

ВПЛИВ ДЕЯКИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООВОГО ВИТРАТОМІРА ПАЛИВА НА ПЕРЕДАЧУ ТЕПЛА В НЬОМУ

Державний університет «Житомирська політехніка»

В статті проаналізовано вплив, взаємозв'язок та значення конструктивних параметрів теплового витратоміра на його радіальний і осьовий теплові потоки в трубі (діаметр трубки, діаметр нагрівача та їх співвідношення, теплопровідність матеріалу трубки тощо). Показано, що на етапі вибору конструктивних параметрів теплового витратоміра необхідно враховувати вплив його радіального теплового потоку на осьовий. Обґрунтовано вплив радіального теплового потоку трубки витратоміра на похибку вимірювання витрат палива. Наведено аналітичні залежності, які дозволяють визначити осьовий тепловий потік, проведено їх аналіз щодо впливу конструктивних параметрів трубки теплового витратоміра на перенесення тепла. Намічено заходи та розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів теплового витратоміра на етапі його проектування, розробки або використання за умови зменшення впливу радіального теплового потоку на осьовий, що дозволить зменшити сумарну похибку вимірювання витрат палива.

Щодо вибору конструктивних параметрів теплових витратомірів за умови зменшення похибки вимірювання витрат палива показано, що максимально можливе зменшення діаметра нагрівача та збільшення діаметра трубки витратоміра зменшують вплив радіального теплового потоку на осьовий і, таким чином, зменшують сумарну похибку вимірювання витрат палива. Наведено чисельні співвідношення діаметра трубки до діаметра нагрівача витратоміра для різних за теплопровідністю матеріалів трубки за умови мінімального їхнього впливу на похибку вимірювання витрат палива. Для матеріалів трубки з теплопровідністю $0,16...0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (ебоніт, фторопласт Ф-5 тощо) співвідношення діаметрів трубки та нагрівача повинні бути в межах $1,51...1,62$, а для матеріалів з більш високою теплопровідністю (коефіцієнт теплопровідності більший за $14,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) це співвідношення повинно дорівнювати $1,99$.

Ключові слова: тепловий потік, тепловий витратомір, калориметричний витратомір, витрата палива, термоанемометричний витратомір, конструктивний коефіцієнт, теплопровідність, коефіцієнт теплопровідності.

Вступ, постановка проблеми, її зв'язок з практичними завданнями

Необхідність обліку витрат рідкого палива на транспорті, де вони займають перше місце в собівартості перевезень, не викликає сумнівів. Це також стосується і стаціонарних силових установок, наприклад, для виробництва електричної енергії. Облік досягається розробкою і впровадженням приладів, за допомогою яких вимірюється витрата палива. На транспорті, внаслідок специфіки його роботи, найкраще використовувати калориметричні витратоміри [1–3]. На сьогодні відомі описи деяких конструкцій витратомірів де наводяться їх технічні характеристики. Але, узагальнений аналіз конструктивних параметрів та їх вплив на процес вимірювання витрат палива калориметричних або термоанемометричних витратомірів, що пристосовані для роботи на транспорті, у науковій літературі відсутній. Окремі відомості про деякі теплові витратоміри існують, але в цілому можна стверджувати, що систематизована інформація щодо використання термоанемометрії для визначення витрат палив на транспорті тільки починає з'являтися.

На кафедрах автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій та автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка» проводяться наукові дослідження характеристик нових перспективних високоточних термоанемометричних витратомірів з комп'ютерною обробкою результатів вимірювання. Доведено, що один із найперспективніших є витратомір [2]. Однак, в науковій літературі також відсутні детальні відомості щодо повної реалізації його переваг під час використання на автомобільному транспорті, особливостей конструкції, додаткових шляхів зменшення похибки вимірювання витрат палива.

