



УДК 681.2

Е. Н. Безвесильная, д-р техн. наук
Национальный технический университет Украины «КПИ»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37,
тел. (044) 2360926, e-mail: bezvesilna@mail.ru)

Математическая модель температурного поля в потоке моторного топлива, проходящего через расходомер

Построена математическая модель температурного поля в потоке биологического топлива, позволяющая с высокой точностью определить его расход.

Побудовано математичну модель температурного поля у потоці біопалива, яка дозволяє з високою точністю визначити його витрачання.

К л ю ч е в ы е с л о в а : термоанемометр, расходомер, моделирование, биотопливо.

В настоящее время одним из наиболее совершенных устройств для измерения расхода биологического топлива считается термоанемометричный расходомер (ТАР). В работах [1, 2] предложен новый ТАР, характеризующийся высокой точностью и быстродействием. Принцип его действия состоит в нагреве потока моторного топлива и измерении распределения температурного поля, созданного нагревателем в этом потоке. Изменения температурного поля вдоль потока моторного топлива связаны определенной функциональной зависимостью с величиной расхода топлива. Поэтому, измеряя распределение температурного поля вдоль оси потока моторного топлива, можно с высокой точностью определить его расход. Для этого необходимо разработать математическую модель температурного поля и определить вид указанной функциональной зависимости.

В существующих термоанемометрических расходомерах [3] для измерений теплового поля используются один или два термопреобразователя, расположенных непосредственно возле нагревателя или с обеих сторон на некотором расстоянии от него. Математическая модель существующих расходомеров сводится к уравнению теплового баланса нагревателя, охлаждаемого потоком жидкости, или к определению разности температур в двух фиксированных точках [3].

В новом высокоточном расходомере [1,2] для повышения точности определения расхода моторного топлива использованы группы термопреобразователей [2, 4]. Такое решение обеспечивает определение величины температурного поля в множестве точек потока моторного топлива, а последующая алгоритмическая обработка полученных значений на ЭВМ компенсирует ряд погрешностей измерений. Поэтому для такого расходомера необходимо создать новую математическую модель, отображающую детальное распределение температурного поля во всех точках потока моторного топлива, где установлены термопреобразователи.

В предлагаемой математической модели температурного поля в потоке биотоплива, проходящего через ТАР, учтены следующие особенности:

тепловое влияние нагревателя имеет постоянную мощность;

термопреобразователи расположены вдоль оси потока биотоплива, поэтому распределение температур определено вдоль одной пространственной координаты;

рассмотрены ламинарный и турбулентный режимы течения биотоплива;

поскольку диапазон изменения начальной температуры биотоплива при эксплуатации ТАР достаточно широк, выполнена коррекция ТАР с учетом изменения температуры.

При расчете теплового потока между поверхностью нагревателя и средой биотоплива плотность теплового потока представим в виде [3]

$$q = \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где ΔT — перепад температур между поверхностью и окружающей средой; α — коэффициент конвективной теплоотдачи.

Уравнение для теплового потока биотоплива в неподвижной среде с учетом теплопроводности имеет вид

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dR} = -\lambda 4\pi R^2 \left(-\frac{R_n}{R^2} \right) (T_0 - T_n) = 4\pi \lambda R_n (T_0 - T_n), \quad (2)$$

где T_n — температура на поверхности нагревателя; T_0 — начальная температура биотоплива. Тепловой поток радиусом R_n и площадью поверхности S_n можно вычислить, используя уравнение (1):

$$Q = q S_n = 4\pi R_n^2 (T_0 - T_n).$$

Из (1) и (2) получаем $\alpha = \lambda / R_n$.

Выражение для расчета температуры нагревателя при скорости движения биотоплива $V = \text{const}$ имеет следующий вид:

$$T_{\text{н}} = T_0 + \frac{P}{\pi \ell_{\text{н}} K_1} \left(\frac{\pi \nu d_{\text{тр}}}{4W} \right)^{K_2} (\mu C)^{-K_3} (\lambda)^{1-K_3}. \quad (3)$$

Здесь P — мощность нагревателя; μ — коэффициент динамической вязкости биотоплива; C и λ — теплоемкость и вязкость биотоплива; $d_{\text{тр}}$ — диаметр трубки ТАР; $K_1 = K_2 = 0,5$; $\ell_{\text{н}}$ — расстояние до нагревателя; W — объемный расход биотоплива,

$$W = K_4 K_5 (T_0 - T_{\text{н}})^{-1/K_2}, \quad (4)$$

где K_4 — коэффициент, учитывающий конструктивные параметры ТАР,

$$K_4 = \frac{\pi d_{\text{тр}}}{4} \left(\frac{P}{\pi \ell_{\text{н}}} \right)^{1/K_2};$$

K_5 — коэффициент, учитывающий физико-химические свойства биотоплива и режим течения через расходомер,

$$K_5 = \nu (\mu C)^{K_3/K_2} (\lambda)^{(K_3-1)/K_2} K_1^{-1/K_2}.$$

С использованием формул (3), (4) выполнено численное моделирование на ЭВМ теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через ТАР. Физико-математические параметры топлива приведены в табл. 1, а конструктивные параметры ТАР — в табл. 2.

