

УДК 531.383:621.436:665.75

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28723

РОЗРОБЛЕННЯ КАЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИТРАТОМІРА МОТОРНОГО ПАЛИВА З ПІДВИЩЕНОЮ ТОЧНІСТЮ ВИМІРІВ РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ НА ВХОДІ

А. В. Ільченко

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра автомобілів та автомобільного господарства
Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005
E-mail: avi_7@rambler.ru

О. М. Безвесільна

Доктор технічних наук, професор
Кафедра приладобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: bezvesilna@mail.ru

В статті розроблено калориметричний витратомір моторного палива (біопалива) з підвищеною точністю виміру витрат. Показано, що підвищення точності забезпечується керуванням температурою на входах трубки прямого потоку палива та трубки зворотного потоку палива витратоміра. Отримано зменшення відносної похибки на 7–13 % у порівнянні з витратоміром-прототипом без регулювання температури на вході

Ключові слова: двигун, температура, вимірювання, калориметр, теплопередача, теплопровідність, витратомір, паливо, біопаливо, витрата

В статье разработан калориметрический расходомер моторного топлива (биотоплива) с повышенной точностью измерения расходов. Показано, что повышение точности обеспечивается управлением температурой на входах трубки прямого потока топлива и трубки обратного потока топлива расходомера. Получено уменьшение относительной погрешности на 7–13 % по сравнению с расходомером-прототипом без регулирования температуры на входе

Ключевые слова: двигатель, температура, измерения, калориметр, теплопередача, теплопроводность, расходомер, топливо, биотопливо, расход

1. Вступ

Розроблений калориметричний витратомір з регулюванням температури (КВРТ) моторного палива належить до галузі вимірювальної техніки і може бути використаний для вимірювання і контролю витрат моторного палива (в тому числі й біопалива).

Визначенням та нормуванням витрат палива на автотранспорті займалися та займаються багато вчених, як за кордоном, так і в Україні. Серед вітчизняних вчених найбільш відомими є роботи Говоруценка М. Я., Говоруна А. Г., Гутаревича Ю. Ф., Клименка О. А., Корпача А. О., Мерживської Л. П., Редзюка А. М. та ін.

Аналізуючи різноманіття умов експлуатації автотранспорту, необхідно враховувати умови: дорожні, умови руху, транспортні, природно-кліматичні, сезонні. Крім того, автотранспорт працює в умовах динамічних навантажень, вібрації, впливу агресії середовища та в широкому діапазоні температур навколишнього середовища. На точність виміру витрати палива, в цьому випадку будуть також додатково впливати фактори: розташування витратоміра відносно горизонту, коливання його опори як в вертикальній, так і в горизонтальній площинах, стабільність напруги живлення тощо [1].

Контроль витрат моторного палива є обов'язковою складовою сучасних технологій енергозбереження,

впровадження яких сьогодні є життєво важливим. Це не обходить і автотранспорт та висуває специфічні вимоги до витратомірів, вимагає підвищення точності та зменшення похибок вимірювань [1, 2].

На точність виміру витрат палива впливають його фізичні властивості. Особливо це проявляється для сумішевих палив. Домішка до основного палива в різних об'ємних концентраціях змінює його теплопровідність, густину та в'язкість. Саме це стає причиною зміни (як правило в гірший бік) чутливості приладу та точності вимірювання [2].

Особливої уваги потребують витратоміри біопалив: наявність складової біологічного походження впливає на величину похибки виміру їх витрат та потребує врахування не тільки природи цієї складової, а також багатьох їх фізичних властивостей: густини, сили поверхневого натягу, тиску насичених парів, теплопровідності. Треба враховувати, що різна об'ємна концентрація домішки до основного палива по різному вплине на похибку вимірювання їх витрат.

Тому, розроблення засобів визначення витрат палив (біопалив) на транспорті є актуальною науково-практичною задачею, а калориметричні витратоміри якнайбільше відповідають сучасним вимогам вимірювання витрат палив (біопалив) та умовам роботи на автотранспорті [1].

