



УДК 621.436.12
ББК 31.365
Р97

№ 3 (92)

2015

Техніка, енергетика,
транспорт АПК

РОЗРАХУНОК ТА ПОРІВНЯННЯ КРИВИХ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РОБОТІ НА ДИЗЕЛЬНОМУ ПАЛИВІ ТА БІОПАЛИВІ ЗА ДОПОМОГОЮ НОВОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

*Рябошанка Вадим Борисович асистент
Вінницький національний аграрний університет
Ryaboshapka V.
Vinnytsia National Agrarian University*

Анотація: в даній статті розглянуто порівняльні теоретичні розрахунки кривих тепловиділення. Для дослідження було обрано тракторний дизель 4Ч11,0/12,5, що працює дизельному паливі та біопаливі. Методика розрахунку заснована на використанні експоненціальної моделі Вібе І. І., враховуючи змінний показник характеру згорання.

Ключові слова: біодизельне паливо, показник характеру згорання, коефіцієнт тепловиділення (згорання), дизельний двигун, машинно-тракторний агрегат.

Постановка проблеми

Основною характеристикою процесу згорання в дизелі є криві тепловиділення, що описують зміну кількості виділеного тепла та швидкість згорання в циліндрі двигуна в залежності від часу або від кута повороту колінчастого вала [1], що в значній мірі впливає на ефективність роботи тракторного двигуна та машинно-тракторного агрегату в цілому. При зміні палива на альтернативне, головним чином треба приділяти увагу розрахунку процесу тепловиділення в циліндрі двигуна під час згорання.

Для порівняння кривих тепловиділення на дизельному та біодизельному паливі пропонується використати розрахунковий чисельний метод, який би адекватно описував згаданий процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Способи моделювання процесу тепловиділення в основному поділяються на математичні, що базуються на емпіричних формулах, отриманих шляхом аналізу експериментальних даних [2], та засновані на основних фізичних залежностях процесу сумішоутворення та згорання [3]. Більш точною та адекватною є модель розглянута в роботі [4], що поєднує в собі згадані вище способи. Для більш повного огляду процесу моделювання характеристик тепловиділення не залишається поза увагою модель процесу згорання в дизелях з використанням альтернативного палива, розглянута в роботі Лінькова О. Ю. [5].

Істотним недоліком вище наведених моделей є специфіка їх застосування, що прив'язує їх лише до конкретного двигуна одного типу та розмірності (в основному для дизелів з турбонадувом), що обмежує їх універсальність і не дає задовільних результатів при моделюванні процесу тепловиділення дизеля 4Ч11,0/12,5; або ж виникає потреба в додаткових експериментальних дослідженнях, як наприклад для моделі Разлейцева Н. Ф. [3].

В роботах [6–10] висвітлюється математична модель, що базується на математичному розрахунку кривих тепловиділення, використовуючи експоненціальну модель Вібе І. І. зі змінним показником згорання, що представляє особливий інтерес для дослідження згаданого двигуна.

Задачі розрахунку

За допомогою зазначеної моделі змоделювати процес згорання та побудувати порівняльні криві тепловиділення в циліндрі двигуна при використанні дизельного і біодизельного палив.

Мета статті

Криві тепловиділення в циліндрі дизеля характеризують повноту, тривалість, швидкість та інтенсивність згорання, що важливо для дослідження можливості використання іншого виду палива і кращого розуміння сутності процесу. Характеристики процесу тепловиділення в свою чергу будуть впливати на характер протікання індикаторної діаграми двигуна. Тому, мета даної наукової праці – дослідити процес тепловиділення тракторного дизеля та залежність його від іншого виду палива

**Виклад основного матеріалу**

На основі попередніх публікацій [10] викладемо основні закономірності розробленої уточненої моделі.

Для розрахунку інтегральної характеристики тепловиділення використовуємо формулу [10]:

$$x = 1 - \exp\left(-C \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m(\varphi)+1}\right), \quad (1)$$

де C – стала, що залежить від долі палива, що прореагувало до моменту кінця згорання φ_z ;

φ – кут повороту колінчастого вала, рахуючи від моменту початку видимого згорання, град. повороту колінчастого вала (пкв);

φ_z – тривалість згорання, град. пкв;

$m(\varphi)$ – змінний показник характеру згорання.

