



УДК 621.4: 629.113.01

REDUCING THE ERROR OF MEASURING FUEL CONSUMPTION OF A TRANSPORT ENGINE WITH A HEAT FLOWMETER**УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ТРАНСПОРТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВЫМ РАСХОДОМЕРОМ**

Pchenko A.V. / Ільченко А.В.

с.т.с., ас. проф / к.т.н., доц.

State University «Zhytomyr Polytechnic», Zhytomyr, Chudnivska, 103, 10005

Аннотация. В работе предложено новое конструктивное решение теплового расходомера жидких топлив для двигателей внутреннего сгорания транспортных средств с расширенным диапазоном измерений расхода и уменьшенной погрешностью измерения. Оно заключается в использовании последовательно установленных на одной оси трубок с определенным соотношением диаметров. Для данного расходомера сформулировано условие выбора наиболее информативного осевого теплового потока топлива в трубке теплового расходомера: для анализа температур принимается трубка теплового расходомера, где зарегистрирована максимальная суммарная разница температур между всеми соседними термопреобразователями трубки.

Ключевые слова: транспортный двигатель, двигатель внутреннего сгорания, расход топлива, передача тепла, тепловой поток, тепловой расходомер, термопреобразователь, нагревательный элемент.

Введение

Сегодня на транспорте в качестве основных (транспортных) двигателей еще широко используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Расход топлива ДВС – это комплексный показатель технического состояния не только самого двигателя, но и всего транспортного средства. Можно утверждать, что его измерение является необходимой составляющей поддержания надлежащего технического состояния транспортного средства в процессе эксплуатации. Такие измерения необходимы для регистрации неисправностей в реальном времени и их можно считать неотъемлемой частью процесса общей диагностики транспортных средств.

Измерение расхода топлива необходимо не только для учета и также может быть использовано для планирования маршрутов движения транспортных средств, контроля их работы на маршруте, снижения себестоимости процесса перевозок и т.п.

Средства измерения расхода топлива, используемые на транспортных средствах сегодня, считать расходомерами можно только условно поскольку они дают относительную картину расхода топлива. Работа таких расходомеров основана на принципе отсчета времени открытого состояния форсунок (инжекторов) системы питания ДВС. Специалистов в эксплуатации больше интересует абсолютный расход топлива (за определенный период, на определенном маршруте, определенным водителем и т.п.). Абсолютный расход топлива может существенно отличаться от измеренного существующими средствами, например, вследствие засорения отверстий форсунок, появления на них нагара, отложений, снижения давления (производительности) в системе питания ДВС и т.п.



Поэтому наиболее перспективными для использования на транспорте считаются тепловые расходомеры, имеющие много преимуществ в сравнении с существующими. Основные из них: точность измерений не зависит от положения расходомера относительно продольной оси автомобиля и линии горизонта, на нее не влияют вибрации, ударные нагрузки, давление и пульсации топлива на входе в расходомер [1-3]. В качестве основного недостатка следует отметить, что тепловые расходомеры не всегда способны охватить весь возможный диапазон расхода топлива данным конкретным ДВС на всех скоростных и нагрузочных режимах его работы (имеют относительно узкий диапазон измерения расхода). Также обращает на себя внимание тот факт, что данные расходомеры имеют непостоянную погрешность измерения на разных скоростях потока топлива (разных режимах работы ДВС) и этот факт говорит о необходимости их усовершенствования [4, 5].

Цель работы.

Разработать конструкцию теплового расходомера жидких топлив для ДВС транспортных средств с расширенным диапазоном измерения расходов, что также позволит уменьшить погрешность их измерения.

Тепловой расходомер (рисунок 1) состоит из трубки 1, по которой протекает топливо, нагревательного элемента 2 и термопреобразователей 3. Трубка может иметь разные по величине наружный и внутренний диаметры (толщину стенки) и может быть изготовлена из разных материалов, что несомненно будет влиять на процесс отвода тепла от топлива, расход которого измеряется. Следует подчеркнуть, что трубка должна иметь пропускную способность (внутренний диаметр), обеспечивающую максимально возможный расход топлива конкретного ДВС на всех скоростных и нагрузочных режимах его работы. Также внутренний диаметр трубки не может быть меньше определенной величины, то есть иметь недостаточную пропускную способность. Толщина стенки трубки расходомера и ее материал должны обеспечивать необходимую прочность, то есть трубка должна выдерживать определенное давление в системе питания двигателя без разрушения и/или потери герметичности.

