі трубки реєструється ТП, яка залежить від фізичних властивостей та швидкості потоку БП (витрати).

Фізико-хімічні властивості дизельного та біодизельного палив відрізняються (табл. 1), що необхідно враховувати в алгоритмі роботи ТАВ. На сьогоднішній день актуальним є використання суміші ДП та ОРП, біодизельного палива. Але, їх застосування ускладнено більш високою густиною та кінематичною в'язкістю ОРП в порівнянні з нафтовим ДП.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості дизельного та біодизельного палив [13]

Показник	Одиниця виміру	ДП	Біодизельне паливо
Густина при температурі 15 °С	кг/м ³	820...845	860...900
Кінематичні в'язкість при температурі 40 °С	мм ² /с	2...4,5	3,5...5
Температура спалаху в закритому тиглі	°С	55	120
Цетанове число		45...55	120
Теплота згорання	МДж/кг	41...43,5	37,5
Хімічний склад:			
- вуглець С		87	77,5
- водень Н ₂	%	12,6	12
- кисень О ₂		0,4	10,5

В алгоритмі роботи ТАВ також необхідно враховувати температуру спалахування БП. Це найменша температура, за якою в даних умовах над поверхнею палива утворюється його суміш з повітрям, що може спалахувати під дією зовнішнього джерела. При цьому така суміш не завжди здатна стійко горіти, оскільки утворюється повільно. Відомо, що чим вища температура кипіння палива, тим вища його температура спалахування. Бензинові фракції нафти мають температуру спалахування до -40 °С, газові – понад 28 °С, масляні від 130...350 °С. Температура спалахування характеризує наявність у даному конкретному БП легких фракцій і вказує на рівень його пожежо- і вибухонебезпечності. Можна вважати, що температура спалахування – це така температура, за якої починається процес горіння. Державні стандарти України встановлюють для палив межу температури спалахування 61 °С, нижче за яку вони належать до легкозаймистих, вище – до горючих рідин.

Утворення паливо-повітряної суміші в трубі ТАВ можна вважати неможливим за відсутністю повітря, паливо знаходиться під тиском не тільки в процесі його споживання ДВЗ, але й під час його зупинки. Тому для розрахунків можна обирати температуру спалахування в закритому тиглі і/або температуру кипіння. Для ДП температура кипіння знаходиться в межах 170...380 °С, оскільки ці значення наведено для нормальних атмосферних умов, можливо



підвищувати температуру ДП в трубці ТАВ до 170 °С. Температура спалахування БД дорівнює 150 °С, що дає можливість нагрівати його в закритому об'ємі до температур, як і ДП.

Для підрахунку температури, на яку нагрівається БП в ТАВ, необхідно знати його питому теплоємність, масу та кількість теплоти, що до нього підведено. Отже, кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання палива, визначається, Дж:

$$Q_{\text{п}} = c_m m (T_2 - T_1) = c_m V \rho (T_2 - T_1), \quad (1)$$

де c_m – питома теплоємність БП, Дж/кг·°С;

m – маса БП, кг

T_2 – кінцева температура нагрівання, °С;

T_1 – початкова температура нагрівання, °С;

V – об'єм палива, що знаходиться біля нагрівача, м³;

ρ – густина БП, кг/м³

Кількість теплоти, що виділяється електричним нагрівачем, Дж:

$$Q_{\text{н}} = I^2 R \Delta t, \quad (2)$$

де I – струм, що протікає через нагрівач, А;

R – опір нагрівача, Ом;

Δt – час нагрівання палива до необхідної температури (час виходу ТАВ на робочій температурний режим), сек;

Об'єм БП, що знаходиться біля нагрівача, залежить від його геометричних параметрів і діаметра трубки ТАВ і може бути розрахований для конкретних конструктивних параметрів витратоміра.

На основі закону збереження енергії, за умови відсутності втрат тепла в атмосферу з врахуванням (1) та (2) отримуємо час нагрівання БП до необхідної температури (час виходу ТАВ на робочій температурний режим):

$$\Delta t = \frac{c_m V \rho (T_2 - T_1)}{I^2 R}, \text{ сек} \quad (3)$$

Питому теплоємність деяких палив наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Питома теплоємність деяких палив

Паливо	Питома теплоємність, Дж/кг·°С
Бензин	1400
Спирт	2500
ДП	1600
ОРП	1800
Гас	2100

Таким чином, питома теплоємність найбільш розповсюджених палив для ДВЗ (основних та/або сумішевих) знаходиться в межах $c_m=1400\dots2500$ Дж/кг·°С.