Постійна C визначається рівнянням:

$$C = \ln(1 - x_z), \quad (2)$$

де x_z – доля палива, що згоріло до моменту практичного кінця реакції.

Задаємося значенням x_z для двигуна 4Ч11,0/12,5 при роботі його на дизельному паливі:

$x_z = 0,9691$ на номінальному режимі (N_{enom}) та $x_z = 0,9820$ – на режимі максимального крутного моменту (M_{emax}), отриманого з інтегральної експериментальної характеристики тепловиділення, що представлена в роботі [11]. Огляд літературних джерел відносно двигуна 4Ч11,0/12,5, показав, що ні характеристика тепловиділення, ні показник x_z , при роботі його на біопаливі не досліджені. Тому, в даній роботі пропонуємо визначити x_z , виходячи з характеристик тепловиділення двигуна 4Ч12,0/14,0, що досліджені експериментально і представлені в роботі [5], і становлять: $x_z = 0,9199$ на режимі N_{enom} та $x_z = 0,9037$ на режимі M_{emax} для дизельного палива; $x_z = 0,9201$ на режимі N_{enom} та $x_z = 0,9158$ на режимі M_{emax} для біодизельного палива.

Тому, дотримуючись умов еквідистантності кривих тепловиділення, як видно в роботі [5] запровадимо відношення сталих C на дизельному паливі та біопаливі:

$$B = \frac{C_{БП}}{C_{ДП}} - 1 \quad (3)$$

де $C_{БП}$, $C_{ДП}$ – стала C у формулі (1), що залежить від долі палива, що прореагувало до моменту кінця згорання φ_z відповідно на біодизельному та дизельному паливі.

Тоді, з формули (3) випливає:

$$C_{БП} = (B + 1) \cdot C_{ДП}. \quad (4)$$

Виходячи з наведених даних для двигуна 4Ч12,0/14,0, використовуючи формули (2 – 4) розраховуючи сталі C для двигуна 4Ч11,0/12,5 при роботі його на біопаливі для двох характерних режимів – N_{enom} та M_{emax} .

Кут повороту колінчастого вала φ у формулі (1) змінюємо від $\varphi = 0$ на початку фази швидкого горіння [1] рахуючи від моменту початку видимого згорання до кінця згорання φ_z з кроком 1 град. пкв;

Змінний показник характеру згорання $m(\varphi)$ у рівнянні (1) для двигуна 4Ч11,0/12,5 визначаємо з рівняння поліному [10]:

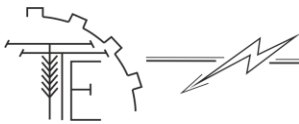
$$m(\varphi) = a_1 \cdot \varphi^6 - a_2 \cdot \varphi^5 + a_3 \cdot \varphi^4 - a_4 \cdot \varphi^3 + a_5 \cdot \varphi^2 - a_6 \cdot \varphi + a_7, \quad (5)$$

де a_1 , a_2 , a_i – коефіцієнти поліному, що залежать від режиму роботи двигуна та виду палива.

Для уточнення коефіцієнтів поліному (5) при роботі на біопаливі, використовуємо результати попередніх досліджень [10], а саме – відношення показників характеру згорання на дизельному та біодизельному паливах:

$$A = 1 - \frac{m_{БП} + 1}{m_{ДП} + 1}. \quad (6)$$

де $m_{БП}$, $m_{ДП}$ – показники характеру згорання відповідно на біодизельному та дизельному



паливах.

Тоді,

$$m_{\text{БП}} = (1 - A) \times (m_{\text{ДП}} + 1) - 1, \quad (7)$$

де A – відношення показників характеру згорання визначаємо з полінома [10]:

$$A = -c_1 \cdot \bar{\varphi}^{-6} + c_2 \cdot \bar{\varphi}^{-5} - c_3 \cdot \bar{\varphi}^{-4} + c_4 \cdot \bar{\varphi}^{-3} - c_5 \cdot \bar{\varphi}^{-2} + c_6 \cdot \bar{\varphi} + a_7, \quad (8)$$

де C_1, C_2, C_i – коефіцієнти поліному, що залежать від виду палива та режиму роботи двигуна; $\bar{\varphi}$ – відносний кут повороту колінчастого вала, який визначається за формулою:

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi}{\varphi_z}. \quad (9)$$

Підставляючи поліном (8) та формулу (9) в рівняння (7), отримаємо:

$$m_{\text{БП}} = \left(1 + c_1 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^6 - c_2 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^5 + c_3 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^4 - c_4 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^3 + c_5 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^2 - c_6 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_z} - c_7 \right) \times (m_{\text{ДП}} + 1) - 1. \quad (10)$$

За формулами (5 – 10), враховуючи коефіцієнти поліномів, що досліджені в попередній праці [10], визначаємо $m_{\text{БП}}$ двигуна 4Ч11,0/12,5 для двох характерних режимів ($N_{\text{еном}}$ та $M_{\text{е max}}$). За допомогою редактора Microsoft Excel розраховуємо показник характеру згорання для двох видів палива на характерних режимах досліджуваного двигуна. Результати розрахунку наводимо на рис. 1.

Для розрахунку диференціальної характеристики тепловиділення використовуємо формулу [6]:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -e^{c \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m(\varphi)+1}} \times C \cdot \frac{dm}{d\varphi} \cdot \left[\frac{m(\varphi)+1}{\varphi_z} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m(\varphi)} - \ln \varphi_z \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m(\varphi)+1} \right]. \quad (10)$$

На основі отриманих кривих (рис. 1), за формулами (1,10) розраховуємо інтегральні та диференціальні характеристики тепловиділення двигуна 4Ч11,0/12,5 на різних паливах та для різних режимів, враховуючи змінний показник характеру згорання. Розрахунки проводимо в середовищі Microsoft Excel, а за їх результатами будемо криві тепловиділення, що являють собою зміну долі виділеного тепла та швидкості тепловиділення в залежності від кута повороту колінчастого вала (див. рис. 2).

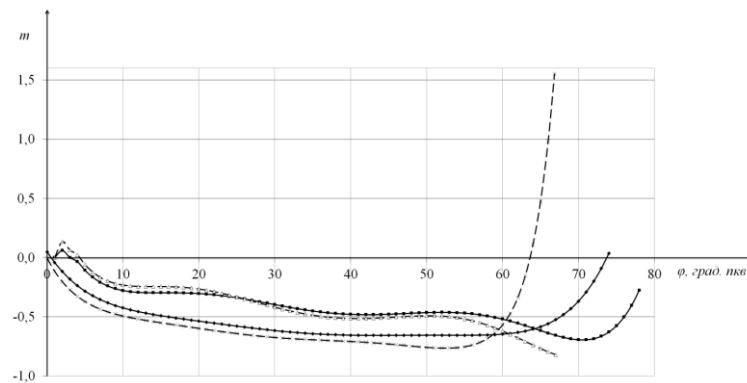
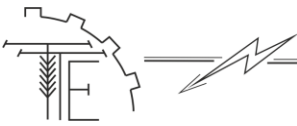


Рис. 1. Розрахункові криві змінного показника характеру згорання Вібе I. I. в залежності від кута повороту колінчастого вала дизеля 4Ч11,0/12,5:

- на дизельному паливі $\bullet\text{---}\bullet\text{---}\bullet\text{---}\bullet$ - при $N_{\text{еном}}$, $\blacksquare\text{---}\blacksquare\text{---}\blacksquare\text{---}\blacksquare$ - при $M_{\text{е max}}$;
- на біодизельному паливі $\times\text{---}\times\text{---}\times\text{---}\times$ - при $N_{\text{еном}}$, $\triangle\text{---}\triangle\text{---}\triangle\text{---}\triangle$ - при $M_{\text{е max}}$.

Таким чином отримали нову, математичну модель процесу тепловиділення, що характеризується змінним показником характеру згорання $m(\varphi)$, уточненим в попередній роботі [10].Для перевірки адекватності розрахунку, суцільними лініями на графіку (рис. 2.) зображені експериментальні характеристики, визначенні з огляду літературних джерел [11] на ДП: інтегральна $x = f(\varphi)$ та її похідна – диференціальна $dx/d\varphi = f(\varphi)$, отримана шляхом графічного диференціювання першої. Штрих-пунктиром показані розрахункові криві на дизельному паливі, а переривчастою лінією – на біодизельному паливі.