Результаты моделирования теплового баланса нагревателя ТАР согласно формулам (3) и (4) приведены на рис. 1, из которого видно, что для

Таблица 1

Параметр	Бензин	Дизельное топливо	Биотопливо
Плотность, кг/м ³	750,0	805,0	865,0
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	2,20	2,10	1,50
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,11	0,11	0,17
Коэффициент температуропроводности, м ² /с	$6,67 \cdot 10^{-8}$	$6,51 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент динамической вязкости, Па · с = Н · с/м ² = кг/(м · с)	$0,37 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент кинетической вязкости, м ² /с	$4,93 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$

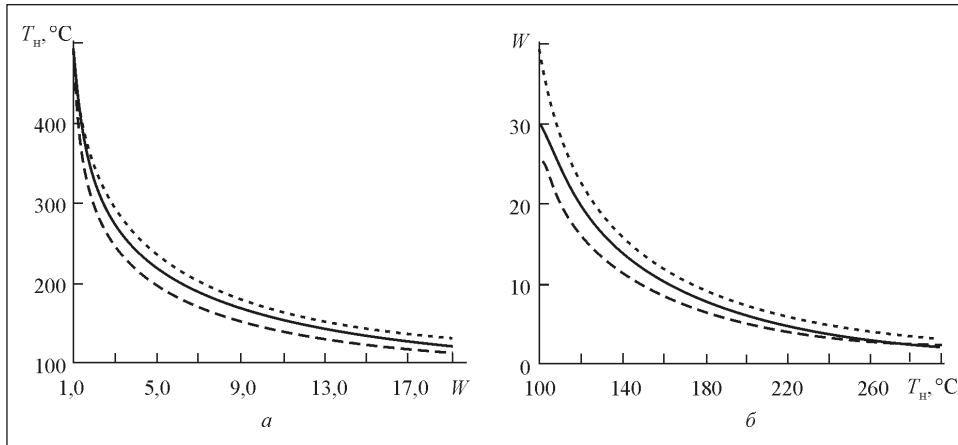


Рис. 1. Графики зависимости температуры нагревателя от расхода топлива (а) и расхода топлива от температуры нагревателя (б): --- — бензин; — дизельное топливо; — — биотопливо

повышения точности ТАР следует одновременно измерять температуру моторного топлива в соответствующих точках потока. После обработки результатов на ЭВМ получены математическая модель распределения температурного поля вдоль трубки и уточненное значение расхода биотоплива.

Новая формула для определения температуры топлива вдоль оси трубки ТАР при движении топлива и ламинарном течении моторного топлива в трубке имеет вид

$$T(x) = T_n - \left[\frac{\pi x \alpha}{W} - \frac{7}{48} \right] \frac{4P}{\pi d_{тр} \lambda}.$$

Измеряя с помощью термопреобразователя температуру поверхности нагревателя и температуру биотоплива на расстоянии x от нагревателя, опре-

Таблица 2

Параметр	Значение для случаев		
	1	2	3
Диаметр трубки, мм	15	10	5
Длина трубки, мм	300	300	300
Диаметр нагревателя, мм	3	3	1
Длина нагревателя, мм	12	12	12
Мощность нагревателя, Вт	12	12	12

деляем объемный расход биотоплива:

$$W = \frac{\pi x \alpha}{\frac{\pi d_{\text{тр}} \lambda (T_{\text{н}} - T(x))}{4P} + \frac{7}{48}}$$

При турбулентном течении биотоплива окончательное выражение для расчета температуры нагревателя имеет вид

$$T(x) = T_{\text{н}} - T \exp \left\{ -0,11 \left(\frac{\pi}{4} \right)^{0,2} \frac{x (\nu)^{0,2}}{(d_{\text{тр}})^{0,8} (W)^{0,2}} \right\} + T.$$

Измеряя с помощью термопреобразователя температуру поверхности нагревателя, температуру окружающей среды и температуру биотоплива на расстоянии x от нагревателя, определяем объемный расход биотоплива:

$$W = \left(\frac{K_8 K_9 x}{\ln [T(x) - T] - \ln [T_{\text{н}} - T]} \right)^5, \quad (5)$$

где $K_8 = -0,11 (\pi/4)^{0,2}$, $K_9 = (\nu)^{0,2} / (d_{\text{тр}})^{0,8}$.

Для повышения точности измерений при ламинарном и турбулентном режимах измерения $T(x)$ следует проводить в нескольких точках потока биотоплива и использовать процедуру линейной аппроксимации.