На початку роботи ТАВ необхідно нагріти БП від початкової температури (температура навколишнього середовища) до $T_2=170$ °С. Ця початкова температура обирається з умов експлуатації ДВЗ, що споживає БП. Наприклад, автомобіль КраЗ-6510-030 розрахований на експлуатацію в діапазоні температур -45...+50 °С, тому T_2-T_1 для даних температурних умов знаходиться



в межах +120...+215 °С. За негативних температур необхідно враховувати температуру застигання палив. Це в першу чергу стосується дизельних та сумішевих БП на основі ДП та ОРП. Температура застигання характеризує втрату паливом своєї плинності і визначає можливість його використання за даних температур. Температура застигання входить в умовне позначення зимових ДП. Для розширення можливого температурного діапазону використання БП в них додають депресари – домішки з високою поверхневою активністю. Вони стримують зрощування кристалів парафіну в паливі, що дозволяє отримати вказані палива з відносно низькою температурою застигання.

В якості нагрівача як правило використовують дріт з ніхрому, який має питомий опір 1-1,1 Ом мм²/м в залежності від марки сплаву. В попередніх дослідженнях в макетному зразку ТАВ нагрівач виконано у вигляді спіралі з ніхрому Х20Н80 діаметром 0,5 мм та довжиною 13 см (питомий опір 5,61 Ом/м). Наважко встановити, що даний нагрівач має електричний опір 0,7293 Ом, струм, що протікає крізь нього, дорівнює 16,45 А для електричної мережі живлення автомобіля 12 В. Для мережі 24 В даний струм дорівнюватиме 32,9 А. Тоді, час нагрівання БП (виходу ТАВ на робочій температурний режим), що знаходиться у внутрішньому об'ємі трубки на довжині нагрівача, можна визначити через діаметр трубки, довжину спіралі нагрівача та густину палива. Наприклад, для трубки діаметром 0,02 м та довжини спіралі нагрівача 0,025 м об'єм БП, що нагрівається по довжині нагрівача дорівнює 7,85·10⁻⁶ м³, а для БП з густиною 900 кг/м³ (табл. 1) маса палива, що нагрівається в розрахованому об'ємі, буде дорівнювати 7,065·10⁻³ кг. Згідно з (3) неважко встановити, що час виходу ТАВ на робочій режим з трубкою, що має зазначені геометричні параметри, при використанні БД від температури навколишнього середовища, наприклад -45 °С, складає:

$$\Delta t = \frac{1800 \cdot 7,065 \cdot 10^{-3} \cdot 215}{16,45^2 \cdot 0,7293} = 15 \text{ сек}$$

Треба зазначити, що при збільшенні діаметра трубки, зменшенні температури навколишнього середовища, зменшенні струму, що протікає через нагрівач, час виходу ТАВ на робочій температурний режим буде збільшуватись. Це обумовить збільшення похибки вимірювання витрат БП до моменту досягнення ТАВ робочого температурного режиму. Для запобігання збільшенню похибки вимірювання витрати БП під час виходу витратоміра на робочій температурний режим можна рекомендувати попередній підігрів БП (що не завжди є можливим під час запуску і прогріву холодного ДВЗ) або враховувати даний час в алгоритмі роботи ТАВ.

Розрахунки показують, що для електричної мережі живлення автомобіля 12 В, корпусу ТАВ з внутрішнім діаметром 0,01...0,08 м, спіраллю нагрівача з ніхрому Х20Н80 діаметром 0,5 мм та довжиною дроту 13 см у вигляді спіралі з розміром за довжиною спіралі 0,025 м, при використанні БП з питомою теплоємністю 1400...2500 Дж/кг°С час виходу ТАВ на робочій режим можна представити у вигляді залежності (рис. 2.).