З рис. 2 видно, що для тракторного двигуна 4Ч11,0/12,5 при роботі його на номінальному режимі, кут початку горіння на дизельному і біодизельному паливі становить 356 град. пкв, а тривалість горіння на дизельному $\varphi_z = 74$ град., на біодизельному паливі $\varphi_z = 67$ град. повороту колінчастого вала.

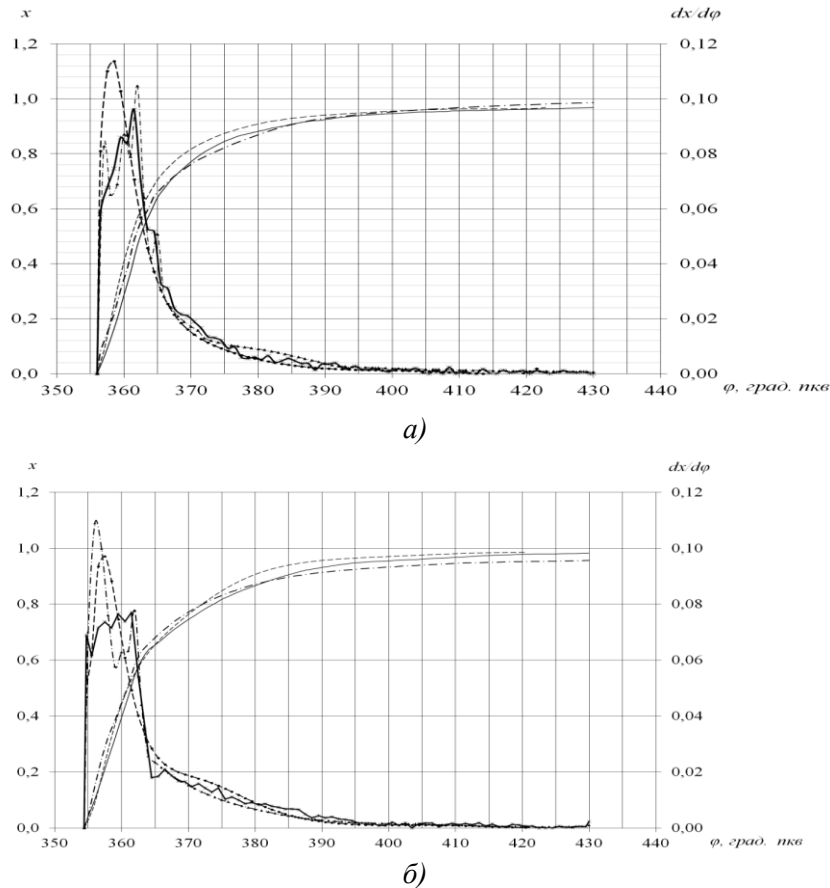


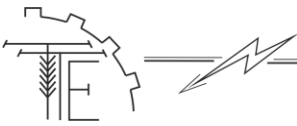
Рис. 2. Характеристики тепловиділення в залежності від кута повороту колінчастого вала дизеля 4Ч11,0/12,5

а) на номінальному режимі, б) на режимі максимального крутного моменту:

— — — — — інтегральна експериментальна $x = f(\varphi)$ на ДП при куті випередження подачі $Q_{\text{впр}} = 26$ град.п.к.в.; — — — — — інтегральна розрахункова $x = f(\varphi)$ на ДП та — · — · — інтегральна розрахункова $x = f(\varphi)$ на БП, отримані за допомогою нової математичної моделі; *-*-*-* - диференційна, отримана шляхом графічного диференціювання експериментальної $x = f(\varphi)$ на ДП, *-*-*-* - диференційна розрахункова $dx/d\varphi = f(\varphi)$ на ДП та *-*-*-* - диференційна розрахункова $dx/d\varphi = f(\varphi)$ на БП, отримана за допомогою нової математичної моделі

Повнота згорання на дизельному паливі становить $x_z = 0,9691$, на біопаливі $x_z = 0,9692$. Інтегральні криві тепловиділення на дизельному та біодизельному паливі протікають одна відносно одної практично еквідистантно, з розташуванням кривої $x = f(\varphi)$ на біодизельному паливі в середньому на 5,1 % вище за аналогічну криву на дизельному паливі, і перетинаються ближче до кінця процесу тепловиділення. Диференційна крива тепловиділення на дизельному та біодизельному паливі досягає свого максимуму при $\varphi = 0,1$.

