

УДК 621.43.013

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ЗА РАХУНОК ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КУТІВ ВИПЕРЕДЖЕННЯ ЗАПАЛЮВАННЯ

К-т техн. наук В.А. Корогодський, аспір. О.М. Стеценко, наук. співроб. НТУ «ХПІ» С.В. Обозний.

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА И СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ЗА СЧЕТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УГЛОВ ОПЕРЕЖЕНИЯ ЗАЖИГАНИЯ

К-т техн. наук В.А. Корогодский, аспир. О.Н. Стеценко, науч. сотр. НТУ «ХПИ» С.В.Обозный

REDUCING THE FUEL CONSUMPTION AND REDUCTION EMISSION EXHAUST GASES BY DEFINITION OF RATIONAL SPARK TIMING

Cand. of techn. sciences V.A. Korohodskiy, postgraduate O.N. Stetsenko, research associate NTU "KPI" S.V. Obozniy .

На основі експериментальних досліджень по навантажувальній характеристиці двотактного двигуна з іскровим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива і організації згоряння розширеного паливно-повітряного заряду визначені раціональні кути випередження запалювання по мірі зміни навантаження, що дозволяє знизити витрату палива та скоротити викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Ключові слова: навантажувальна характеристика, кут випередження запалювання, зниження витрати палива, двотактний двигун.

На основании экспериментальных исследований по нагрузочной характеристике двухтактного двигателя с искровым зажиганием при непосредственном впрыскивании топлива и организации сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда определены рациональные углы опережения зажигания по мере изменения нагрузки, что позволяет снизить расход топлива и сократить выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

Ключевые слова: нагрузочная характеристика, угол опережения зажигания, снижение расхода топлива, двухтактный двигатель.

Using the engine power system with direct fuel injection for the spark-ignition engines, helps to reduce the fuel consumption and emission of the exhaust gases. It especially suitable to use for the two-stroke engines with direct injection, wherein it determines the reduction of loss of fuel into the exhaust system for the scavenging cylinder. Thus, the organization of stratified fuel-air charge allows to efficiently burn the fuel-air mixture, which further reduces the fuel consumption and performance of modern requirements for emissions. The start of ignition of fuel-air mixture corresponds to the ignition-timing angle, which affects the intensity of the processes of combustion and fuel and environmental performance of the engine.

Based on experimental researches of the two-stroke spark-ignition engine loading characteristic, with the direct fuel injection and combustion organization stratified fuel-air charge to the load characteristic modes with $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, the rational moment of the fuel supply

defined. At a given angle were set to rational angles ignition as the load varies, thus reducing fuel consumption and reduce emissions in exhaust gases.

Keywords: *fuel consumption, spark timing, spark-ignition engines, exhaust, direct-injection, stratified charge.*

Введение и актуальность проблемы. Использование в двигателях с искровым зажиганием (ИЗ) системы питания с непосредственным впрыскиванием топлива (НВТ) позволяет снизить расход топлива и сократить содержание вредных веществ (ВВ) в отработавших газах (ОГ). Особенно целесообразно применение НВТ в двухтактных двигателях, что предопределяет исключение потерь топлива в выпускную систему при продувке цилиндра. При этом организация расслоенного топливно-воздушного заряда (РТВЗ) позволяет эффективно сжигать топливно-воздушную смесь (ТВС), что дополнительно обеспечивает снижение расхода топлива и выполнение современных требований по токсичности ОГ. Момент начала воспламенения ТВС соответствует значению угла опережения зажигания ($\theta_{\text{зж}}$), который влияет на интенсивность протекания процессов сгорания и на топливно-экологические показатели двигателя, поэтому проведение исследований по определению рациональных значений $\theta_{\text{зж}}$ в зависимости от режима работы двигателя является актуальной проблемой.

Анализ публикаций и определение направления исследований. Исследования по индикаторным диаграммам показателей двигателей с ИЗ и внешним смесеобразованием свидетельствуют о том, что при обеднении ТВС ($\alpha > 1,2$) протекание процессов сгорания в последовательных циклах становится менее идентичным, снижается эффективность протекания процессов горения, что обуславливает неустойчивость работы двигателя и увеличение расхода топлива [1]. Для повышения эффективности протекания процессов сгорания увеличивают угол опережения зажигания ($\theta_{\text{зж}}$), что способствует уменьшению не идентичности последовательных циклов и снижению расхода топлива.