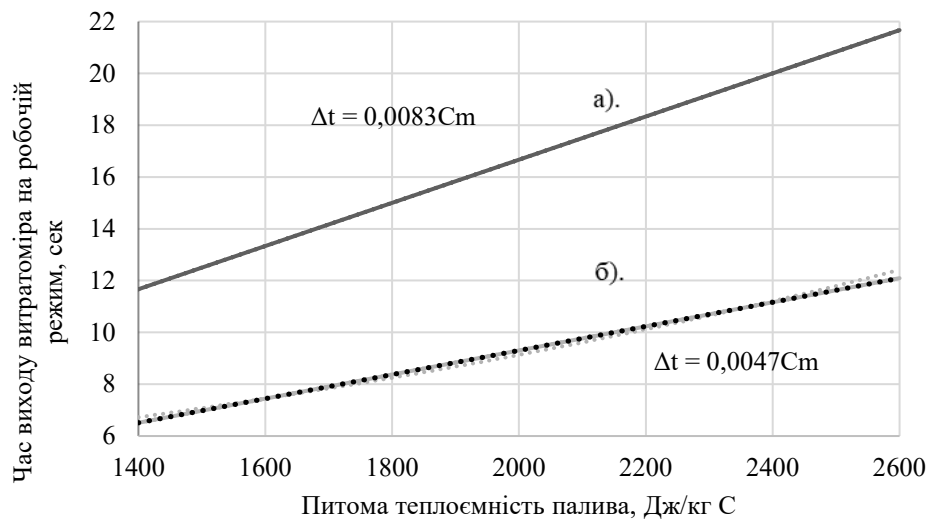


Рисунок 2 – Залежність часу виходу ТАВ на робочій температурний режим від питомої теплоємності БП (нагрівач X20H80 з опором 0,7293 Ом; об'єм палива, що нагрівається по осьовій довжині нагрівача, $7,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; температура нагріву від -45 до $170 \text{ }^\circ\text{C}$):

а). напруга живлення 12 В; б). напруга живлення 24 В

Авторська розробка

Аналіз рис. 2. дозволяє зробити висновок, що час виходу ТАВ з заданими конструктивними параметрами трубки і нагрівача на робочій температурний режим змінюється в широкому діапазоні і залежить від виду БП, напруги живлення нагрівача, температури початку нагріву і повинен бути врахований в процесі роботи ТАВ для зменшення похибки вимірювання витрат БП. Для інших напруг живлення в електричній мережі автомобіля час виходу ТАВ на робочій режим визначається інтерполяцією або безпосереднім вимірюванням температури в зоні нагрівача. Треба зазначити, що в ТАВ мають місце втрати тепла в стінки трубки (радіальний тепловий потік). Це знижує температуру в зоні нагрівача і впливає на її розподіл в потоці, що реєструється ТП. В свою чергу вказані втрати впливають на похибку вимірювання витрат БП. Таким чином, в алгоритмі роботи ТАВ повинно бути закладено періодичний контроль температури в зоні нагрівача та підтримка її певного значення. Радіальний тепловий потік в ТАВ завжди спрямований від нагрівача до стінки корпусу трубки, оскільки температура палива в зоні нагрівача завжди вища за температуру навколишнього середовища. За різних змінних витрат БП (різних швидкостях потоку) для підтримання постійної температури палива в зоні нагрівача виникає необхідність її контролю та зміни кількості тепла, що віддається нагрівачем паливу (зміни струму, що протікає в нагрівачі). Алгоритм роботи ТАВ повинен мати блок, що відповідає за контроль і регулювання температури палива в зоні нагрівача. Для БП, що розглядаються в даній роботі, за значення температури палива в зоні нагрівача можна прийняти величину $170 \text{ }^\circ\text{C}$. Для вказаних БП та наведених конструктивних параметрах ТАВ перед початком вимірювання необхідно витримувати час виходу витратоміра на робочій температурний режим не менш, ніж 6 сек (рис. 2.). Для визначення



значення мінімального часу перед початком вимірювань (часу затримки) необхідно враховувати вид БП, температуру навколишнього середовища та конструктивні параметри ТАВ.

Розглянемо процес зміни чутливості ТАВ БП. Схема зміни температури, що реєструється двома сусідніми ТП (ТП y (точка А) знаходиться біля нагрівача, ТП $y+1$ (точка Е) – на відстані L) для певної постійної швидкості потоку палива в трубці ТАВ (рис. 3.).