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [3] розглянуто витратомір підвищеної точності, що має в своєму складі два циклоїдних внутрішніх ротора. Однак, збільшення маси роторів, пульсації палива на вході у витратомір, динамічні навантаження, перепуск палива через нещільності між корпусом та циклоїдами робить його використання в реальних умовах експлуатації автомобілів неможливим.

В [4, 5] наведено конструкції, розглянуто принципи роботи та характеристики існуючих термоанемометричних витратомірів (ТАВ) для різних рідин. Також дано характеристики та аналіз конструкцій сучасних термоперетворювачів, що використовуються в цих ТАВ, наведено їх порівняльні характеристики, показано недоліки та переваги. Однак, в даних ТАВ кількість перетворювачів, що використовується, дорівнює двом: один встановлений на нагрівальному елементі ТАВ, другий – на відстані від нього.

В [6] наведено довідкову інформацію про принципи дії колориметрів, основні закони теплофізики, що в них працюють, дано характеристики деяких термоперетворювачів та нагрівачів. Однак, розглядаються прості схеми ТАВ, які не дають необхідну точність вимірювання та мають змінну чутливість для змінних витрат палив, які спостерігаються в двигунах автомобілів.

Аналіз [7, 8] показав що наведені в них ТАВ використовуються лише для визначення витрат газів або рідин, причому – з певними властивостями. До складу ТАВ входять два датчики температури та один нагрівальний елемент. Як і в попередніх випадках, один датчик встановлений на нагрівальному елементі, а другий – на відстані від нього. Така конструкція орієнтована на конкретний досить широкий діапазон витрат, що вносить суттєву похибку вимірювань, яка не відповідає вимогам вимірювання витрат палив на автотранспорті.

Також треба враховувати, що сучасні системи живлення двигунів мають зворотне зливання палива в бак (лінії повертання палива), що вимагає необхідність враховувати кількість палива, що не використана (споживана) двигуном і повертається в бак. Тому, витратомір палива повинен забезпечувати не тільки високу точність вимірювання витрат моторних палив, але й можливість вимірювання витрат моторних палив двигунів з системами зворотного зливання палива в бак.

Аналіз існуючих витратомірів показує, що найбільше для умов експлуатації на транспорті підходять калориметричні витратоміри. Це пов'язано в основному з умовами їх експлуатації безпосередньо на автомобілі. Але, в цих витратомірах у потоках палива завжди спостерігаються нерівномірності швидкостей, а внаслідок цього і температур. Особливо це стосується ДП з домішками ОРП, що мають іншу відносно ДП теплопровідність, підвищену густину та в'язкість. Все це зумовлює наявність температурної похибки та похибки в'язкого тертя у прямому та зворотному потоках палива. При цьому всі вказані похибки різні і залежать від значень температур палива на входах у трубку прямого потоку палива (ППП) та трубку зворотного потоку палива (ЗПП). А відсутність засобів регулювання температури на входах прямого та зворотного потоків палива призводить до загальної похибки вимірювання витрат палива [2].

3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розроблення КВРТ для вимірювання витрат моторних палив з підвищеною точністю (в тому числі й палив з альтернативної сировини) для сучасних систем живлення двигунів автомобілів.

Для досягнення вказаної мети вирішувалися задачі:

- розроблення конструкції КВРТ з підвищеною точністю вимірів регулюванням температури палива на вході;

- створення макетного зразка КВРТ, налагодження та перевірка його працездатності в умовах руху автомобіля;

- оцінка відносної похибки вимірювання витрат палива КВРТ, що розроблений, та отримання її кількісних значень на різних режимах роботи двигуна автомобіля (різних витратах палива) щодо ТАВ без регулювання температури палива на вході.

4. Калориметричний витратомір з регулюванням температури палива на вході

4. 1. Структура схема, конструкція та робота витратоміра

Під час розробки за прототип було обрано відомий калориметричний витратомір моторного палива з підвищеною точністю вимірів [2].