Проведенные исследования по влиянию момента начала воспламенения

($\theta_{\text{зж}}$) при обедненном и обогащенном составе ТВС на показатели сгорания показывают, что $\theta_{\text{зж}}$ имеет огромное влияние на дальнейшее протекание процессов сгорания. Момент начала воспламенения влияет на величину максимального давления в цилиндре двигателя относительно ВМТ и соответственно на значения среднего индикаторного давления, которое характеризует уровень форсирования рабочего цикла двигателя и его топливную экономичность [2, 10].

Своевременное тепловыделение при сгорании обеспечивает максимальную работу цикла. Величина значения $\theta_{\text{зж}}$ характеризует продолжительность начальной фазы сгорания. При интенсивном протекании процессов сгорания в начальной фазе $\theta_{\text{зж}}$ уменьшается и соответственно наоборот увеличивается при снижении скорости сгорания и возрастания давления в цилиндре по углу поворота коленчатого вала ($dp / d\phi$) [3, 11].

Современные результаты исследований двигателей с ИЗ и НВТ показывают, что организация РТВЗ позволяет получить меньший расход топлива и более низкое содержание ВВ в ОГ, чем при организации обедненного гомогенного состава ТВС по всему объему цилиндра [4, 5, 8, 9].

Различные способы организации процессов внутреннего смесеобразования с РТВЗ при НВТ в цилиндр двигателя с ИЗ имеют свои индивидуальные особенности. Формирование ТВС, обусловленное направленным движением потоков рабочего тела в цилиндре двигателя по отношению к месту расположения электродов свечи зажигания. При этом состав ТВС, количество остатков продуктов сгорания, параметры рабочего тела и интенсивность турбулизации в зоне горения определяют эффективность протекания процессов сгорания РТВЗ.

С целью организации эффективного сгорания топлива разработан новый способ

смесеобразования и сгорания РТВЗ, который позволяет осуществить распределение ТВС в объеме цилиндра таким образом, что например, при значениях коэффициента избытка воздуха в цилиндре $\alpha_{\text{цил}} > 1,5$ состав ТВС возле электродов свечи зажигания находится в диапазоне надежного воспламенения с $\alpha = 0,8 \div 1,0$. При протекании основной фазы сгорания в зону пламени интенсивно подводится воздух [6].

При изменении цикловой подачи топлива соответственно изменяется режим работы двигателя и состав ТВС. Поэтому, для получения потенциально более высоких топливно-экологических показателей двигателя в определенном диапазоне нагрузок необходимо проведение экспериментальных исследований по определению рационального момента начала воспламенения ($\theta_{\text{зак}}$) ТВС.

Целью работы является получение наилучших топливно-экологических показателей двухтактного двигателя с ИЗ при НВТ и организации РТВЗ на основных эксплуатационных режимах работы.

Задачами настоящих исследований является экспериментальное определение рациональных углов опережения зажигания ($\theta_{\text{зак}}$) по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Анализ результатов исследований. Результаты экспериментальных исследований одноцилиндрового двухтактного двигателя ДН-4М (S/D=87/82) с ИЗ, кривошипно-камерной продувкой, воздушного охлаждения при использовании системы питания с НВТ получены на кафедре ДВС НТУ «ХПИ».

Поскольку зона основных эксплуатационных режимов работы двигателя находится в диапазоне частот вращения коленчатого вала при $n = 2000 \div 3000 \text{ мин}^{-1}$ и, двигатель может быть использован в качестве привода генератора для миниэлектростанции, а выработанная ею электроэнергия предполагается в частности использоваться в электросварочных агрегатах, где нагрузка изменяется в широком диапазоне от минимальных до максимальных значений, то исследования проводились по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$. Для

снижения себестоимости выработанной электроэнергии использовался более дешевый низкооктановый бензин А-80.

По предварительным экспериментальным исследованиям с точки зрения наименьшего расхода топлива и минимального количества выбросов ВВ в ОГ определено, что на режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ целесообразно устанавливать момент начала подачи топлива $\varphi_{\text{впр}} = 224 \text{ гр. пкв}$ после ВМТ [7]. При данном угле начала впрыскивания топлива исследования проводились с фиксированной установкой угла опережения зажигания $\theta_{\text{зак}} = 8, 10$ и 15 гр. пкв до ВМТ (рис. 1-3).