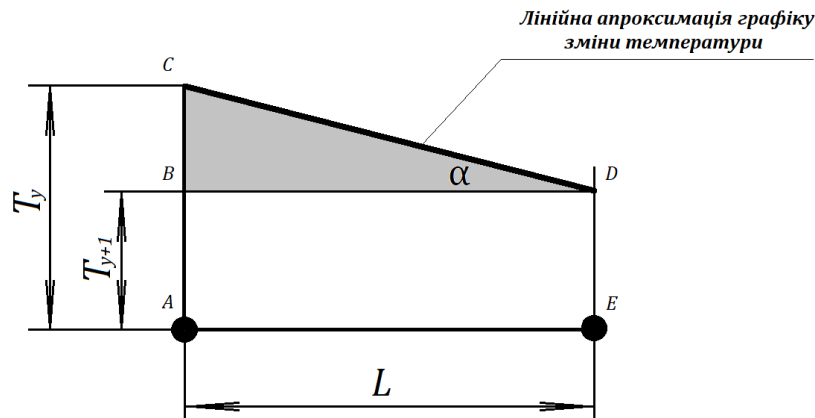


Рисунок 3 – Схема зміни температури між сусідніми ТП ТАВ (об'ємна витрата палива $Q=\text{const}$): T_y – температура, що реєструється ТП в точці А; ; T_{y+1} – температура, що реєструється ТП в точці Е

Авторська розробка

З рис. 3 видно, що під час руху палива від ТП y до ТП $y+1$ його температура знижується на величину:

$$\Delta T = T_y - T_{y+1} \quad (4)$$

При цьому для відносно малих значень L між ТП важко зареєструвати зміну температури ΔT , тому величину L необхідно обирати такою, щоб для даної постійної швидкості потоку можна було виміряти величину ΔT з задовільною точністю. Для малих значень L в режимах змінних витрат величини швидкостей руху палива також можна вважати в точках А та В практично однаковими.

Зміна внутрішньої енергії нагрітого палива для заданої відстані L відбувається пропорційно площі трикутника BCD, тобто пропорційно величині ΔT , яка дорівнює:

$$\Delta T = L \operatorname{tg} \alpha \quad (5)$$

Треба підкреслити, чим більша площа трикутника BCD для заданої відстані між ТП (більша величина ΔT , яка реєструється між двома ТП), тим більша чутливість ТАВ на даній ділянці трубки. Звідси постає логічний висновок про те, що більшу точність вимірювання витрати БП за заданими значеннями L можна досягнути на ділянках з найбільшими різницями температур між сусідніми ТП, що повинно бути враховано в алгоритмі роботи ТАВ.

При збільшенні витрати палива температура, яку реєструє перетворювач T_{y+1} , буде збільшуватись за рахунок зменшення часу на відведення тепла від палива (рис. 4.).



можна розрахувавши суму різниць температур між всіма сусідніми ТП для відомої витрати БП.

Висновки.

Встановлено залежність часу виходу витратоміра на робочій режим від питомої теплоємності БП для заданих параметрів нагрівача. Запропоновано схему зміни чутливості ТАВ, з якої доведено, що чутливість ТАВ залежить від поточного значення витрати БП та відстані між ТП, що необхідно враховувати для забезпечення заданого значення чутливості.

Література:

1. Ел ресурс: <http://prock.com.ua/cowell-to-oval/>
2. Korobiichuk I., Ilchenko A. Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement. Sensors 2022, 22, 8882., 2022. <https://doi.org/10.3390/s22228882>.
3. Korobiichuk, I. Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A., ...Nowicki, M., Szewczyk, R. 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2017, 2017, 2017-January, p. 975–979.
4. Korobiichuk, I. Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport / Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A., Trostenyuk, Y. // 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-европейский журнал передовых технологий. - Харків. – 2014. – № 6/7(72). – С. 50-54.
6. Bezvesilna, O. Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels / Bezvesilna, O., Kamiński, M., Ilchenko, A. // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017, 550, p. 505–511.
7. Безвесільна О.М. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів / О.М. Безвесільна, А.В. Ільченко, А.Г. Ткачук, С.О. Пархоменко // Вісник Інженерної академії України, 2013, Випуск 3-4, - с. 216-222.
8. Ільченко А.В. Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром / А.В. Ільченко, О.О. Багінський // Технічна інженерія. № 1(91). 2023. Житомир. – с. 207-213.

Abstract. The paper examines the process of changing the sensitivity of the thermo-anemometric biofuel flow meter depending on the fuel consumption, the distance between the heater and the heat converters. It is shown that in order to improve the sensitivity of the device, it is necessary to coordinate the specified parameters among themselves. The dependence of the time when the flow meter goes into operation on the specific heat capacity of biofuel for the given parameters of the heater is given.

Key words: internal combustion engine, biofuel, biodiesel, fuel consumption, thermo-anemometric method, thermo-anemometric flowmeter.

Статтю відправлено: 20.03.2024 р.

© Ільченко А.В.