Витратомір-прототип, як і КВРТ, що пропонується (рис. 1), містить послідовно з'єднані блок віднімання, блок логарифмування, блок лінійної апроксимації та блок обчислення витрат палива, трубку з ППП, в якій розміщений нагрівач ППП, по різні боки якого розташовані дві групи термоперетворювачів ППП, в кожній з яких термоперетворювачі ППП розташовані послідовно на заданих відстанях від нагрівача ППП, поза зоною дії якого розміщений термоперетворювач ППП, трубку зі ЗПП, в якій розміщений нагрівач ЗПП, по різні боки якого розташовані дві групи термоперетворювачів ЗПП, в кожній з яких термоперетворювачі ЗПП розташовані послідовно на заданих відстанях від нагрівача ЗПП, поза зоною дії якого розміщений термоперетворювач ЗПП, причому однойменні виходи груп термоперетворювачів ППП та груп термоперетворювачів ЗПП підключені попарно до входів блока віднімання.

Проте на відміну від КВРТ, у пристрої-прототипі виходи термоперетворювача ППП та термоперетворювача ЗПП підключені до входів блока віднімання.

Така конструкція витратоміра-прототипу хоч і дозволяє вимірювати витрати палива двигунів з системами зворотного зливання палива в бак (лініями повертання палива) [10, 11] та підвищує точність вимірювання витрат палива, але не враховує суттєву різницю температур на входах ППП (з бака) та ЗПП (паливо виходить з паливного насоса двигуна і підігрівається). З урахуванням того, що температура у системі змащування паливного насоса високого тиску дизеля досягає десятків градусів за Цельсієм (а паливо з бака подається безпосередньо до паливного насоса високого тиску), можна стверджувати, що температура палива на вході і виході паливного насоса високого тиску дизеля змінюється суттєво.