Мета роботи: визначити вплив конструктивних параметрів теплового витратоміра (діаметра трубки, діаметра нагрівача, матеріалу трубки), які треба враховувати під час його проектування, налагодження, використання тощо, для зменшення похибки вимірювання витрат нафтових та сумішевого палива для двигунів внутрішнього згорання.

Передача тепла в тепловому витратомірі

Вимірювання параметрів рідких речовин широко застосовують у багатьох галузях: машинобудуванні, нафтовидобуванні та переробки нафти, сільському господарстві, на транспорті тощо. Параметрами руху потоку рідини є кількість речовини, що протікає через переріз трубопроводу за одиницю часу та загальна кількість перенесеної речовини (повна витрата).

В трубках теплових витратомірів (калориметричних та термоанемометричних) аналізують передачу тепла, яка відбувається в осьовому напрямку (рис. 1). Але, треба розуміти, що ця передача існує як в осьовому, так і в радіальному напрямках і при цьому вона взаємопов'язана та має взаємний вплив. Для визначення параметрів руху палива аналізують розподіл температур вздовж осі трубки витратоміра [4–8].

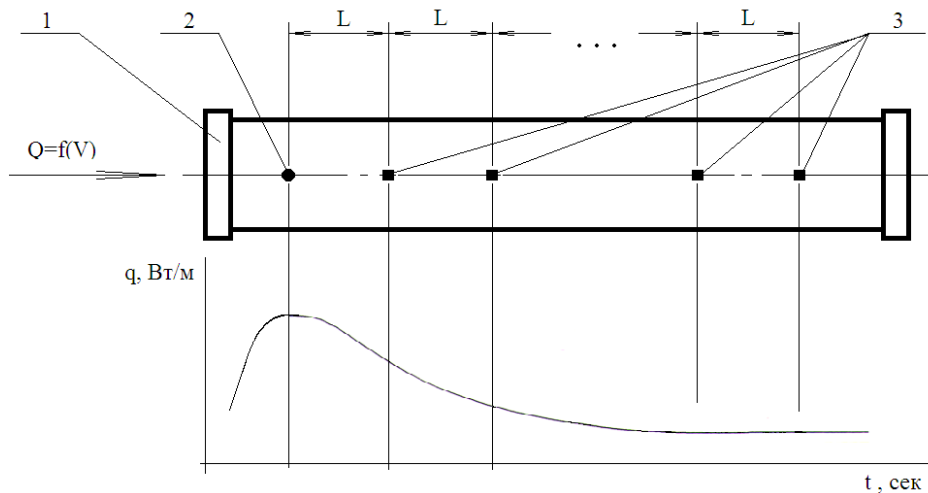


Рис. 1. Схема передачі тепла в осьовому напрямку трубки теплового витратоміра: 1 – трубка; 2 – нагрівач; 3 – термоперетворювачі; Q – витрата палива, л/с; V – швидкість потоку палива, м/с; L – відстань між нагрівачами, м; q – тепловий потік, Вт/м

Відомо, що радіальний тепловий потік в трубці витратоміра з циліндричною стінкою (лінійна густина теплового потоку) дорівнюватиме, Вт/м [5, 7]:

$$g_1 = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \times \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} \times (t_1 - t_2), \quad (1)$$

де d_1 – діаметр нагрівача, м; d_2 – зовнішній діаметр трубки витратоміра, м; t_1 – температура нагрівача, К; t_2 – температура зовнішньої поверхні трубки витратоміра (температура навколишнього середовища, якщо відсутня теплоізоляція трубки), К; λ_2 – коефіцієнт теплопровідності палива та матеріалу трубки витратоміра, Вт/(м·К).

