

УДК 621.43.055

ВЛИЯНИЕ РАССЛОЕНИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА НА ПОКАЗАТЕЛИ СГОРАНИЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

Канд. техн. наук В.А. Корогодский, асп. О.Н. Стеценко, магистрант Е.А. Ткаченко

ВПЛИВ РОЗШАРУВАННЯ ПАЛИВНО-ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ НА ПОКАЗНИКИ ЗГОРЯННЯ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ

Канд. техн. наук В.А. Корогодський, асп. О.М. Стеценко, магістрант Є.О. Ткаченко

THE INFLUENCE STRATIFICATION OF FUEL AND AIR CHARGE ON COMBUSTION INDICATORS TWO-STROKE ENGINES WITH SPARK IGNITION

Candidate of techn. sciences V.A. Korohodskiy, postgraduate O.N. Stetsenko, master student E.A. Tkachenko

При обробці експериментальних індикаторних діаграм за навантажувальною характеристикою двотактного двигуна з іскровим запалюванням при безпосередньому впорскуванні палива та організації згоряння розширеного паливно-повітряного заряду визначені емпіричні залежності зміни показника характеру згоряння m і тривалості згоряння $d\varphi_z$. Визначене значення максимального тиску згоряння (P_z) та відхилення P_z від ВМТ в залежності від навантаження.

Ключові слова: навантажувальна характеристика, показники згоряння, безпосереднє впорскування палива, розширований паливно-повітряний заряд, двотактний двигун.

При обработке экспериментальных индикаторных диаграмм по нагрузочной характеристике двухтактного двигателя с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива и организации сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда получены эмпирические зависимости изменения показателя характера сгорания m и продолжительности сгорания $d\varphi_z$. Определены значения максимального давления сгорания (P_z) и отклонение P_z от ВМТ в зависимости от нагрузки.

Ключевые слова: нагрузочная характеристика, показатели сгорания, непосредственное впрыскивание топлива, расслоенный топливно-воздушный заряд, двухтактный двигатель.

For further researches of working processes of two-stroke spark-ignition engines with direct fuel injection and organization of combustion stratified fuel-air charge and to identify factors, that have influenced to the performance of the engine, analysis of the experimental indicator diagrams of the loading characteristic by the I.I.Vibe's method have conducted. As a result, the curves of heat release in the cylinder,

of which the combustion parameters are defined, produced. The empirical relationships of changing of the character of combustion m index and duration of combustion $d\phi_z$ by the loading characteristic at $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ produced. The values of the maximum combustion pressure (P_z) and P_z the deviation from TDC depending on the load

Keywords: loading characteristic, spark timing, spark-ignition engines, combustion, direct-injection, stratified charge.

Введение и постановка проблемы. В настоящее время ужесточены нормативные требования к выбросам вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ) для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. Для выполнения нормативных требований и снижения расхода топлива целесообразно использовать в двигателях с искровым зажиганием (ИЗ) непосредственный впрыск топлива (НВТ). Наиболее целесообразно применение НВТ в двухтактных двигателях с ИЗ. Использование НВТ позволяет исключить потери топлива при продувке, организовать сгорание расслоенного топливно-воздушного заряда (РТВЗ) при значении коэффициента избытка воздуха в цилиндре $\alpha_{\text{цил}} > 1,3$, а также повысить степень сжатия, что в итоге приводит к повышению эффективных показателей и снижению выбросов ВВ с ОГ. Поэтому исследование рабочих процессов ДВС с ИЗ при внутреннем смесеобразовании и организации сгорания РТВЗ является актуальным.

Анализ публикаций. В двигателях при организации рабочего процесса НССИ (Homogeneous Charge Compression Ignition) гомогенная топливно-воздушная смесь (ТВС) равномерно распределяется по всему надпоршневому объёму и воспламеняется от сжатия на частичных нагрузках и от принудительного источника воспламенения при максимальных нагрузках.

Высокая степень сжатия ($\epsilon > 15$), относительно низкая температура сгорания, отсутствие потерь при дросселировании воздуха на впуске и высокие значения $\alpha > 2,5$ обеспечивают экономичность двигателя с рабочим процессом НССИ на уровне дизелей [2].