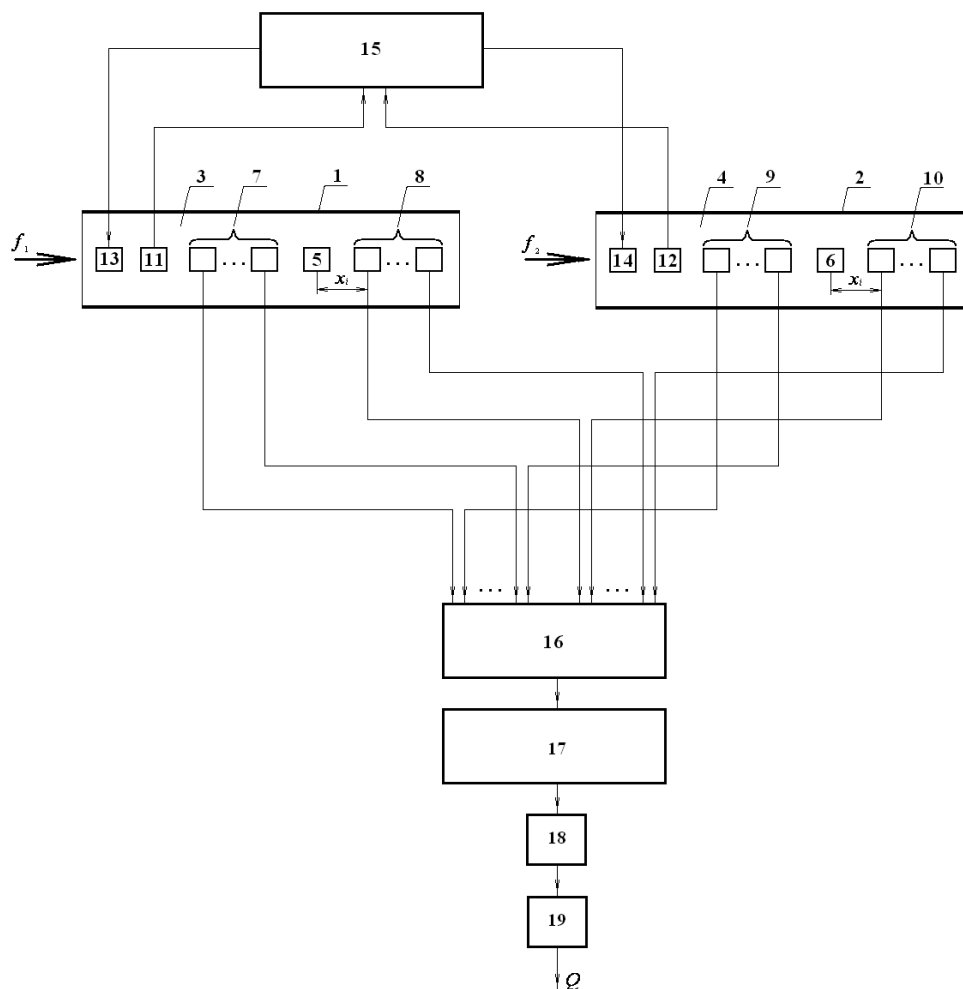


Рис. 1. Структурна схема КВРТ: 1 – трубка ППП; 2 – трубка ЗПП; 3 – ППП; 4 – ЗПП; 5 – нагрівач ППП; 6 – нагрівач ЗПП; 7, 8 – групи термоперетворювачів ППП; 9, 10 – групи термоперетворювачів ЗПП; 11 – термоперетворювач ППП; 12 – термоперетворювач ЗПП; 13 – вхідний нагрівач ППП; 14 – вхідний нагрівач ЗПП; 15 – блок керування температурою; блок лінійної апроксимації; 16 – блок віднімання; 17 – блок логарифмування; 18 – блок лінійної апроксимації; 19 – блок обчислення витрат моторного палива

КВРТ містить блок 15 керування температурою, трубку 1 з ППП, трубку 2 зі ЗПП та послідовно з'єднані блок 16 віднімання, блок 17 логарифмування, блок 18 лінійної апроксимації та блок 19 обчислення витрат палива.

У трубі 1 з ППП на вході прямого потоку 3 палива встановлений вхідний нагрівач 13 ППП. В середині трубки 1 з ППП розміщений нагрівач 5 ППП, по різні боки якого розташовані дві групи 7, 8 термоперетворювачів ППП. В кожній з них термоперетворювачі ППП розташовані послідовно на заданих відстанях X_i від нагрівача 5 ППП, поза зоною дії якого розміщений термоперетворювач 11 ППП. При цьому $i=1, \dots, N_1+N_2$, де N_1, N_2 – кількість термоперетворювачів ППП у групах 7, 8 термоперетворювачів ППП відповідно.

У трубі 2 зі ЗПП на вході зворотного потоку 4 палива встановлений вхідний нагрівач 14 ЗПП. В середині трубки 2 зі ЗПП розміщений нагрівач 6 ЗПП, по різні боки якого розташовані дві групи 9, 10 термоперетворювачів ЗПП. В кожній з них термоперетворювачі ЗПП розташовані послідовно на заданих відстанях X_i від нагрівача 6 ЗПП, поза зоною дії якого розміщений термоперетворювач 12 ЗПП. При цьому $i=1, \dots, N_1+N_2$, де

N_1, N_2 – кількість термоперетворювачів зворотного потоку у групах 9, 10 термоперетворювачів ЗПП відповідно, що дорівнює кількості термоперетворювачів ППП у групах 7, 8 термоперетворювачів ППП відповідно.

Одноіменні виходи груп 7, 8 термоперетворювачів ППП та груп 9, 10 термоперетворювачів ЗПП підключені попарно до входів блока 16 віднімання. Вихід блока 16 віднімання підключений до входу блока 17 логарифмування, вихід якого підключений до входу блока 18 лінійної апроксимації, вихід якого підключений до входу блока 19 обчислення витрат палива, вихід якого є виходом всього пристрою.

Виходи термоперетворювача 11 ППП та термоперетворювача 12 ЗПП з'єднані з входами блока 15 керування температурою. Виходи блока 15 керування температурою підключені до входів вхідного нагрівача 13 ППП та вхідного нагрівача 14 ЗПП.