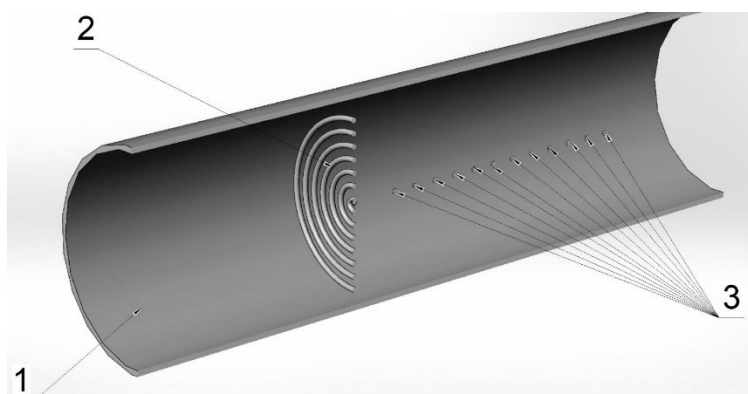


Рисунок 1 - Тепловой расходомер: 1 - трубка; 2 - нагревательный элемент; 3 - термопреобразователи

Авторская разработка



Нагревательный элемент 2 до определенной температуры подогревает топливо, движущееся в трубке с разными скоростями. Он может иметь разную геометрическую форму, но как правило симметричную относительно оси трубки 1. Если нагревательный элемент 2 изготавливается из проволоки, то он чаще имеет форму спирали, соосной с осью трубки. При этом нагревательный элемент 2 может иметь разные по величине наружные диаметры.

Нагревательный элемент 2 также может устанавливаться на наружную поверхность трубки 1, что меняет распределение температур в топливе и требует отдельных исследований. В представленной работе рассматривается установка нагревательного элемента 2 в потоке топлива (внутри трубки 1 расходомера).

Термопреобразователи 3, расположенные вдоль оси трубки 1 расходомера, регистрируют температуры топлива вдоль оси трубки 1 на определенных расстояниях от нагревательного элемента 2, на основе распределения указанных температур рассчитывается скорость движения топлива и, соответственно, его объемный расход, мм³/с:

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

где V - скорость потока топлива, мм/с;

S - площадь сечения трубки, мм².

Количество термопреобразователей 3, расстояние между ними и от нагревательного элемента 2 до первого термопреобразователя 3 зависит от диапазона скоростей топлива в трубке 1 расходомера. Этот диапазон может быть достаточно большим – от нуля в режиме принудительного холостого хода ДВС (двигатель не потребляет топлива) до максимальной скорости, соответствующей максимальному мгновенному расходу топлива данного конкретного ДВС. Из (1) нетрудно установить, что для мгновенного расхода топлива от 5 до 250 л/ч (0,05...0,25 м³/ч) скорость движения топлива в трубках диаметрами 0,01...0,1 м будет составлять 6,37...3184,71 м/ч (1,769...884,6 мм/с).

Нетрудно сделать вывод, что при такой большой разнице скоростей процесс переноса тепла как в радиальном, так и в осевом направлениях в трубке 1 теплового расходомера будет существенно отличаться, что не всегда позволит с достаточной точностью определить скорость потока топлива (расход топлива) [6, 7]. Если, например, в процессе увеличения расхода (скорости топлива в трубке) будет для определенной скорости термопреобразователями зарегистрирована практически одинаковая температура (или мало отличающаяся от температуры, зарегистрированная одним и последующим термопреобразователями), это может означать, что скорость потока (расход) достигла значения, выше которой она не может быть определена. Таким образом, для уменьшения погрешности измерения расхода топлива на данном конкретном скоростном и нагрузочном режимах работы ДВС важна регистрация температур двух соседних термопреобразователей с большей разницей.

С учетом вышеприведенного считается необходимым в процессе измерения влиять на скорость потока топлива. Это можно сделать использованием другого диаметра трубки теплового расходомера. Относительно внутреннего диаметра трубки также существует ограничение – ее минимальная пропускная способность связана с максимально возможным расходом топлива данного



конкретного ДВС. Таким образом, тепловой расходомер (рисунок 1) имеет ограничение по диапазону измерения расхода топлива двигателем транспортного средства.

Для расширения диапазона измерения расхода топлив ДВС (уменьшение погрешности измерений) предлагается использование многоступенчатого расходомера (рисунок 2). Он состоит из нескольких трубок 1 разных диаметров, количество которых зависит от диапазона измеряемого расхода топлива. В данном случае рассматривается четыре последовательно установленных трубки 1. Трубки 1 соединены соосно конусами 2. Величина конусности выбирается таким образом, чтобы завихрение потока топлива на всех скоростях его протекания через все трубки 1 было минимальным или полностью исключалось. Данный факт также требует дополнительных исследований.