На режимах минимальных нагрузок до $P_e = 0,145 \text{ МПа}$ для определения наивыгоднейшего угла опережения зажигания с целью получения минимального расхода топлива в этом диапазоне нагрузок построены кривые g_e по линиям тренда при $\theta_{\text{зак}} = 8 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ и $\theta_{\text{зак}} = 10 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ (рис. 1). Более предпочтительный характер изменения кривой с минимальными значениями расхода топлива представляется при установке $\theta_{\text{зак}} = 8 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ.

В диапазоне частичных нагрузок от $P_e = 0,145 \text{ МПа}$ до $P_e = 0,2 \text{ МПа}$ с изменением $\theta_{\text{зак}}$ с 8 на 10 гр. пкв до ВМТ удельных эффективный расход топлива снижается до $g_e = 256 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. А при установке $\theta_{\text{зак}} = 15 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ расход топлива с уменьшением нагрузки в этом диапазоне нагрузок возрастает более, чем на 12 %. Характер изменения g_e в зависимости от установленных углов опережения зажигания ($\theta_{\text{зак}} = 8, 10$ и 15 гр. пкв до ВМТ) согласуется с изменением значений коэффициента избытка воздуха в цилиндре ($\alpha_{\text{цил}}$) двигателя. Так, при установке $\theta_{\text{зак}} = 8 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ значения $\alpha_{\text{цил}}$ с повышением нагрузки до $P_e = 0,2 \text{ МПа}$ увеличиваются до 1,8, при $\theta_{\text{зак}} = 10 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ до $\alpha_{\text{цил}} = 1,96$, а при $\theta_{\text{зак}} = 15 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ возрастают до $\alpha_{\text{цил}} = 1,62$ (рис. 1). Также более эффективное протекание процессов сгорания в этом диапазоне нагрузок наблюдается при $\theta_{\text{зак}} 10 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ, что подтверждается более низкой температурой ОГ ($t_{\text{ог}} = 266 \text{ }^\circ\text{C}$ при $P_e = 0,2 \text{ МПа}$) по отношению к установленным $\theta_{\text{зак}} = 8 \text{ гр. пкв}$ до ВМТ ($t_{\text{ог}} = 269 \text{ }^\circ\text{C}$ при

$P_e = 0,2$ МПа) и $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{ог}} = 276$ °С при $P_e = 0,2$ МПа). При этом с $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ ниже температура поверхности камеры сгорания ($t_{\text{кс}} = 155$ °С) по отношению к $\theta_{\text{зак}} = 8$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{кс}} = 159$ °С) и $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{кс}} = 168$ °С) (рис. 2). Также и меньше содержание СО и СН в ОГ при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ (0,02 % и до 15 ppm соответственно) по отношению к $\theta_{\text{зак}} = 8$ гр. пкв до ВМТ (СО = 0,03 %, СН = 30 ppm) и $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ (СО = 0,04 %, СН = 40 ppm) (рис. 3).

Таким образом, в диапазоне частичных нагрузок от $P_e = 0,145$ МПа до $P_e = 0,2$ МПа с точки зрения более эффективного протекания процессов сгорания РТВЗ, что характеризуется наименьшим расходом топлива и минимальным содержанием ВВ в ОГ целесообразно устанавливать момент начала подачи топлива $\varphi_{\text{впр}} = 224$ гр. пкв после ВМТ и значение угла опережения зажигания $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ.

В диапазоне частичных нагрузок от $P_e = 0,2$ МПа до $P_e = 0,28$ МПа минимальные значения расхода топлива также получены при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ, однако, с повышением нагрузки проявляются тенденции повышения как g_e , так и содержания СН в ОГ при постоянных значениях СО.

При этом с установкой $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ с повышением нагрузки до $P_e = 0,284$ МПа расход топлива резко снижается до $g_e = 259$ г/(кВт·ч) и становится меньшим по сравнению с установкой $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ. Дальнейшее повышение нагрузки при $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ до $P_e = 0,34$ МПа приводит к снижению g_e до 252 г/(кВт·ч), содержанию СО до 0,4 % и СН до 40 ppm в ОГ, что меньше, чем при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ ($g_e = 262$ г/(кВт·ч), СО = 0,5 % и СН = 45 ppm). Снижение расхода топлива и содержание ВВ в ОГ обусловлено более высокими значениями $\alpha_{\text{цил}} = 1,71$ ($\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ) по сравнению с $\alpha_{\text{цил}} = 1,62$ ($\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ).