В перший дріб (1) входять лише конструктивні параметри трубки витратоміра (зовнішній діаметр d_2 та діаметр нагрівача d_1), його називають конструктивним коефіцієнтом трубки теплового витратоміра [5, 7]

$$K_K = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}. \quad (2)$$

З (2) можна зробити висновок, що на радіальний тепловий потік g_1 не впливає діаметр трубки теплового витратоміра, якщо

$$\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 2\pi, \quad (3)$$

або відношення зовнішнього діаметра трубки витратоміра до діаметра нагрівача

$$\frac{d_2}{d_1} = e^{2\pi} \approx 534. \quad (4)$$

З (4) неважко встановити, що радіальний тепловий потік теплового витратоміра з циліндричною стінкою (лінійна густина теплового потоку) не залежить від товщини стінки трубки витратоміра. Він суттєво зменшується наближенням конструктивного коефіцієнта трубки витратоміра до одиниці, тобто зі збільшенням відношення зовнішнього діаметра трубки витратоміра до діаметра нагрівача. Таким чином, для зменшення впливу радіального теплового потоку в теплому витратомірі на осьовий тепловий потік (зменшення похибки вимірювання витрати палива) необхідно зменшувати діаметр нагрівача та збільшувати діаметр трубки теплового витратоміра. Причому відношення діаметрів з (4) не бажано обирати більшим за значення 534, оскільки подальше його зростання призведе до значень конструктивного коефіцієнта менших за одиницю та знову до зростання похибки вимірювань.

З конструктивних міркувань забезпечити відношення діаметра трубки теплового витратоміра до діаметра нагрівача, що дорівнює 534, є не зручним для використання на транспорті.

Як варіант, можливо використовувати максимально тонкий дрововий нагрівач, що розташований вздовж осі трубки витратоміра.

Другий дріб в (1) характеризує радіальну теплопровідність трубки витратоміра і називається коефіцієнтом радіальної теплопровідності трубки теплового витратоміра [5, 7]:

$$K_{PT} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} \quad (5)$$

На його величину більше впливає теплопровідність матеріалу трубки теплового витратоміра ніж теплопровідність палива, оскільки їхня величина може відрізнятись в залежності від матеріалу трубки на декілька порядків (табл. 1).

Таблиця 1

Теплопровідність нафтових палив та різних матеріалів трубки теплового витратоміра, $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ [9, 10]

№ з/п	Матеріал/речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)
<i>Палива</i>		
1	Бензин	0,106
2	Дизельне паливо	0,108
3	Гас	0,109
4	Сира нафта	0,114
<i>Метали</i>		
1	Монель: Cu 12% + Fe 25% + інші 63%	14,9
2	Латунь	110
3	Дюралюміній	160
4	95% Al + 3-5% Cu + 0,5% Mg	181
<i>Інші</i>		
1	Скловолокно	0,036
2	Піноскло легке/важке	0,06/0,08
3	Міпор	0,085
4	Гума	0,15
5	Ебоніт	0,16
6	Фторопласт Ф-5	0,25
7	Склотекстоліт	0,3

З табл. 1 видно, що середнє значення теплопровідності палива дорівнює 0,11 Вт/(м·К). Якщо в якості матеріалу трубки теплового витратоміра використовується, наприклад, ебоніт (0,16 Вт/(м·К)), коефіцієнт радіальної теплопровідності трубки теплового витратоміра K_{PT} дорівнює 0,0652. А якщо використати трубку з відносно високою теплопровідністю і в якості матеріалу обрати, наприклад, монель (14,9 Вт/(м·К)), коефіцієнт радіальної теплопровідності трубки теплового витратоміра K_{PT} збільшиться до 0,1092. Сплав металів 95% Al + 3-5% Cu + 0,5% Mg в якості матеріалу трубки теплового витратоміра з ще більш високою теплопровідністю (181 Вт/(м·К)) дасть вже незначне збільшення коефіцієнта радіальної теплопровідності трубки теплового витратоміра K_{PT} до 0,1099.