Однако, отсутствие решения ряда проблем, и в первую очередь – проблемы контроля управления воспламенением ТВС не позволяет начать массовое производство двигателей с процессом НССИ [3].

В Centre for Advanced Powertrain and Fuels (CAPF), Brunel University разработан двухтактный двигатель с механической

топливной системой для НВТ в цилиндр двигателя. Использование форсунок с клапанным и двухщелевым распылителем позволило организовать два рабочих процесса. В первом случае форсунка с клапанным распылителем формирует топливную струю, симметричную оси форсунки, что позволяет организовать объём ТВС по направлению движения струи в надпоршневом объёме. Во втором случае форсунка с двухщелевым распылителем формирует две топливные струи, позволяющие более равномерно распределять частицы топлива по объёму ТВС, способствуя снижению g_e до $225 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ [4].

Анализ описанных выше способов организации рабочих процессов в ДВС с ИЗ показывает, что для обеспечения наименьшего значения g_e целесообразно обеднять ТВС в объёме цилиндра таким образом, чтобы возле электродов свечи зажигания находился объём гомогенной ТВС, а на периферии её – воздух, т.е. распределить ТВС и воздух слоями [8].

Одним из способов обеспечения РТВЗ с гомогенным составом в объёме ТВС может быть организация плёночного смесеобразования. Процесс перемешивания паров топлива, испарившихся с поверхности топливной плёнки, и набегающего воздушного заряда способствует получению качественной однородной ТВС. При этом для организации плёночного смесеобразования достаточно относительно невысокого давления впрыскивания топлива (до 10 МПа) по сравнению с организацией объёмного смесеобразования, где однородная ТВС в основном формируется за счет повышенного давления впрыскивания топлива (свыше 100 МПа), что влечёт за собой повышение механических потерь. Также испарение топлива с поверхности камеры сгорания (КС) снижает температуру стенки, охлаждая её, что способствует снижению потерь тепла в окружающую среду.

Для организации РТВЗ с плёночным смесеобразованием в двухтактном двигателе

ДН-4М ($S/D=87/82$) с ИЗ и НВТ в стенке цилиндра устанавливается топливная форсунка клапанного типа. Конструкция распылителя, относительно низкое давление впрыскивания топлива (до 4 МПа), а также снижение воздействия воздушных потоков на топливную струю при впрыскивании топлива обеспечивают организацию плёночного смесеобразования, которая состоит в следующем. При НВТ на такте сжатия в заполненную воздухом КС впрыскивается конусообразная топливная струя, направленная таким образом, что электроды свечи зажигания находятся внутри её воздушной полости, а частицы топлива достигают поверхности стенок КС. При воздействии температуры стенки под топливной плёнкой и набегающего воздушного потока в цилиндре формируется РТВЗ [5, 10]. Во время сгорания, при распространении фронта пламени навстречу ему направляется поток ТВС, что позволяет сократить продолжительность сгорания. Турбулизация ТВС и интенсивный подвод воздуха в зону горения обеспечивают эффективное сгорание РТВЗ на частичных нагрузках с практически однородным легковоспламеняемым составом ТВС возле электродов свечи зажигания и воздушным зарядом на её периферии. При максимальных нагрузках ТВС занимает практически весь надпоршневой объём [6, 9].

Первоначально, для выявления факторов, влияющих на уровень эффективных показателей двигателя с ИЗ и НВТ, целесообразно оценить показатели сгорания в зависимости от нагрузки по экспериментальным индикаторным диаграммам.

Цель исследований. Определение эмпирических зависимостей изменения показателя характера сгорания (m) и продолжительности сгорания ($d\phi_z$) по модели И.И. Виле на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Задачи исследований. Обработка экспериментальных индикаторных диаграмм, определение кривых сгорания топлива и изменение скорости тепловыделения (dx/df_i) при сгорании РТВЗ. Определение максимального давления сгорания (P_z) и отклонение P_z от ВМТ в зависимости от нагрузки.