При роботі цього ж двигуна на режимі перевантаження, кут початку горіння на дизельному і біодизельному паливі становить 354,5 град. пкв, а тривалість горіння на дизельному $\varphi_z = 75,5$ град., на біодизельному паливі $\varphi_z = 66$ град. повороту колінчастого вала. Повнота згорання на дизельному паливі становить $x_z = 0,9820$, на біопаливі $x_z = 0,9857$. Інтегральні криві тепловиділення на дизельному та біодизельному паливі протікають одна відносно одної практично еквідистантно, з розташуванням кривої $x = f(\varphi)$ на біодизельному паливі в середньому на 5,0 % вище за аналогічну



криву на дизельному паливі, і перетинаються ближче до максимуму швидкості процесу тепловиділення. Диференційна крива тепловиділення на дизельному та біодизельному паливі досягає свого максимуму при $\varphi = 0,1$.

Висновки і пропозиції

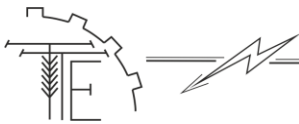
1. За допомогою нової моделі процесу згорання в дизелях, заснованої на експоненціальній моделі згорання І. І. Вібе і уточненої шляхом використання змінного показника характеру згорання, отримали розрахункові криві тепловиділення;
2. Аналіз розрахункових кривих тепловиділення показує, що для тракторного двигуна 4Ч11,0/12,5 інтегральні характеристики тепловиділення для дизельного та біодизельного палива як при роботі на номінальному режимі так і на режимі перевантаження протікають еквідистантно з перетином у деякій точці. Причому крива тепловиділення на біопаливі як правило протікає на 5 % вище;
3. Зважаючи на вище розташування інтегральної кривої тепловиділення при використанні біопалива для тракторного двигуна 4Ч11,0/12,5, можна зробити висновок, що згорання біодизельного палива проходить ефективніше порівняно з дизельним.

Список літератури

1. Николаенко А. В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. – М.: Колос, 1984. – 336 с
2. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 273 с.
3. Разлейцев Н. Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. – 169 с.
4. Филипповский А. И. – Совершенствование рабочего процесса дизеля 4Н32/32 на основе физического и математического моделирования: Автореф. дис. к-та технических наук: 05.04.02. – Харьков:, 1988. – 20 с.
5. Лінков О. Ю. – Вибір та обґрунтування параметрів сумішоутворення та згорання в швидкохідному дизелі, який працює на альтернативному паливі: Автореф. дис. к-та технічних наук: 05.05.03. – Харків:, 2004. – 22 с.
6. Семенов В. Г., Рябошапка В. Б. Применение модели Вибе И. И. для моделирования и аппроксимации процесса сгорания в дизеле 4Ч11,0/12,5 // “Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства”: Сборник научных докладов XVII Международной научно-практической конференции, 24 – 25 сентября 2013 года, г. Тамбов. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В. – С. 175-180.
7. Семенов В. Г., Рябошапка В. Б. Аппроксимация и моделирование процессов сгорания в дизеле 4Ч11,0/12,5 // “Перспективи розвитку тракторів і автомобілів”: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченій 25-річчю кафедри тракторів і автомобілів – Вінниця 2013. – С. 64-70.
8. Анісімов В. Ф., Комаха В. П., Рябошапка В.Б. Элементы математической модели процесса горения в дизелях, что враховує зміну виду палива // “Перспективи розвитку двигунів внутрішнього згорання працюючих на різних видах палива”: Матеріали I регіональної науково-технічної конференції, присвяченій 80-річчю академіка Української академії наук, професора, доктора технічних наук Анісімова Віктора Федоровича – Вінниця 2015. – С 52-58.
9. Анісімов В. Ф., Рябошапка В. Б. Апроксимація і моделювання процесу згорання в сільськогосподарських тракторних дизелях з використанням біопалива // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні агротехнології: тенденції та інновації” у трьох томах – Вінниця, 2015. – Т.3. – С 4-7.
10. Семенов В. Г., Комаха В. П., Рябошапка В.Б. Моделирование процесса сгорания в тракторных и комбайновых дизелях, работающих на разных видах топлива за помощью уточненной модели И. И. Вибе с помощью аппроксимации экспериментальных данных // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» – Вінниця, 2015. – №1 (91) – С 52-58.
11. Романов С. А. – Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на метаноле-топливной эмульсии: Автореф. дис. к-та технических наук: 05.04.02. – Санкт-Петербург:, 2010. – 19 с.