Щоб повністю виключити вплив теплопровідності матеріалу трубки теплового витратоміра на радіальний тепловий потік в (1), тобто на похибку вимірювань витрат нафтових палив, необхідно з (5) знайти таке значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу трубки, при якому коефіцієнт її радіальної теплопровідності $K_{рт}$ дорівнює одиниці. Розрахунки показують, що це можливо лише теоретично, оскільки таких матеріалів в природі не існує. Тобто повне усунення радіальної передачі тепла в трубці теплового витратоміра за рахунок вибору матеріалу трубки неможливе. В тому числі використання зовнішньої теплоізоляції трубки витратоміра не може звести до нуля радіальний тепловий потік, оскільки температура нагрівача завжди більша за температуру навколишнього середовища (температуру ізоляції).

Виключити сумісний вплив конструктивного коефіцієнта K_k і коефіцієнта радіальної теплопровідності трубки теплового витратоміра $K_{рт}$ на радіальний тепловий потік під час вимірювання витрат нафтового палива можна спробувати, прирівнявши їх добуток до одиниці. З урахуванням (4):

$$\frac{2\pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} = 1. \quad (6)$$

З (6) можна встановити найкраще відношення діаметра трубки теплового витратоміра до діаметра нагрівача за умови найменшого їх сумісного впливу та впливу теплопровідності трубки на радіальний тепловий потік (похибку вимірювання витрат) нафтового палива, що рухається в трубці витратоміра. Результати цих розрахунків для деяких матеріалів трубки теплового витратоміра наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вибір геометричних параметрів та матеріалу трубки теплового витратоміра

Матеріал трубки витратоміра	Теплопровідність, Вт/(м·К)	d_2/d_1
Ебоніт	0,16	1,507
Фторопласт Ф-5	0,25	1,62
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	2	1,92
	6	1,97
	10	1,98
	12	1,984
Монель	14,9	1,99
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	50	1,99
	100	1,99
95% Al + 3-5% Cu + 0,5% Mg	181	1,99
Гіпотетичні матеріали (з припустимою теплопровідністю)	250	1,99
	300	1,99

Графічна залежність геометричних параметрів трубки теплового витратоміра від матеріалу трубки за умови найменшого впливу на радіальний тепловий потік (похибку визначення витрати палива) наведено на рис. 2.

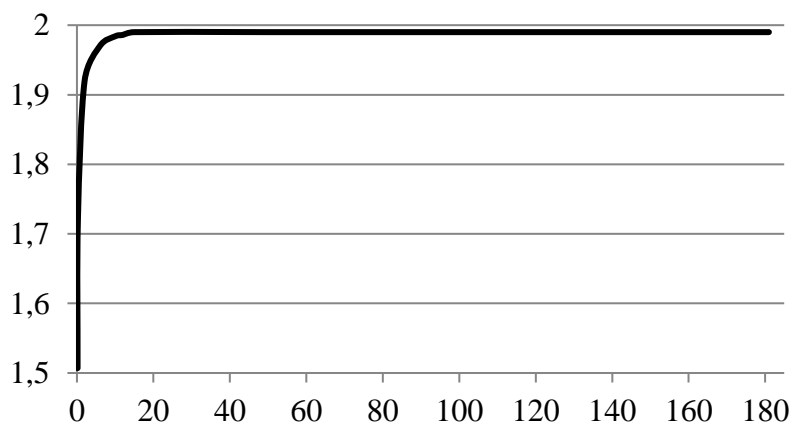


Рис. 2. Залежність d_2/d_1 (відношення зовнішнього діаметра трубки витратоміра до діаметра нагрівача) від коефіцієнта теплопровідності різних матеріалів за умови найменшого впливу на радіальний тепловий потік

Як було показано вище, радіальний тепловий потік в трубці теплового витратоміра залежить від добутку конструктивного коефіцієнта, коефіцієнта радіальної теплопровідності трубки і різниці температур нагрівача та зовнішньої поверхні трубки витратоміра.