Обработка экспериментальных данных. Экспериментальные исследования рабочих процессов одноцилиндрового двухтактного двигателя ДН-4М с ИЗ, воздушным охлаждением и кривошипно-камерной продувкой при НВТ и организации сгорания РТВЗ проводились на кафедре ДВС НТУ «ХПИ».

На режимах нагрузочной характеристики при частоте вращения коленчатого вала $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, рациональном моменте начала подачи топлива $\phi_{впр} = 224 \text{ град. п.к.в.}$ после ВМТ и угле опережения зажигания $\theta_{зж} = 10 \text{ град. п.к.в.}$ до ВМТ определялись эффективные показатели, а также проводилось индицирование в цилиндре двигателя.

С повышением нагрузки до $P_e=0,192 \text{ МПа}$ значение g_e снижается до $258 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ (рис. 1), при этом воздушная заслонка приоткрывается (рис. 2) и разрежение ($dP_{др}$) за ней снижается с $0,012$ до $0,0085 \text{ МПа}$, что способствует повышению $\alpha_{цил}$ до $1,94$. При дальнейшем повышении нагрузки до $P_e = 0,322 \text{ МПа}$ и увеличении подачи топлива $\alpha_{цил}$ снижается до $1,66$, а значение g_e соответствует $259 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$.

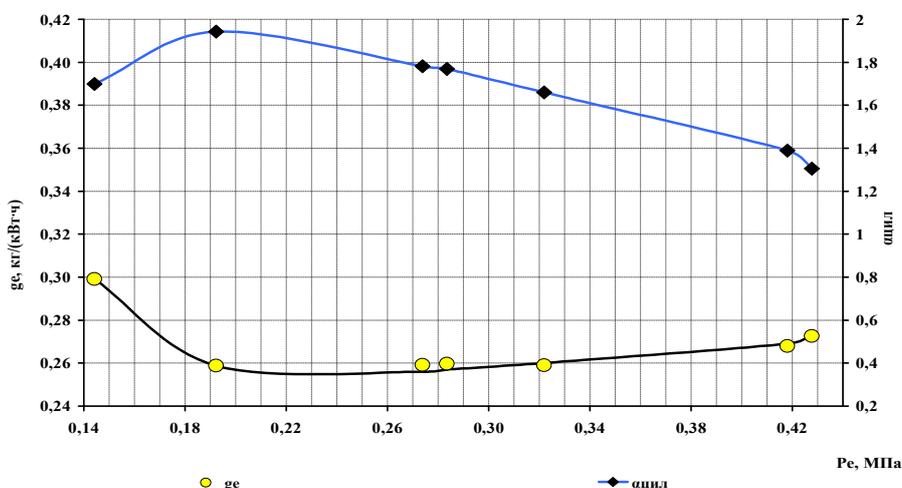


Рис. 1. Значения g_e и $\alpha_{цил}$

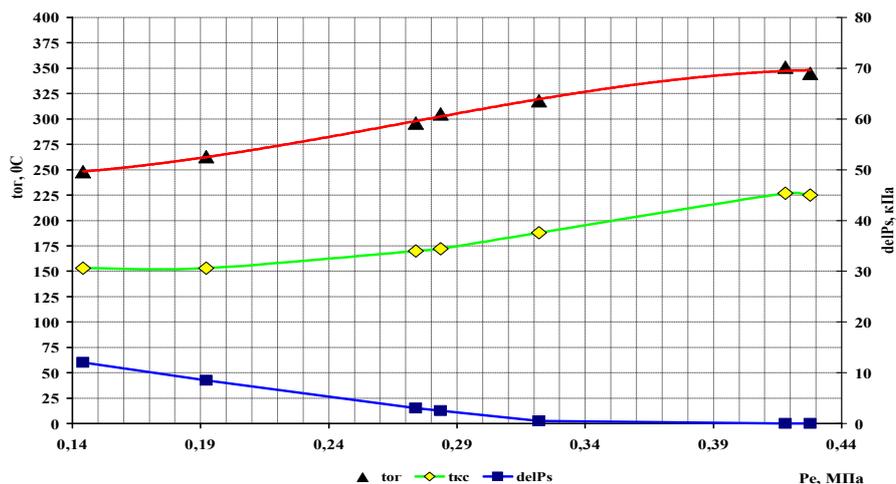


Рис. 2. Значения $dP_{др}$ и $t_{ог}$

В диапазоне максимальных нагрузок ($P_e = 0,322 \div 0,428$ МПа) при полностью открытой воздушной заслонке ($dP_{др} = 0$) значения $\alpha_{цил}$ снижаются до 1,31, а g_e повышается до 273 г/(кВт·ч). С повышением нагрузки до $P_e = 0,428$ МПа возрастает тем-

пература ОГ, которая достигает 345 °С (рис. 2).