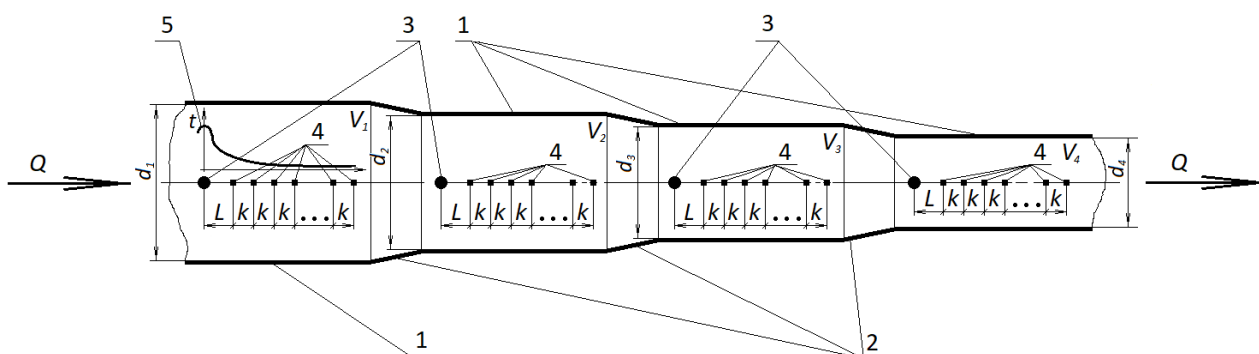


Рисунок 2 - Схема многоступенчатого теплового расходомера:

*1 - трубка; 2 - конус; 3 - нагревательный элемент; 4 - термопреобразователь;
5 - температура вдоль оси трубки, °С; Q - объемный расход топлива, мм³/с;
d₁-d₄ - диаметры трубок; V₁-V₄ - скорости топлива вдоль осей трубок, мм/с;
L - расстояние от нагревательного элемента до первого термопреобразователя, мм; k - расстояния между термопреобразователями,*

мм

Авторская разработка

Наличие трубок 1 различных диаметров d_1-d_4 позволяет изменять скорость протекающего через трубки 1 топлива и влиять на интенсивность его нагревания в широком диапазоне скоростей (расходов), что создает большую регистрируемую разницу температур топлива в потоке между соседними термопреобразователями 4.

Диаметры трубок d_1-d_4 выбирают на основе следующих соображений. Если принять во внимание закон непрерывности потока жидкости и принять, например, что $d_4=d_3/2=d_2/4=d_1/8$, не трудно установить, что скорость V_1 в четыре раза меньше скорости V_2 , в 16 раз меньше скорости V_3 и в 64 раза меньше скорости V_4 . При следующем соотношении диаметров $d_4=d_3/3=d_2/9=d_1/27$ скорость потока на выходе из расходомера увеличивается в 729 раз. Таким образом можно считать, что выбором количества трубок теплового расходомера и соотношением их диаметров можно охватить практически весь возможный диапазон расхода топлива транспортного ДВС любой мощности. Необходимо подчеркнуть, что количество трубок 1 и соотношения их диаметров должно быть



подобрано под каждый ДВС, а точнее – под максимально возможный его расход топлива, и дальнейшее расширение диапазона измерения расходов (выбором количества трубок и их диаметров) необходимо считать необоснованным, поскольку приведет к увеличению погрешности измерений расходов на некоторых режимах работы ДВС.

Также нетрудно прийти к выводу, если трубки теплового расходомера установлены последовательно с уменьшением диаметров, то отношение скоростей потока топлива в них V_4 к V_1 равно:

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

где i – порядковый номер трубки теплового расходомера в направлении движения топлива.

По оси теплового расходомера установлены нагревательные элементы 3 (рисунок 2), на расстоянии L от которых расположен первый термопреобразователь 4. Расстояние от него до следующего термопреобразователя и между следующими равно k . Количество термопреобразователей выбирается таким образом, чтобы в процессе измерения расхода топлива Q можно было по их показаниям воспроизвести распределение температур 5 по оси каждой трубки 1. Очевидно, что для конкретного значения расхода топлива его скорость движения вдоль оси трубки (V_1, V_2, V_3, V_4) будет тем выше, чем больше расход топлива и/или меньший диаметр трубки (d_1, d_2, d_3, d_4).