В результате моделирования на ЭВМ, выполненного при постоянном объемном расходе топлива 5 л/ч для различных видов моторного топлива (бензин, дизельное топливо и биотопливо) и различных расстояний от нагревателя, получены графики, представленные на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что объемный расход топлива зависит от погрешностей измерения температуры термопреобразователями в диапазоне относительных погрешностей от 0,01 до 1,0 %. Моделирование погрешностей ТАР выполнено с использованием моторного топлива с физико-механическими свойствами, приведенными в табл. 1, для следующих вариантов:

I. Определение расхода по результатам измерения температуры нагревателя и начальной температуры моторного топлива (согласно (4)).

II. Определение расхода по результатам измерения начальной температуры моторного топлива и температуры моторного топлива в двух точках вдоль оси трубки с усреднением для двух точек (согласно (5)).

III. Повышение точности варианта II в результате алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с помощью искусственных нейронных сетей (согласно [2]).

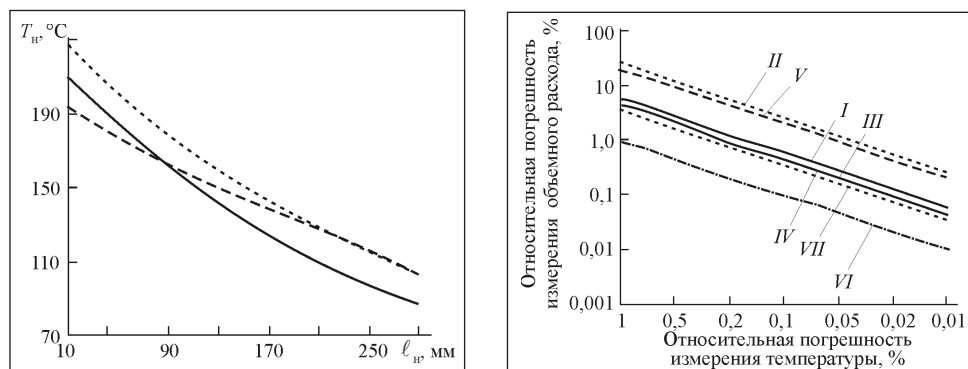


Рис. 2. Графики зависимости T_n от l_n ($d_{тр} = 15$ мм; $d_n = 3$ мм): - - - бензин; ... — дизельное топливо; — — — биотопливо погрешность термопреобразователя 5 °С.

Рис. 3. Результаты моделирования на ЭВМ погрешностей ТАР с использованием биотоплива для вариантов I—VII

IV. Повышение точности варианта I с помощью аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений (согласно [1]).

V. Повышение точности варианта II с помощью аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений (согласно [1]).

VI. Повышение точности варианта I с помощью алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с использованием искусственных нейронных сетей (согласно [2]); аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений (согласно [1]).

VII. Повышение точности варианта II с помощью алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с использованием искусственных нейронных сетей (согласно [2]); аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений (согласно [2]).

Результаты моделирования на ЭВМ приведены на рис. 2 и 3. Как видно из рис. 3, при минимальных объемах алгоритмических вычислений целесообразно использовать вариант I, что обеспечивает точность измерения объемного расхода моторного топлива $W = 3$ % при точности измерения температуры нагревателя $T_n = 1$ %.

Выводы

Изложенные результаты позволяют сделать вывод о том, что для повышения точности ТАР целесообразно использование более сложных алгоритмических процедур (аппроксимация результатов измерений методом наименьших квадратов и искусственные нейронные сети). Для повышения быстродействия ТАР следует включить в состав ЭВМ специализированный нейропроцессор, что позволит компенсировать случайные и динамические погрешности измерений с использованием искусственных нейронных сетей. При этом погрешность измерения расхода топлива составит менее 1 % при погрешности измерения температуры нагревателя, равной 1%.

The mathematical model of temperature field in the flow of bio-fuel, which allows to determine its cost with the highest accuracy has been constructed.

1. Пат. №91160. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації. / Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О., Шавурський Ю. О. Заявка № 2009 06515 від 22.06.2009 р. Опубл. 25.06.2010 р.
2. Пат. №90985. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації. / Безвесільна О. М., Шавурський Ю. О., Подчашинський Ю. О., Ільченко А. В. Заявка № 2009 10565 від 19.10.2009 р. Опубл. 10.06.2010 р.
3. Безвесільна О. М. Витратометрія та витратоміри. — Житомир: ЖДТУ, 2011. — 220 с.
4. Безвесільна О. М., Тимчик Г. С. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів. — Житомир : ЖДТУ, 2012. — 801 с.

Поступила 18.01.11

БЕЗВЕСИЛЬНАЯ Елена Николаевна, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». В 1972 г. окончила Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы измерения механических величин; гравиметрические системы.