Для определения основных показателей процессов сгорания по экспериментальным индикаторным диаграммам (рис. 3) использовалась методика, предложенная И.И. Вибе [7].

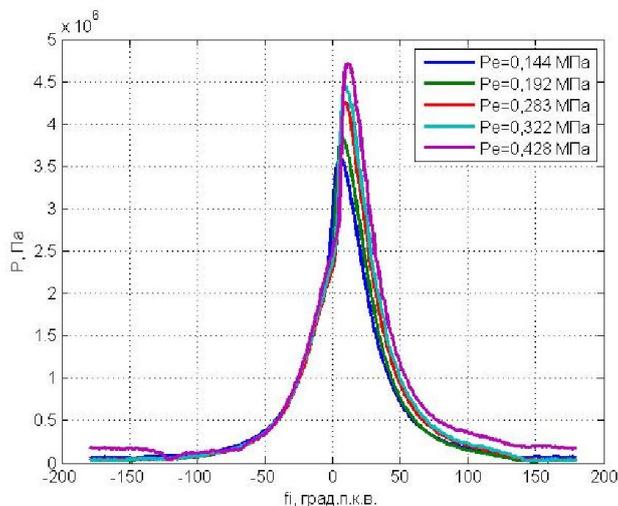


Рис. 3. Экспериментальные индикаторные диаграммы двигателя

Для обработки индикаторных диаграмм двухтактного двигателя по методике И.И. Вибе была написана программа в среде программирования Matlab. В результате обработки индикаторных диаграмм при работе двигателя ДН-4М с ИЗ и НВТ получены кривые сгорания топлива (рис. 4) на режимах нагрузочной характеристики, из которых определены моменты окончания процессов

сгорания. За момент начала сгорания принят момент начала воспламенения (угол опережения зажигания $\theta_{зж} = 10$ град. п.к.в. до ВМТ), а за момент окончания видимого сгорания – достижение максимального значения по характеристике сгорания топлива (x_i) [8].

Основное уравнение сгорания топлива

$$x = 1 - e^{c \left(\frac{\varphi}{d\varphi_z} \right)^{m+1}},$$

где m – показатель характера сгорания;

φ – условная продолжительность процесса сгорания, град. п.к.в.;

$d\varphi_z$ – продолжительность процесса сгорания, град. п.к.в.;

$c = -6,908$ при $x = 0,99$.

По результатам расчета представлены кривые сгорания топлива (рис. 4), построены характеристики скорости тепловыделения (dx/df_i) (рис. 5) в зависимости от нагрузки (P_e) на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000$ мин⁻¹. Получены значения m (рис. 6) и $d\varphi_z$ (рис. 7).

Значение показателя m , характеризующее интенсивность сгорания топлива, определялось методом наименьших квадратов (рис. 6) на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000$ мин⁻¹. Изменение значений m с удовлетворительной степенью аппроксимации $R^2=0,999$ описывается эмпирической зависимостью

$$m = 28,77P_e^3 - 49,34P_e^2 + 19,96P_e - 0,1763.$$

В результате исследований установлено, что продолжительность сгорания топлива увеличивается с повышением нагрузки. Значение продолжительности сгорания можно определить с удовлетворительной степенью аппроксимации $R^2=0,9698$ по эмпирической зависимости $d\varphi_z = 43,09P_e + 22,8$ (рис. 7).