Более высокие значения $\alpha_{\text{цил}}$ предопределили наиболее эффективное протекание процессов сгорания РТВЗ. Полученные данные согласуются с тепловыми потерями при различных углах

опережения зажигания. Так, практически при одинаковых значениях температур поверхностей камеры сгорания ($t_{\text{кс}} \sim 195$ °С) при различных углах опережения зажигания ($\theta_{\text{зак}} = 8, 10$ и 15 гр. пкв до ВМТ), что характеризуется соизмеримым уровнем тепловых потерь в стенку надпоршневого объема, температура ОГ при $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{ог}} = 311$ °С) ниже, чем при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{ог}} = 327$ °С) и при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ ($t_{\text{ог}} = 345$ °С).

В диапазоне повышенных нагрузок значения удельного эффективного расхода топлива и количество содержания ВВ в ОГ при $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ ниже, чем при $\theta_{\text{зак}} = 8$ и 10 гр. пкв до ВМТ, что объясняется благоприятным увеличением времени на протекание процессов смесеобразования и сгорания РТВЗ при увеличении цикловой подачи топлива. При этом, установка $\theta_{\text{зак}} = 15$ гр. пкв до ВМТ позволила повысить максимальную нагрузку на двигатель до $P_e = 0,476$ МПа, что на 10 % выше, чем при $\theta_{\text{зак}} = 10$ гр. пкв до ВМТ и на 12 % выше, чем при $\theta_{\text{зак}} = 8$ гр. пкв до ВМТ.

Необходимо отметить, что для получения наиболее лучших показателей по расходу топлива и выбросам ВВ в ОГ в диапазоне частичных нагрузок от $P_e = 0,2$ МПа до $P_e = 0,34$ МПа целесообразно устанавливать угол опережения зажигания между 10 и 15 гр. пкв до ВМТ. Предполагается, что установка угла опережения зажигания в интервале от 12 до 13 гр. пкв до ВМТ позволит получить расход топлива в этом диапазоне работы двигателя на уровне $g_e = 250$ г/(кВт·ч), о чем свидетельствует построенная усредненная по минимальным значениям расхода топлива (g_e) кривая. Также для получения наименьшего расхода топлива и выбросов ВВ в ОГ при изменении нагрузки построена усредненная кривая коэффициента избытка воздуха в цилиндре двигателя, максимальное значение в результате составляет $\alpha_{\text{цил}} = 1,98$ при $P_e = 0,22 \div 0,23$ МПа (рис. 1).

Общие выводы. На режимах нагрузочной характеристики при $n = 3000$ мин⁻¹ для получения наименьшего расхода топлива и минимальных выбросов ВВ в ОГ на двухтактном двигателе ДН-4М с искровым зажиганием при организации

Теплові двигуни

внутреннего смесеобразования и сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда целесообразно устанавливать момент начала подачи топлива $\varphi_{впр} = 224$ гр. п.к.в. после ВМТ при следующих углах опережения зажигания: на режимах минимальных

нагрузок до $P_e = 0,145$ МПа – $\theta_{зж} = 8$ гр. п.к.в. до ВМТ; в диапазоне частичных нагрузок при $P_e = 0,145 \div 0,2$ МПа – $\theta_{зж} = 10$ гр. п.к.в. до ВМТ; при $P_e = 0,2 \div 0,34$ МПа – $\theta_{зж} = 13$ гр. п.к.в. до ВМТ; при $P_e = 0,34 \div 0,476$ МПа – $\theta_{зж} = 15$ гр. п.к.в. до ВМТ.