Для зменшення впливу радіального теплового потоку на осьовий тепловий потік (і таким чином на похибку вимірювання витрат палив двигунів внутрішнього згоряння) необхідно обирати такі конструктивні параметри трубки теплового витратоміра (матеріал та діаметр, діаметр нагрівача), щоб відношення вказаних діаметрів відповідало матеріалу трубки теплового витратоміра.

Аналіз рис. 2 показує, що відношення d_2/d_1 для матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності $0,16 \dots 12$ Вт/(м·К) повинне знаходитися в межах $0,507 \dots 1,984$, що дасть зменшення впливу радіального теплового потоку на осьовий і таким чином на зменшення похибки вимірювання витрат палив. В залежності від значень коефіцієнтів теплопровідності матеріалу трубки теплового витратоміра вони повинні змінюватися за законами, що наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Залежності зміни d_2/d_1 від теплопровідності матеріалу трубки теплового витратоміра
(за умови зменшення впливу його радіального теплового потоку на осьовий тепловий потік)

Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Залежність (значення)	Достовірність апроксимації R^2
0,16...6	$d_2/d_1 = 0,1182 \ln(\lambda_2) + 1,7959$	0,9
6...12	$d_2/d_1 = 0,0028 \lambda_2 + 1,954$	0,95
>12	$d_2/d_1 = 1,99$	-

Висновки

1. Для зменшення похибки вимірювання витрат палива внаслідок зменшення впливу радіального теплового потоку в теплому витратомірі на осьовий тепловий потік (без врахування теплопровідності палива та матеріалу трубки витратоміра) необхідно зменшувати діаметр нагрівача та збільшувати діаметр трубки теплового витратоміра.

2. Отримано залежності відношення діаметра трубки до діаметра нагрівача трубки теплового витратоміра для матеріалів трубки різної теплопровідності, які дозволяють зменшити вплив радіального теплового потоку на осьовий, що дасть в кінцевому рахунку зменшення похибки вимірювання витрат палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. М. Безвесільна, А. В. Ільченко, Ю. О. Подчашенський, і Ю. О. Шавурський, «Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації», *Патент України F02M 5/00. № 90985МПК (2009)*, 10.06.10.
- [2] I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, A. Pchenko, M. Nowicki, R. Szewczyk, “Calorimetric flow meter of motor fuel with inlet temperature regulation”, in *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT-2017*, 2017, pp. 975–979.
- [3] I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, A. Pchenko, Y Trostenyuk, “Thermoanemometric flowmeter of biofuels for motor transport”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 519, pp. 443–448, 2017.
- [4] О. М. Безвесільна, А. В. Ільченко, А. Г. Ткачук, С. О. Пархоменко, «Методи вимірювання витрат рідини та конструкції витратомірів», *Вісник Інженерної академії України*, с. 216–222, вип. 3–4, 2013.
- [5] O. Bezvesilna, M. Kamiński, i A. Pchenko, “Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 550, pp. 505–511, 2017.
- [6] Ю. В. Тростенюк, О. М. Безвесільна, А. В. Ільченко, «Моделювання осьового теплового потоку трубки термоанемометричного витратоміра біопалива», у *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк: ЛНТУ, 2014, № 46, с. 538–545.
- [7] А. В. Ільченко, О. М. Безвесільна, і Ю. В. Тростенюк, «Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згоряння», *Вісник НТУ*, № 28, с. 186–191, 2013.
- [8] I. Korobiichuk, O. Bezvesilna, A. Pchenko, M. Nowicki, R. Szewczyk, “A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 097, no. 15(9), pp. 22899–22913, 2015.
- [9] Свойства топлива и масел. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://thermalinfo.ru/svoystva-zhidkostej/toplivo-i-masla/svoystva-topliva-i-masel>.
- [10] Коэффициенты теплопроводности различных материалов. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.xiron.ru/content/view/58/28/>.

Ільченко Андрій Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, e-mail: avi_77@ukr.net.

Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир.