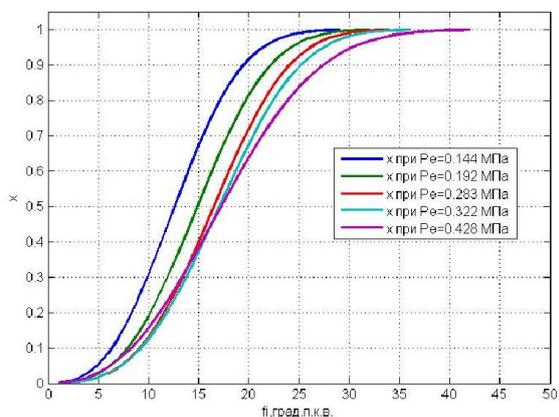


Рис. 4. Характеристики сгорания топлива

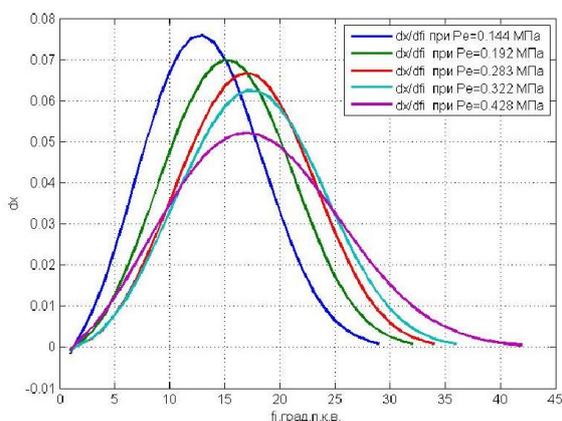


Рис. 5. Изменение скорости тепловыделения dx/df_i

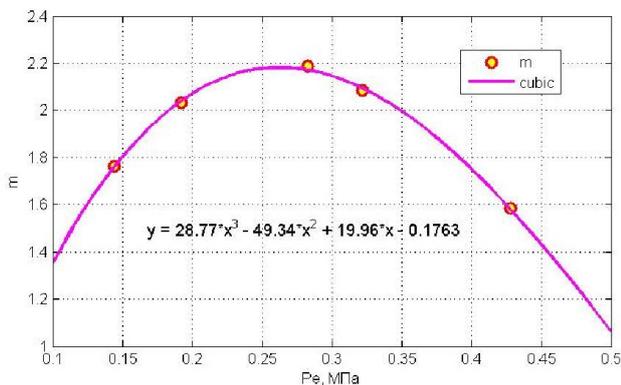


Рис. 6. Изменение показателя сгорания m

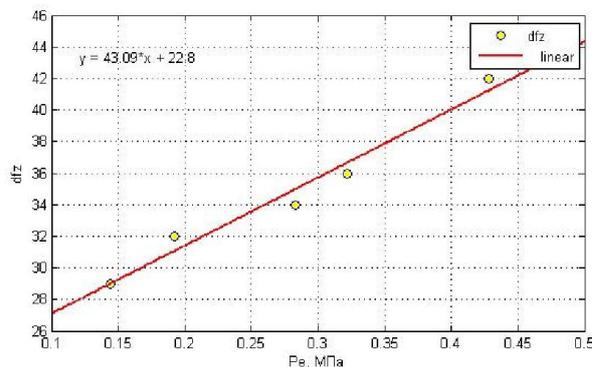


Рис. 7. Изменение продолжительности сгорания $d\varphi_z$

Анализ экспериментальных индикаторных диаграмм по нагрузочной характеристике

при $n = 3000$ мин⁻¹ показал таблицу, что $d\varphi_z$ изменяется в диапазоне от 29 до 42 град. п.к.в.

Скорость тепловыделения (dx/df_i) при сгорании РТВЗ снижается от 0,076 до 0,052 град. п.к.в.⁻¹ при повышении нагрузки. Значения показателя характера сгорания (m) с повышением нагрузки до $P_e = 0,283$ МПа увеличивается до 2,18, а при дальнейшем повышении нагрузки до

$P_e = 0,428$ МПа снижается до 1,58. Максимальное давление в цилиндре (P_z) с повышением нагрузки возрастает до 4,71 МПа, при этом значения P_z смещаются относительно ВМТ по направлению вращения коленчатого вала на 6÷10 град.