КВРТ палива працює таким чином. Прямий потік 3 палива, витрати f_1 якого потрібно виміряти, протікає по трубі 1 з ППП повз вхідний нагрівач 13 ППП, термоперетворювач 11 ППП, нагрівач 5 ППП та дві групи термоперетворювачів 7, 8 ППП.

Зворотний потік 4 палива, витрати f_2 якого теж необхідно виміряти, протікає по трубці 2 зі ЗПП повз вхідний нагрівач 14 ЗПП, термоперетворювач 12 ЗПП, нагрівач 6 ЗПП та дві групи термоперетворювачів 9, 10 ЗПП.

За даними термоперетворювача 11 ППП та термоперетворювача 12 ЗПП блок 15 керування температурою за допомогою вхідного нагрівача 13 ППП та вхідного нагрівача 14 ЗПП встановлює (за рахунок електричної енергії джерела живлення, на схемі не показано) на входах трубки 1 ППП та трубки 2 ЗПП однакову температуру потоків палива.

Нагрівач 5 ППП та нагрівач 6 ЗПП підігривають прямий 3 та зворотний 4 потоки палива та створюють в них температурне поле. Значення температури прямого 3 та зворотного 4 потоків палива залежать від витрат палива f_1 та f_2 (швидкостей потоків), відстаней від нагрівача 5 ППП до кожного термоперетворювача ППП у групах 7, 8 термоперетворювачів ППП та відстаней від нагрівача 6 ЗПП до кожного термоперетворювача ЗПП у групах 9, 10 термоперетворювачів ЗПП та збільшуються (перед нагрівачем 5 ППП та нагрівачем 6 ЗПП) або зменшуються (після нагрівача 5 ППП та нагрівача 6 ЗПП) за експоненціальним законом. При цьому за температурами палива, що створюються нагрівачем 5 ППП та нагрівачем 6 ЗПП і фіксуються групами 7, 8 термоперетворювачів ППП та групами 9, 10 термоперетворювачів ЗПП, можна визначити витрати палива у прямому 3 та зворотному 4 потоках палива [7].

Результати вимірювання температури палива в зонах дії нагрівача 5 ППП та нагрівача 6 ЗПП з однойменних виходів груп 7, 8 термоперетворювачів ППП та груп 9, 10 термоперетворювачів ЗПП надходять попарно на входи блока 16 віднімання, де обчислюється різниця температур між вказаними термоперетворювачами для прямого 3 та зворотного 4 потоків палива.

Виміряне значення витрат палива за наявності похибок у прямому потоці 3 палива (паливо, що відбирається з баку) дорівнює:

$$f_1 = Q_1 + \Delta_{T_1} + \Delta_{VT_1} + \Delta_{HT_1}, \quad (1)$$

де Q_1 – істинне значення витрат палива у прямому потоці 3 палива; $\Delta_{T_1}, \Delta_{VT_1}, \Delta_{HT_1}$ – температурна похибка, похибка сили в'язкого тертя та інші похибки у прямому потоці 3 палива відповідно.

Виміряне значення витрат палива за наявності похибок у зворотному потоці 4 палива (паливо, що повертається до баку) дорівнює:

$$f_2 = Q_2 + \Delta_{T_2} + \Delta_{VT_2} + \Delta_{HT_2}, \quad (2)$$

де Q_2 – істинне значення витрат палива у зворотному потоці 4 палива; $\Delta_{T_2}, \Delta_{VT_2}, \Delta_{HT_2}$ – температурна похибка, похибка сили в'язкого тертя та інші похибки у зворотному потоці 4 палива відповідно.

Оскільки витрата палива, що поступає в ДВЗ, це різниця між (1) та (2), то сумарна температурна похибка, сумарна похибка сили в'язкого тертя та інші під час роботи двигуна завжди зменшується. Внаслідок роботи блока 15 керування температурою, вхідного нагрівача 13 ППП та вхідного нагрівача 14 ЗПП, температура прямого потоку 3 палива та зворотного потоку 4 палива наближаються одна до одної:

$$|T_{BX_2} - T_{BX_1}| \Rightarrow 0, \quad (3)$$

де T_{BX} – температура палива на вході трубки 1 ППП; T_{BX_2} – температура палива на вході трубки 2 ЗПП.

