



Безвесильная Е. Н.,
Ильченко А. В.,
Ткачук А. Г.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО РАСХОДОМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА БИОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

В статье рассмотрена конструкция и принцип работы термоанемометрического расходомера. Выведена математическая модель температурного поля в потоке биотоплива, которая позволяет с высокой точностью определить его расход. Проведено численное моделирование теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива термоанемометрического расходомера и проанализированы его результаты. Предложены методы повышения быстродействия и точности термоанемометрического расходомера.

Ключевые слова: термоанемометр, расходомер, расход, моделирование, биотопливо, поток, теплопередача, теплопроводность.

1. Введение

В процессе конструирования автотранспорта особую значимость приобретает и необходимость контроля расхода топлива. На решение данной задачи ориентированы расходомеры различного типа, которые позволяют предотвратить нецелевое использование горючего. Кроме автомобильного и грузового транспорта расходомеры используются в: сельхозтехнике (вилочные и другие погрузчики, комбайны, тракторы), строительной спецтехнике, речном и морском транспорте, пассажирских автобусах и др.

Сегодня есть различные виды расходомеров топлива, классификация которых учитывает тип топлива, наличие и вид выходного сигнала (аналоговый, импульсный и т. д.), вид системы передачи данных, наличие собственного индикатора и некоторые другие параметры. В списке наиболее востребованных расходомеров представлены: кориолисовые, ультразвуковые, турбинные, тепловые массовые, винтовые, поршневые, калометрические, поплавковые, магнитно-индукционные расходомеры. Каждый из данных видов расходомеров жидкости имеет свою специфику, особенности и недостатки.

В настоящее время одним из наиболее совершенных устройств для измерения расхода биологического топлива считается термоанемометрический расходомер (ТАР). 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. Поэтому задача исследования ТАР, разработка его математической модели является актуальной.

2. Постановка проблемы

В существующих расходомерах для измерений теплового поля используются один или два термопре-

образователя, 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.

В новом высокоточном расходомере для повышения точности определения расхода моторного топлива использованы группы термопреобразователей. 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.

Цель статьи — разработать математическую модель температурного поля термоанемометрического расходомера [1] и провести соответствующее моделирование.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать существующую математическую модель температурного поля в потоке биотоплива, проходящего через расходомер; провести численное моделирование на ЭВМ теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через ТАР; вывести новую математическую модель распределения температурного поля вдоль трубки и вычислить уточненное значение расхода биотоплива; предложить методы повышения точности и быстродействия ТАР.

3. Анализ литературных данных

В [2] описан физический принцип действия индукционного расходомера, приведены основные формулы для его расчета. Обоснованы критерии для проектирования конструкции электронной решетки индукционного расходомера.

В [3] приведены результаты экспериментальных исследований электромагнитного расходомера. Описана

методика проведения этих исследований и алгоритм обработки исходных результатов.

В статье [4] описана трехмерная компьютерная модель газотурбинного расходомера и приведены результаты соответствующего моделирования.

В статье [5] рассмотрен высокоточный расходомер из пары внутренних циклоидных роторов, широко используемый в гидравлических системах управления.

В работах [6–8] описаны конструкции и принцип действия существующих сегодня расходомеров для измерения расхода топлива. Проанализированы современные термопреобразователи, которые могут быть использованы в конструкции ТАР. Определены их недостатки и преимущества, приведены основные характеристики.

4. Математическая модель температурного поля в потоке биотоплива, проходящего через термоанемометричный расходомер

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 закона [1, 9]:

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

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:

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

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):

$$Q = q S_n = 4\pi R_n^2 (T_0 - T_n). \quad (3)$$

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

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

$$T_n = T_0 + \frac{P}{\pi l_n K_1} \left(\frac{\pi v d_{\text{тр}}}{4W} \right)^{K_2} (\mu C)^{-K_3} (\lambda)^{1-K_3}, \quad (4)$$

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

$$W = K_4 K_5 (T_0 - T_n)^{-1/K_2},$$

где K_4 – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры ТАР:

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

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

где K_5 – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства биотоплива и режим течения через расходомер.

5. Моделирование теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через термоанемометричный расходомер

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.