С увеличением скорости потока топлива в трубке 1 расходомера разница в показаниях соседних термопреобразователей будет уменьшаться и они будут регистрировать все более одинаковую температуру. После определенного значения скорости (быстрый теплоперенос) показания термопреобразователей 4 не будут существенно отличаться и они будут близки к температуре топлива возле нагревательного элемента 3. Уменьшение разности показаний между соседними термопреобразователями 4 повышает погрешность определения скорости топлива (расхода топлива). В таком случае необходимо уменьшить скорость топлива, что можно на данном расходе достичь применением трубок 1 большего диаметра. И наоборот, с уменьшением скорости движения топлива замедляется теплоперенос и термопреобразователи 4 могут не зарегистрировать повышение температуры потока. Это также приведет к увеличению погрешности измерения расхода топлива. В данном случае необходимо увеличить скорость топлива, что в предлагаемой конструкции расходомера наблюдается в трубках 1 меньшего диаметра. Таким образом, не только расширяется диапазон измерения расхода топлива, но и уменьшается погрешность измерения расхода жидких топлив тепловым расходомером.

Для получения распределения температур в потоке топлива максимальной информативности (с наибольшей разницей регистрируемой температуры между соседними термопреобразователями 4), то есть для уменьшения погрешности измерения расхода топлив, нужно для анализа температур (и определения скоростей потока) брать именно ту трубку 1 расходомера, где это распределение



приближается к виду 5 (рисунок 2), то есть выполняется условие:

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

где x - количество термопреобразователей в трубке 1 теплового расходомера;

t - температура, зарегистрированная термопреобразователем;

y - порядковый номер термопреобразователя в потоке топлива, $y=1 \dots x-1$.

В (3) используется знак модуля поскольку расход топлива ДВС транспортного средства на разных режимах может изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, а для дальнейшего анализа распределения температур необходимо учитывать трубку с максимальной разницей измеренных температур между всеми соседними термопреобразователями в трубке.

При этом необходима проверка потока топлива в трубках на турбулентность, наличие которой будет способствовать выравниванию температурного поля. Это в основном зависит от скорости потока и наявности в конструкции расходомера элементов, способствующих завихрению потока топлива. Такая турбулентность может быть непостоянной на разных скоростях движения (расхода) топлива и вносить непостоянную погрешность в процесс измерения температур (скоростей потока).

Выводы.

Предложена конструкция многоступенчатого теплового расходомера жидких топлив для ДВС транспортных средств с расширенным диапазоном измерения расхода и уменьшенной погрешностью измерения. Она предполагает использовать последовательно соосно установленные трубки расходомера с определенным соотношением диаметров. Выбор количества трубок и их диаметров позволяет изменять скорость потока топлива через расходомер для одного и того же расхода. При этом нагревательные элементы трубок обеспечивают предварительно выбираемую начальную температуру топлива, зависящую от предполагаемых величин расходов.

Сформулировано условие выбора наиболее информативного осевого теплового потока топлива в трубках многоступенчатого теплового расходомера: для анализа температур (скоростей, расхода) принимается та трубка теплового расходомера, где зарегистрирована максимальная суммарная разница температур, измеренная между всеми соседними термопреобразователями трубки.

Литература:

1. 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>.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Ільченко, А.В. Зміна радіального теплового потоку термоанемометричного витратоміра біопалив двигуна внутрішнього згорання [Текст] / А. В. Ільченко, О. М. Безвесільна, Ю. В. Тростенюк // *Вісник НТУ*. – 2013. – № 28. – с. 186-191.

7. Korobiichuk, I. A mathematical model of the thermo-anemometric flowmeter / Korobiichuk, I., Bezvesilna, O., Ilchenko, A., ...Nowicki, M., Szewczyk, R. // *Sensors (Switzerland)*, 2015, 15(9), p. 22899–22913.

Abstract. *The paper proposes a new design solution for a thermal flowmeter for liquid fuels for internal combustion engines of vehicles with an extended range of flow measurements and a reduced measurement error. It consists in the use of tubes installed in series on the same axis with a certain ratio of diameters. For this flowmeter, the condition for choosing the most informative axial heat flow of fuel in the tube of the heat flowmeter is formulated: for temperature analysis, the tube of the heat flowmeter is taken, where the maximum total temperature difference between all adjacent thermal converters of the tube is recorded.*

Key words: *transport engine, internal combustion engine, fuel consumption, heat transfer, heat flow, heat flow meter, heat converter, heating element.*

Статтю відправлено: 20.03.2023 р.

© Ільченко А.В.