Тобто, для трубки 1 ППП та для трубки 2 ЗПП температурна похибка та похибка сили в'язкого тертя зменшуються, а значить зменшується сумарна температурна похибка та сумарна похибка сили в'язкого тертя всього приладу. Це призводить підвищення точності вимірювання витрат палива, особливо витрат палива з альтернативної сировини.

При цьому витрата палива у прямому потоці 3 палива завжди більша, ніж у зворотному потоці 4 палива (двигун споживає потрібну кількість палива, а зайве паливо повертається до баку), або дорівнює їй (двигун не працює, все паливо повертається до баку).

Витрата палива безпосередньо двигуном складає:

$$Q = f_1 - f_2 = Q_1 - Q_2 + \Delta_{T_1} - \Delta_{T_2} + \Delta_{VT_1} - \Delta_{VT_2} + \Delta_{HT_1} - \Delta_{HT_2}. \quad (4)$$

Як видно з (4), маємо зменшення температурної похибки, похибки сили в'язкого тертя. Отже, маємо і зменшення сумарної похибки вимірювання витрат палива.

Далі результати обчисленої різниці температур відповідних термоперетворювачів прямого 3 та зворотного 4 потоків палива надходять на вхід блока 17 логарифмування, де визначається залежність $T(x)$ температури у заданій точці потоку палива від відстані x цієї точки до нагрівача 5 ППП в трубці 1 ППП та нагрівача 6 ЗПП в трубці 2 ЗПП.

З блока 17 логарифмування дані надходять на вхід блока 18 лінійної апроксимації. Блок 18 лінійної апроксимації проводить апроксимацію залежності $T(x)$, що надана блоком 17 логарифмування. Блок 19 обчислення витрат палива визначає поточні значення швидкості потоку палива та, відповідно, його витрат з урахуванням конструктивних даних, наприклад, перерізів трубки 1 з ППП та трубки 2 зі ЗПП. Значення об'ємної та масової витрат палива отримують за відомими формулами [12, 13].

Для перевірки працездатності КВРТ було створено та досліджено його діючий макет. В якості трубки 1 з ППП та трубки 2 зі ЗПП було використано металеві трубки діаметром 20 мм та довжиною 400 мм. В якості джерела живлення використовували блок живлення постійного струму Б5-47 з вихідною напругою 12 В. Нагрівач 5 ППП, нагрівач 6 ЗПП, вхідний нагрівач 13 ППП та вхідний нагрівач 14 ЗПП були виготовлені з дроту високого електричного опору (ніхром – Х20Н80) у вигляді циліндричних котушок.

У макетному зразку біло використано по сім термоперетворювачів ППП у кожній з груп 7, 8 термоперетворювачів ППП та по сім термоперетворювачів ЗПП у кожній з груп 9, 10 термоперетворювачів ЗПП. В якості всіх термоперетворювачів застосовували транзистори КТ342, в яких змінюється струм колектора під час зміни температури в прямому 3 та зворотному 4 потоках палива.

Відстань від нагрівача 5 ППП до першого термоперетворювача ППП в групах 7, 8 термоперетворювачів ППП дорівнювала 3 см, до останнього – 8 см. Також і відстань від нагрівача 6 ЗПП до першого термоперетворювача ЗПП в групах 9, 10 термоперетворювачів ЗПП теж дорівнювала 3 см, до останнього – 8 см.

4. 2. Дослідження макетного зразка КВРТ

Характеристики КВРТ досліджувалися на діючому макеті в діапазоні витрат палива ДВЗ, що працює на різних швидкісних та навантажувальних режимах. Для досліджень використовувалося дизельне моторне паливо згідно ДСТУ 3868-99 «Паливо дизельне. Технічні умови».

Для порівняння КВРТ з витратоміром-прототипом спочатку вимірювали витрати палива без використання блока 15 керування температурою. Потім вмикали блок 15 керування температурою, який на основі даних термоперетворювача 11 ППП та термоперетворювача 12 ЗПП за допомогою вхідного нагрівача 13 ППП та вхідного нагрівача 14 ЗПП створював температуру палива на входах трубки 1 ППП та трубки 2 ЗПП однаковими.