Таблица 1

Физико-математические параметры топлива

№ з/п	Параметр	Бензин	Дизельное топливо	Биотопливо
1	Плотность, кг/м	750,0	805,0	865,0
2	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	2,20	2,10	1,50
3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,11	0,11	0,17
4	Коэффициент температуропроводности, м ² /с	$6,67 \cdot 10^{-8}$	$6,51 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$
5	Коэффициент динамической вязкости, Па·с = Н·с/м ² = кг/(м·с)	$0,37 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$
6	Коэффициент кинетической вязкости, м ² /с	$4,93 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Конструктивные параметры ТАР

Параметр	Значение для случаев		
	I	II	III
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

Результаты моделирования теплового баланса нагревателя ТАР согласно формулам (3) и (4) приведены на рис. 1, 2, из которых видно, что для повышения точности ТАР следует одновременно измерять температуру моторного топлива в соответствующих точках потока. После обработки результатов на ЭВМ получены математическая модель (5) распределения температурного поля вдоль трубки и уточненное значение расхода биотоплива.

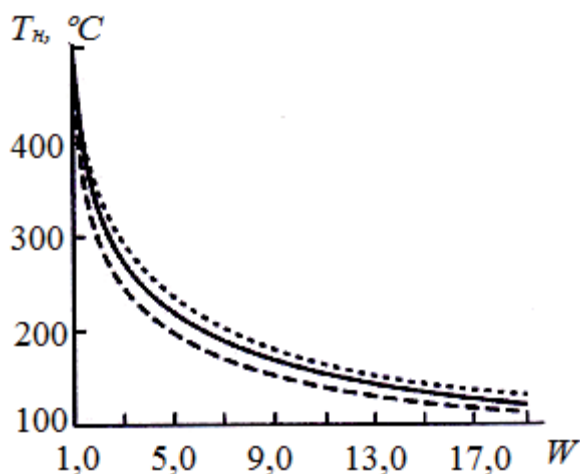


Рис. 1. Графики зависимости температуры нагревателя T_n от расхода топлива W : ---- — бензин; — дизельное топливо; -.-.- — биотопливо

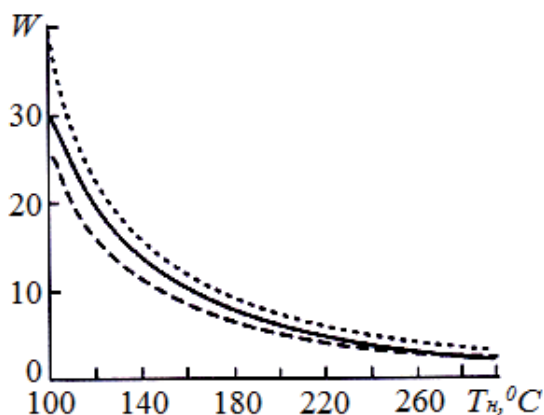


Рис. 2. Графики зависимости расхода топлива W от температуры нагревателя T_n : ---- — бензин; — дизельное топливо; -.-.- — биотопливо

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

$$T(x) = T_n - \left[\frac{\pi E \alpha}{W} - \frac{7}{48} \right] \frac{4P}{\pi d_{тр} \lambda}. \quad (5)$$

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

$$W = \frac{\pi x \alpha}{\frac{\pi d_{тр} \lambda (T_n - T(x))}{4P} + \frac{7}{48}}. \quad (6)$$

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

$$T(x) = T_n - T \exp \left\{ -0,11 \left(\frac{\pi}{4} \right)^{0,2} \frac{x(v)^{0,2}}{(d_{тр})^{0,8} (W)^{0,2}} \right\} + T. \quad (7)$$

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

$$W = \left(\frac{K_8 K_9 x}{\ln[T(E) - T] - \ln[T_n - T]} \right)^5, \quad (8)$$

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

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. 3.