The influence of some design parameters on the heat transfer in thermal fuel flowmeter

State University «Zhytomyr Polytechnic»

The article analyzes the influence, relationship and value of design parameters of the heat flow meter on its radial and axial heat fluxes in the tube (tube diameter, heater diameter and their ratio, thermal conductivity of the tube material, etc.). It is shown that at the stage of choosing the design parameters of the flowmeter it is necessary to take into account the influence of its radial heat flux on the axial one. The influence of radial heat flux in the flowmeter tube on the error of fuel loss measurement is substantiated. Analytical dependences which allow to define an axial heat stream are resulted, their analysis concerning influence of flowmeter tube constructive parameters on heat transfer is carried out. Measures are planned and recommendations are developed for the choice of design flowmeter parameters, development or use, provided that the influence of radial heat flow on the axial is reduced, which will reduce the total error of fuel consumption measurement.

Regarding the choice of design parameters of heat meters while reducing the error of measuring fuel consumption, it is shown that the maximum possible decrease in the diameter of the heater and increase the diameter of the flow tube reduce the impact of radial heat flow on the axial and thus reduce the total fuel consumption error. Numerical ratios of tube diameter to flowmeter heater diameter for different thermal conductivities of tube materials are given under the condition of minimal influence on fuel consumption measurement error. For tube materials with a thermal conductivity $0.16 \dots 0.25 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ (ebonite, fluoroplastic F-5, etc.) the tube diameters ratio and the heater should be within $1.51 \dots 1.62$, and for materials with more high thermal conductivity (thermal conductivity greater than $14.9 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$), this ratio should be equal to 1.99.

Key words: heat flow, heat flowmeter, calorimetric flowmeter, thermoanemometric flowmeter, fuel consumption, design coefficient, thermal conductivity, thermal conductivity coefficient.

Ilichenko Andrey – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Automobiles and Transport Technologies Department, e-mail: avi_77@ukr.net.

A. В. Ильченко

Влияние некоторых параметров конструкции теплового расходомера топлив на передачу тепла в нем

Государственный университет «Житомирская политехника»

В статье проанализированы взаимосвязь, значения и влияние конструктивных параметров теплового расходомера на его радиальный и осевой тепловые потоки в трубке (диаметр трубки, диаметр нагревателя и их соотношение, теплопроводность материала трубки). Показано, что на этапе выбора конструктивных параметров теплового расходомера необходимо учитывать влияние его радиального теплового потока на осевой. Обосновано влияние радиального теплового потока трубки расходомера на погрешность измерения расходов топлива. Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить величину осевого теплового потока, проведен их анализ по влиянию конструктивных параметров трубки теплового расходомера на перенос тепла. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров теплового расходомера на этапе его проектирования, разработки или использования при условии уменьшения влияния радиального теплового потока на осевой, что позволит уменьшить суммарную погрешность измерения расхода топлива.

По выбору конкретных значений конструктивных параметров тепловых расходомеров при условии уменьшения погрешности измерения расхода топлива показано, что максимально возможное уменьшение диаметра нагревателя и увеличение диаметра трубки расходомера снижают влияние радиального теплового потока на осевой тепловой поток и, таким образом, уменьшают суммарную погрешность измерения расхода топлива. Получены численные соотношения диаметра трубки к диаметру нагревателя теплового расходомера для различных по теплопроводности материалов трубки при минимальном их влиянии на погрешность измерения расхода топлива. Для материалов трубки с теплопроводностью $0,16 \dots 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (эбонит, фторопласт Ф-5 и т.п.) соотношение диаметров трубки и нагревателя должны быть в пределах $1,51 \dots 1,62$, а для материалов с более высокой теплопроводностью (коэффициент теплопроводности больше $14,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) это соотношение должно равняться 1,99.

Ключевые слова: тепловой поток, тепловой расходомер, calorиметрический расходомер, термоанемометрический расходомер, расход топлива, конструктивный коэффициент, теплопроводность, коэффициент теплопроводности.

Ильченко Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, e-mail: avi_77@ukr.net.