References

1. Nikolaenko A. V. Theory, design and calculation of automotive and tractorengines. – М.: Kolos, 1984. – 336 s.
2. Vibe I. I. New about the working cycle of engines. – М.: MASHGIZ, 1962. – 273 s.
3. Razleytsev N. F. Simulation and optimization of combustion process in diesel engines. – Kharkov: High school. Publishing house of Kharkov. University, 1980. – 169 s.
4. Filipkovsky A. I. – Improvement in the working process of diesel 4Н32/32 on the basis of physical and mathematical modeling: abstract dis. the technical Sciences: 05.04.02. – Kharkov:, 1988. – 20 s.
5. Linkov, A. J. – The Selection and justification of the parameters of mixture formation and combustion in



high-speed diesel engines that runs on alternative fuels: abstract.dis. the technical Sciences: 05.05.03. – Kharkov., 2004. – 22s.

6. Semenov V. G., Ryaboshapka V. B. Application of the model Vibe I. I. for the simulation and approximation of the combustion process in the diesel motor 4Ч11,0/12,5 // “Improving efficiency of resource use in the production of agricultural products – new technologies and a new generation of technology for crop and livestock production”: Collection of scientific reports of the XVII International scientific-practical conference, 24 – 25 September 2013, Tambov. – Tambov: Publishing house Pershin R. V. – P. 175-180.

7. Semenov V. G., Ryaboshapka V. B. Approximation and simulation of combustion processes in diesel motor 4Ч11,0/12,5 // “Prospects of development tractors first car”: Ukrainian Materials of the scientific conference for dedicated to the 25th anniversary the Department tractors first car – Vinnitsa 2013. – S. 64-70.

8. Anisimov V. F., Komakha V. P., Ryaboshapka V. B. Elements of the mathematical model of the combustion process in diesel engines, taking into account the change in fuel type // “Perspectives of development of internal combustion engines operating on various fuels”: Materials of regional scientific-technical conference dedicated to the 80th anniversary of academician of the Ukrainian Academy of Sciences, Professor, doctor of technical Sciences Anisimov Viktor Fedorovich – Vinnitsa 2015. – S. 52-58.

9. Anisimov V. F., Ryaboshapka V. B. Approximation and modeling of combustion in an agricultural tractor diesel engines using bio-fuel // proceedings of Ukrainian scientific-practical conference “Modern technologies: trends and innovations” in three volumes – Vinnitsa, 2015. – Т. 3. – S. 4-7.

10. Semenov V. G., Komakha V. P., Ryaboshapka V. B. The simulation of the combustion process in a tractor and combine diesel engines running on different fuels by using more refined models. I. I. Vibe by fitting experimental data // all – Ukrainian scientific- technical journal “Technology, energy, transportation, agriculture” – Vinnitsa, 2015. – №1 (91) – S 52-58.

11. Romanov, S. A. – Research of working process of diesel motor 4Ч11,0/12,5 when working on methanol-fuel emulsions: abstract dis. the technical Sciences: 05.04.02. – St. Petersburg., 2010. – 19 s.

РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ КРИВЫХ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ И БИОТОПЛИВЕ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Аннотация: в статье рассмотрены сравнительные теоретические расчеты кривых теплотыделения. Для исследования были выбраны тракторный дизель 4Ч11,0/12,5, работающий на дизельном топливе и биотопливе. Методы расчета основаны на использовании экспоненциальной модели Вибей. И., учитывая переменный показатель характера сгорания.

Ключевые слова: биодизельное топливо, показатель характера сгорания, коэффициент теплотыделения (сгорания), дизельный двигатель, машинно-тракторный агрегат.

CALCULATION AND COMPARISON OF CURVES HEAT RELEASE AT WORK ON DIESEL AND BIOFUEL THROUGH NEW MATHEMATICAL MODEL

Summari: in this article the comparative theoretical calculations of heat release curves. To investigate was chosen tractor diesel 4Ч11,0/12,5, running diesel and biofuel. The method of calculation is based on the exponential model Vibe I., given the nature of variable rate combustion.

Keywords: biodiesel, an indicator of character of combustion, the rate of heat release (combustion), diesel engine, machine-tractor unit.