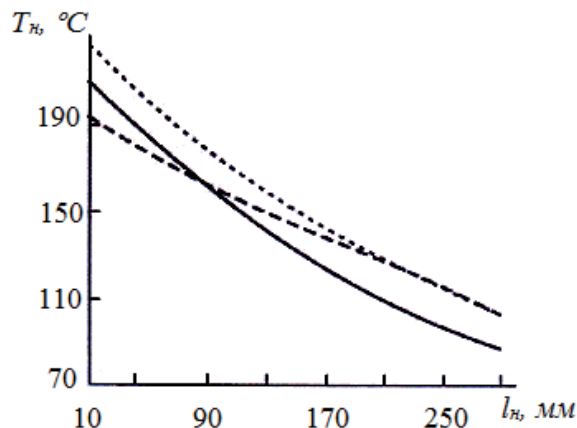


Рис. 3. Графики зависимости T_n от l_n ($d_{тр} = 15$ мм; $d_n = 3$ мм): ---- — бензин; — дизельное топливо; -.-.- — биотопливо, погрешность термопреобразователя 5 °C

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 (рис. 4):

I. Определение расхода по результатам измерения температуры нагревателя и начальной температуры моторного топлива (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 (8).

III. Повышение точности варианта II в результате алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с помощью искусственных нейронных сетей [10].

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

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

VI. Повышение точности варианта I с помощью:

— алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с использованием искусственных нейронных сетей [10];

— аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений [1].

VII. Повышение точности варианта II с помощью: — алгоритмической компенсации случайных и динамических погрешностей с использованием искусственных нейронных сетей [10];

— аппроксимации результатов измерения температуры термопреобразователями и компенсации погрешностей этих измерений [10].

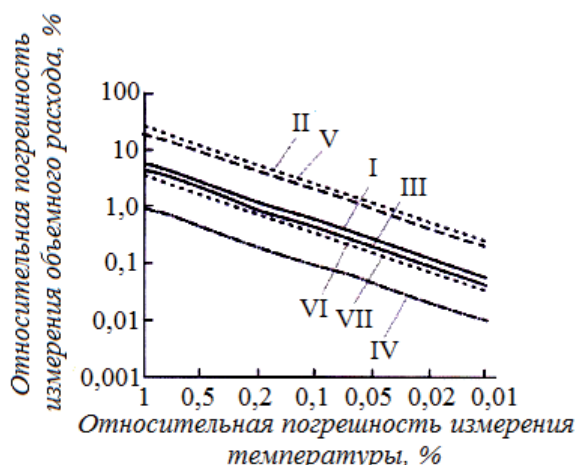


Рис. 4. Результаты моделирования на ЭВМ погрешностей ТАР с использованием биотоплива для вариантов I-VII

Как видно из рис. 4, при минимальных объемах алгоритмических вычислений целесообразно использовать вариант I, что обеспечивает точность измерения объемного расхода моторного топлива $W = 3\%$ при точности измерения температуры нагревателя $\Gamma_n = 1\%$.

6. Обсуждение результатов моделирования теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через термоанемометричный расходомер

В конечном результате проанализирована существующая математическая модель температурного поля в потоке биотоплива, проходящего через расходомер. Проведено численное моделирование на ЭВМ теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через ТАР и установлено, что для повышения точности ТАР следует одновременно измерять температуру моторного топлива в соответствующих точках потока. Поскольку в существующих расходомерах для измерений теплового поля используются один или два термопреобразователя, то математическая модель существующих расходомеров сводится к уравнению теплового баланса нагревателя, охлаждаемого потоком жидкости, или к определению разности температур в двух фиксированных точках. В новом высокоточном расходомере для повышения точности определения расхода моторного топлива использованы группы термопреобразователей. 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 после обработки результатов на ЭВМ получены новая математическая модель распределения температурного поля вдоль трубки и уточненное значение расхода биотоплива.

Для повышения точности измерений при ламинарном и турбулентном режимах измерения следует проводить в нескольких точках потока биотоплива и использовать процедуру линейной аппроксимации. Проведено моделирование на ЭВМ, выполненного при постоянном объемном расходе топлива для различных видов моторного топлива и различных расстояний от нагревателя. 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 %.

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.

7. Выводы

В результате анализа полученных результатов:

1. Проанализирована существующая математическая модель температурного поля в потоке биотоплива, проходящего через расходомер для определения основных ее составляющих элементов.

2. Проведено моделирование теплового баланса нагревателя в подвижном потоке топлива через ТАР для идентификации основных параметров математической модели, от которых зависит точность и быстродействие ТАР. Анализ результатов показал, что для повышения

точности ТАР следует одновременно измерять температуру моторного топлива в соответствующих точках потока.