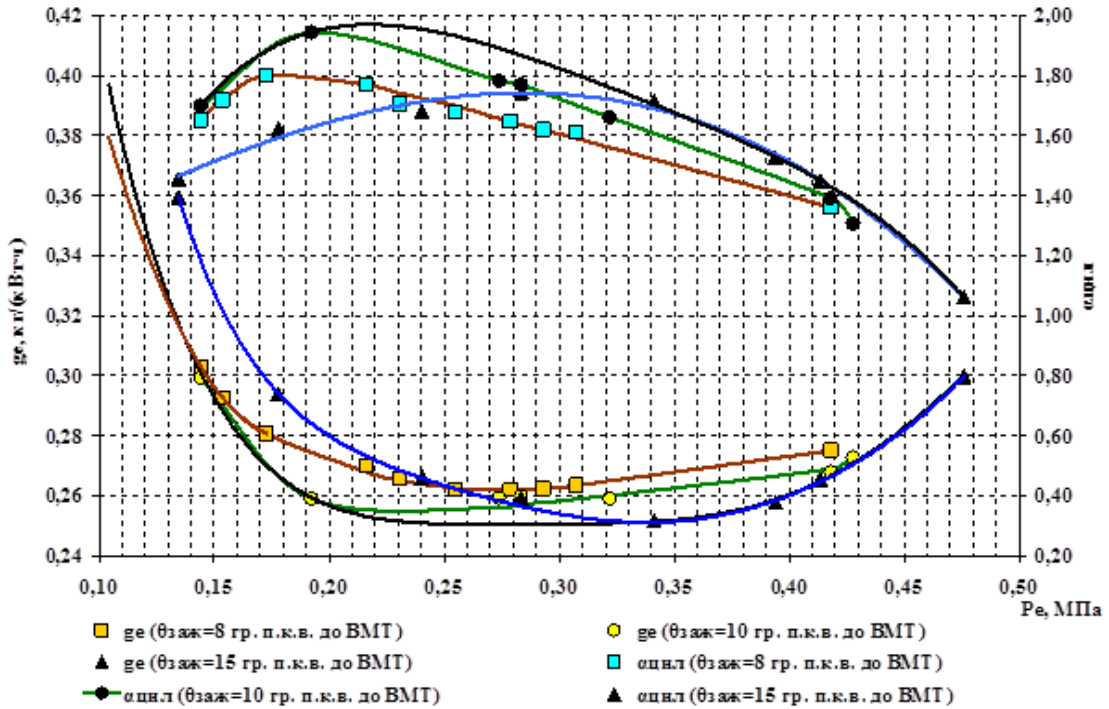


Рис. 1. Значения g_e и $\alpha_{цил}$ по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

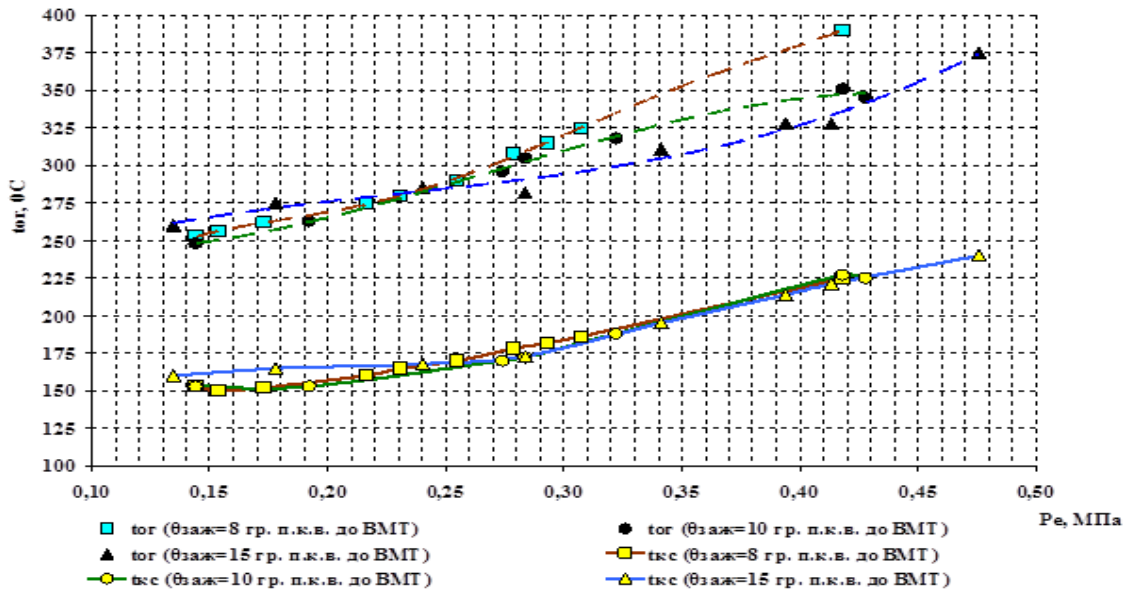


Рис. 2. Значения температур $t_{ог}$, $t_{кс}$ по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