Таблица

Результаты исследований

P_e , МПа	0,144	0,192	0,283	0,322	0,428
$d\varphi_z$, град. п.к.в.;	29	32	34	36	42
dx/df_i , град. п.к.в. ⁻¹	0,076	0,069	0,067	0,062	0,052
m	1,76	2	2,18	2,08	1,58
P_z , МПа	3,6	3,84	4,25	4,45	4,716
смещение от ВМТ, град.	6	7	9	9	10

Выводы. По экспериментальным индикаторным диаграммам двухтактного двигателя ДН-4М с ИЗ и НВТ на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000$ мин.⁻¹ определены эмпирические зависимости изменения показателя характера сгорания (m) и

продолжительности сгорания ($d\varphi_z$). Построены кривые сгорания топлива и кривые скорости тепловыделения, определены значения максимального давления при сгорании (P_z) и смещение P_z относительно ВМТ.

Список использованных источников

1. Basshuysen, R. Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial [Текст] / R. Basshuysen Aufl. *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2013. – 480 p.
2. Tunestal, P.A. The Use of Cylinder Pressure for Estimation of the In-Cylinder Air/Fuel Ratio of an Internal Combustion Engine [Текст]: A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering-Mechanical Engineering / P.A. Tunestal - University of California, Berkeley, 2000 – 106p.
3. Zhao, H. HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry [Текст] / Edited by H. Zhao – Cambridge: CRC Press, 2007. – 557 p.
4. Y Zhang. Lean boost CAI combustion in a 2-stroke poppet valve GDI engine [Текст] / Y Zhang, H Zhao // *Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions; IMECHE, LONDON* - 2013, 169-177 p.
5. Спосіб сумішоутворення в камері згорання двигуна внутрішнього згорання і двигун внутрішнього згорання з розшаруванням паливоповітряного заряду та із примусовим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива [Текст]: пат. 87733 С2, Україна, МПК7 F02В 17/00. / Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г.; заявник і власник – Корогодський В.А., Кулігін В.І., Кирилюк І.О., Ломов С.Г. - № a200710939; заявл. 03.10.2007; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15. – 3 с.
6. Корогодский, В.А. Организация рационального способа регулирования мощности в двигателе с искровым зажиганием [Текст] / В.А. Корогодский // *Двигатели внутреннего сгорания.* – Харьков, 2013. – №1. – С. 11-16.
7. Вибє, И.И. Новое о рабочем цикле двигателей [Текст] / И.И Вибє. -М.:Машгиз, 1962. – 270 с.
8. Chiodi, M. An Innovative 3D-CFD Approach towards Virtual Development of Internal Combustion Engines [Текст] / M. Chiodi. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH* - 2011 – 245p.
9. Zhao, H. Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development Gasoline and Gas Engines, V.1. - 2010 [Текст] / H. Zhao. *Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC*, 2010. – 324 p.

10. Корогодский, В.А. Повышение топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с искровым зажиганием за счет совершенствования процессов внутреннего смесеобразования [Текст] / В.А. Корогодский // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков, 2013. – № 2. – С. 21-26.

Рецензент д-р техн. наук, профессор А.П. Фалендыш

Корогодський Володимир Анатолійович, канд. техн. наук, доцент, кафедра теплотехніки та теплових двигунів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-78.

E-mail: korogodskiy@mail.ru.

Стеценко Оксана Миколаївна, аспірант, кафедра теплотехніки та теплових двигунів Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-78. E-mail: stetsenko.oksana@mail.ru.

Ткаченко Євген Олександрович, магістрант, кафедра теплотехніки та теплових двигунів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-78.

Korohodskiy Volodymyr Anatolyovych candidate of technical science, associate professor department of heating engineering and heat engines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-78.

E-mail: korogodskiy@mail.ru.

Stetsenko Oksana Nikolaevna postgraduate, department of heating engineering and heat engines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-78. E-mail: stetsenko.oksana@mail.ru.

Tkachenko Evgen Oleksandrovych master student, department of heating engineering and heat engines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-78.

Наукова праця здана до друку 08.07.2015 року