3. Выведена новая математическая модель распределения температурного поля вдоль трубки и вычислено уточненное значение расхода биотоплива.

4. Предложены методы повышения точности и быстродействия ТАР на основе использования современных специализированных нейропроцессоров. Данный метод позволяет компенсировать влияние случайных и динамических погрешностей ТАР.

Литература

1. Безвесільна, О. М. Витратометрія та витратоміри [Текст]: монографія / О. М. Безвесільна. — Житомир: ЖДТУ, 2007. — 604 с.
2. Lijun Xu. Design of electrode array of inductance flowmeter [Text] / Lijun Xu, Jun Han, Ya Wang // IEEE Sensors Journal. — 2005. — Vol. 5, № 5. — P. 929–933. doi:10.1109/jсен.2005.854486.
3. Clemo, T. The Influence of Wellbore Inflow on Electromagnetic Borehole Flowmeter Measurements [Text] / T. Clemo, W. Barrash, E. C. Reboulet, T. C. Johnson, C. Leven // Ground Water. — 2009. — Vol. 47, № 4. — P. 515–525. doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00559.x.
4. Li, Z.-F. Design and analysis of flow rectifier of gas turbine flowmeter [Text] / Li Zhi-Fei, Du Zheng, Zhang Kai, Li Dong-Sheng, Su Zhong-Di, Yan Wei-Wei // Thermal Science. — 2013. — Vol. 17, № 5. — P. 1504–1507. doi:10.2298/tsci1305504l.
5. Shuo, L. A High-Pressure Bi-Directional Cycloid Rotor Flowmeter [Text] / S. Liu, F. Ding, C. Ding, Z. Man // Sensors. — 2014. — Vol. 14, № 7. — P. 15480–15495. doi:10.3390/s140815480.
6. Thermal Flowmeter Technology [Electronic resource] / BCC Research. — 2013. — Available at: \www/URL: http://www.flowmeters.com/thermal-technology. — 28.08.2014.
7. Boyes, W. Instrumentation Reference book [Text] / edited by W. Boyes. — Ed. 4. — Linacre House, 2010. — 530 p.
8. 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.
9. Безвесільна, О. М. Технолопчні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів [Текст] / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. — Житомир: ЖДТУ, 2007. — 604 с.
10. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації [Текст]: патент України № 90985: МПК (2009) F02M 5/00 / Безвесільна О. М., Ільченко А. В., Подчашинський Ю. О., Шавурський Ю. О.; Житомирський державний технологічний універ-

ситет. — № а200910565; заявл. 19.10.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11. — 4 с. — Режим доступу: \www/URL: http://uapatents.com/4-90985-kalorimetrchnij-vitratomir-motornogo-paliva-z-cifrovyu-obrobkoju-vimiryuvalno-informaci.html.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ВИТРАТОМІРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА

У статті розглянуто конструкцію і принцип роботи термоанемометричного витратоміра. Виведено математичну модель температурного поля у потоці біопалива, яка дозволяє з високою точністю визначити його витрату. Проведено чисельне моделювання теплового балансу нагрівача в рухомому потоці палива термоанемометричного витратоміра та проаналізовано його результати. Запропоновано методи підвищення швидкодії і точності термоанемометричного витратоміра.

Ключові слова: термоанімометр, витратомір, витрата, моделювання, біопаливо, потік, теплопередача, теплопровідність.

Безвесільна Елена Николаевна, заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор, кафедра приборостроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: bezvesilna@mail.ru.

Ільченко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра автомобилей и автомобильного хозяйства, Житомирский государственный технологический университет, Украина, e-mail: avi_7@rambler.ru.

Ткачук Андрей Геннадьевич, кандидат технических наук, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий, Житомирский государственный технологический университет, Украина, e-mail: andrew_tkachuk@i.ua.

Безвесільна Олена Миколаївна, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, кафедра приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», Україна.

Ільченко Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та автомобільного господарства, Житомирський державний технологічний університет, Україна.

Ткачук Андрій Геннадійович, кандидат технічних наук, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, Україна.

Bezvesilna Olena, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: bezvesilna@mail.ru.

Ichenko Andrii, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, e-mail: avi_7@rambler.ru.

Tkachuk Andrii, Zhytomyr State Technological University, Ukraine, e-mail: andrew_tkachuk@i.ua