В результаті досліджень встановлено, що похибка вимірювань витрат палива КВРТ, що розроблений, порівняно з витратоміром-прототипом зменшилася на 7–13 % в залежності від режиму і роботи двигуна.

Таким чином, розроблений КВРТ забезпечує підвищення точності вимірювань витрат палива, а також витрат палива з альтернативної сировини, и та-

кож може бути застосований для двигунів з системами зворотного зливання палива в бак.

5. Висновки

У роботі розроблено конструкцію калориметричного витратоміра для вимірювання витрат моторних палив з підвищеною точністю (в тому числі й палив з альтернативної сировини) для сучасних систем живлення двигунів автомобілів з регулюванням температури палива на вході, створено його макетний зразок та проведена перевірка його працездатності в умовах руху автомобіля.

Встановлено, що похибка вимірювань витрат палива калориметричного витратоміра з регулюванням температури палива на вході, що розроблений, порівняно з калориметричним витратоміром без регулювання температури палива на вході зменшилася на 7–13 % в діапазоні витрат палива двигуном автомобіля, що працює на різних швидкісних та навантажувальних режимах.

Література

1. Безвесільна, О. М. Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів [Текст] / О. М. Безвесільна, А. В. Ільченко, А. Г. Ткачук, С. О. Пархоменко // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – № 3-4. – С. 216–222.
2. Безвесільна, Е. Н. Калориметрический расходомер моторных топлив с повышенной точностью измерения расходов [Текст] / Е. Н. Безвесільна, А. В. Ільченко, Ю. В. Тростенюк // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. Сборник статей, 2013. – С. 14–19.
3. Knothe, G. The Biodiesel Handbook [Text] / ed. G. Knothe, J. Gerpen, J. Krahl. – AOCS Publishing, 2005. – 286 p.
4. Liu, S. A High-Pressure Bi-Directional Cycloid Rotor Flowmeter [Text] / S. Liu, F. Ding, C. Ding, Z. Man // Sensors. – 2014. – Vol. 14, Issue 8. – P. 15480–15495. doi: 10.3390/s140815480.
5. Thermal Flowmeter Technology [Electronic resource] / BCC Research. – 2013. – Available at: <http://www.flowmeters.com/thermal-technology>.
6. Boyes, W. Instrumentation Reference book [Text] / W. Boyes (Ed.); edition 4. – Linacre House, 2010. – 530 p.
7. Frenzel, F. Industrial Flow Measurement Basics and Practice [Text] / F. Frenzel, H. Grothey, C. Habersetzer, M. Hiatt et al. – ABB Automation Products GmbH, 2011. – 290 p.
8. Duffy, G. J. Thermal mass flow measurement [Electronic resource] / G. J. Duffy, B. Eng. – Dublin City University, 2000. – Available at: http://doras.dcu.ie/18552/1/Gabriel_J_Duffy.pdf.
9. Economical thermal mass flow sensor based on constant temperature anemometry [Electronic resource] / Nurnberg, Germany, 1999. – Available at: http://www.bronkhorst.com/files/published_articles/sensor99.pdf.
10. Топливные системы дизелей с насос-форсунками и индивидуальными ТНВД [Текст] : пер. с англ. Учеб. пособие. – М. : ЗАО «Легион-Автодата», 2006. – 48 с.
11. Дизельные аккумуляторные топливные системы Common Rail: Пер. с англ. Учеб. Пособие [Текст] / М.: ЗАО «Легион-Автодата», 2005. – 48 с.
12. Дорожовець, М. М. Засоби і методи вимірювань неелектричних величин : підручник [Текст] / М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник, О. В. Івахів, Т. Г. Бойко; під ред. Є. С. Поліщук. – Львів : «Бескид Біт», 2008. – 368 с.
13. Спектор, С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений [Текст] : учеб. пос. для вузов / С.А. Спектор. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.