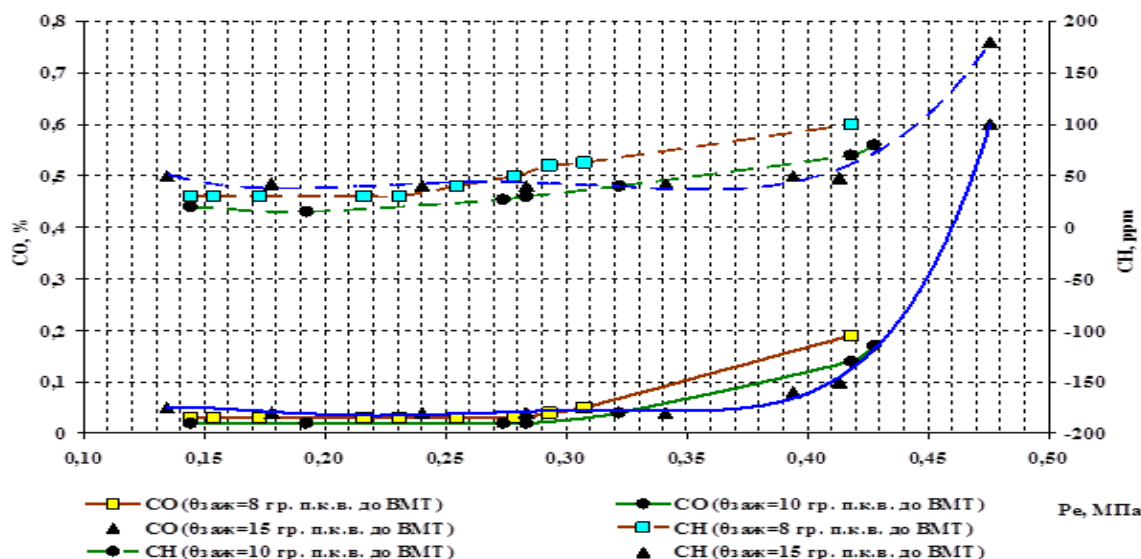


Рис. 3. Содержание CO и CH в ОГ по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Список использованных источников

1. Архангельский В.М. Автомобильные двигатели [Текст] / В.М. Архангельский, М.М. Вихерт, А.Н. Воинов [и др.] – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.
2. Eichlseder H. Grundlagen und Technologien des Ottomotors. [Текст] / H. Eichlseder, M. Klütting, W.F. Piock. *Der Fahrzeugantrieb Springer Wien New York*, 2008. – 264 p.
3. Ferguson Colin R. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences Second Edition.[Текст] /R. Ferguson Colin, T. Kirkpatrick Allan. *John Wiley & Sons. Inc.*, 2001. – 384 p.
4. Basshuysen R. Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial [Текст] / R.Basshuysen Aufl. *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2013. – 480 p.
5. 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.
6. Пат. 87733 С2, Україна, МПК7 F02B 17/00. Спосіб сумішоутворення камері згоряння двигуна внутрішнього згоряння з розшарування паливоповітряного заряду та ізпримусовим запалюванням при безпосередньому вприскуванні палива / [Корогодський В.А., Кирилюк І.О., Ломов С.Г.]; заявник і власник – Корогодський В.А., Кулігін В.І., Кирилюк І.О., Ломов С.Г. - №а200710939; заявл. 03.10.2007; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
7. 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.
8. Günter P. Merker. Grundlagen Verbrennungsmotoren Funktionsweise, Simulation, Messtechnik [Текст] / P. Günter Merker. *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2014. – 1132 p.
9. 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.
10. Ковылов Ю.Л. Теория рабочих процессов и моделирование процессов ДВС [Текст]: учеб. пособие / Ю.Л. Ковылов. – Самара: СГАУ, 2013. – 416 с.
11. Konrad Reif. Ottomotor-Management Steuerung, Regelung und Überwachung [Текст] / Reif Konrad. *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2014. – 466 p.

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

Теплові двигуни

Корогодский Владимир Анатольевич канд. техн. наук, доцент, кафедра теплотехники и тепловых двигателей. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта. Тел.:(057) 730-10-78. E-mail: korogodskiy@mail.ru

Стетенко Оксана Николаевна аспирант, кафедра теплотехники и тепловых двигателей. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта.

Tel.:(057) 730-10-78. E-mail: stetsenko.oksana@mail.ru

Обозный Сергей Владимирович научный сотрудник, кафедра двигателей внутреннего сгорания. Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт».

Korohodskiy Volodymyr Anatolyovych candidate of technical science, associate professor department of heating engineering and heat engines. Ukrainian State Academy 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 Academy of Railway Transport. Tel.:(057) 730-10-78. E-mail: stetsenko.oksana@mail.ru

Oboznyi Sergey Vladymyrovych research associate, department of internal combustion engines. National Technical University "KPI".