

ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХТАКТНОГО ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

Представлена оценка эффективных и экологических показателей двухтактного двигателя с карбюраторной системой питания и системой непосредственного впрыскивания топлива. Экспериментальные данные получены при рациональных регулировочных характеристиках топливной аппаратуры (давление впрыска топлива, начало подачи топлива) и близких к оптимальным значениям моменты подачи искры зажигания.

Введение и постановка проблемы

В настоящее время обоснованно повышены требования к двигателям внутреннего сгорания по снижению выбросов вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ), т.к. количество ДВС неуклонно растет, что предопределяет увеличение массы токсичных выбросов в атмосферу и загрязнение окружающей среды. Также наряду с ограничением ВВ с ОГ безусловно целесообразно с экономической точки зрения и ввиду сокращения природных углеводородных запасов снижение потребления топлива ДВС. Поэтому исследования по совершенствованию организации рабочих процессов в ДВС, способствующие повышению их топливно-экологических показателей, являются актуальными.

Применение непосредственного впрыска топлива (НВТ), особенно в двухтактных ДВС с искровым зажиганием (ИЗ), позволяет снизить расход топлива и сократить выбросы ВВ с ОГ. Однако, с одной стороны организация процессов внутреннего смесеобразования в общем подходе позволяет снизить расход топлива и выбросы ВВ с ОГ, с другой стороны наилучшая экономичность априори не соответствует максимальному снижению выбросов токсичных веществ. Поэтому, одной из основных проблем организации рабочих процессов в ДВС с ИЗ при НВТ является разработка эффективного рабочего процесса, который бы позволил максимально снизить расход топлива при минимально возможных выбросах ВВ с ОГ.

Анализ публикаций. Рабочий процесс CAI (Controlled Auto Ignition) или HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) в двухтактных ДВС при НВТ позволяет на установившихся режимах значительно снизить расход топлива и выбросы ВВ с ОГ. Однако сложность в создании и регулировании условий для воспламенения бензо-воздушной смеси от температуры регламентированного уровня на частичных режимах работы двигателя с изменением нагрузки препятствует массовому производству двигателей с этими рабочими процессами [1].

Применение фирмой Orbital Engine Co. непосредственного пневматического впрыскивания заранее подготовленной топливно-воздушной смеси в цилиндр ДВС с ИЗ позволяет организовать глубокое расслоение топливно-воздушного заряда (ТВЗ) с качественным, практически однородным составом смеси. Двигатель имеет низкий расход топлива и ограниченные выбросы ВВ в ОГ за счет наличия избытка воздуха в ТВЗ (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 2$) на частичных нагрузках. При своих достоинствах организации внутреннего смесеобразования и расслоенного сгорания эффективные показатели двигателя снижены в связи с затратами мощности на привод воздушного компрессора [2].

Фирмы VW, BMW, Audi, Mercedes-Benz для организации сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда (РТВЗ) на частичных нагрузках в головку цилиндра двухтактного двигателя установила гидравлическую насос-форсунку, которая впрыскивает топливо непосредственно в зону электродов свечи зажигания. Уровень экономических и экологических показателей двигателя ограничен из-за неравномерного распределения частиц топлива по объему топливно-воздушной смеси при сгорании [3, 4].

Организация внутреннего пленочного смесеобразования в двухтактном ДВС с ИЗ при НВТ позволила создать РТВЗ на частичных нагрузках с практически однородным обогащенным составом топливно-воздушной смеси ($\alpha=0,8\div 0,9$) при $\alpha_s=2$, что обеспечило интенсивное сгорание РТВЗ [5]. При такой организации РТВЗ топливно-экологические показатели двигателя ограничены обогащенным составом топливно-воздушной смеси.

Цель и задачи исследований. Целью настоящих исследований является определение факторов, позволяющих повысить топливно-экологические показатели двухтактного ДВС с ИЗ при использовании НВТ и организации пленочного смесеобразования с последующим сгоранием обедненного РТВЗ.

Для достижения поставленной цели решались задачи организации эффективного сгорания обедненного расслоенного ТВЗ, а также определения топливно-экологических показателей двухтактного ДВС с ИЗ при карбюраторной системе питания (внешнее смесеобразование) и при двух способах пленочного (внутреннего) смесеобразования с РТВЗ при НВТ и, соответственно, с обогащенным и обедненным составом топливно-воздушной смеси.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Топливо-экологические показатели получены путем экспериментального исследования одноцилиндрового двухтактного двигателя ДН-4 ($S/D=87/82$) с ИЗ, кривошипно-камерной продувкой и воздушным охлаждением. Исследования проводились на кафедре ДВС НТУ «ХПИ». Для сравнения на (рис. 1-3) представлены эффективные и экологические показатели двигателя с карбюраторной системой питания и системой НВТ при работе на режимах нагрузочной характеристики при $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ и использовании бензина А-80.

С карбюраторной системой питания на двигатель устанавливалась базовая головка цилиндра с полуразделенной симметричной камерой сгорания (КС) ($\epsilon_{\text{геом}}=8,4$), а с системой НВТ – модернизированная головка цилиндра с полуразделенной КС, смещенной к выпускному окну ($\epsilon_{\text{геом}}=12$) [6].

При работе двигателя с системой НВТ устанавливались рациональные регулировочные харак-

теристики топливной аппаратуры (давление впрыска топлива ($P_{\text{впр}}=1,8 \text{ МПа}$), начало момента подачи топлива) и близкие к оптимальным значениям углы опережения зажигания в зависимости от нагрузки, определенные с учетом возможности достижения минимальных значений удельного эффективного расхода топлива (g_e).

Особенность организации РТВЗ при НВТ заключается в обеспечении обогащенного состава топливно-воздушной смеси между электродами свечи зажигания [7].

В диапазоне нагрузок от $P_e = 0,149 \text{ МПа}$ до $P_e = 0,293 \text{ МПа}$ момент начала подачи топлива $\varphi_{\text{впр}} = 224$ град. п.к.в. после ВМТ, с повышением нагрузки до $P_e = 0,471 \text{ МПа}$ начало подачи топлива смещалось ближе к НМТ ($\varphi_{\text{впр}} = 205$ град. п.к.в. после ВМТ). При этом в диапазоне нагрузок от $P_e=0,149 \text{ МПа}$ до $P_e=0,225 \text{ МПа}$ угол опережения зажигания $\theta_{\text{зак}} = 8$ град. п.к.в. до ВМТ, с повышением нагрузки до $P_e = 0,293 \text{ МПа}$ $\theta_{\text{зак}} = 10$ град. п.к.в. до ВМТ и при максимальных нагрузках $\theta_{\text{зак}} = 27$ град. п.к.в. до ВМТ.

При организации данного способа РТВЗ с системой НВТ позволило, по сравнению с карбюраторной системой питания, при минимальных нагрузках снизить g_e в среднем в 2 раза, а с повышением нагрузки до максимальных значений – в 1,7 раза (рис. 1).

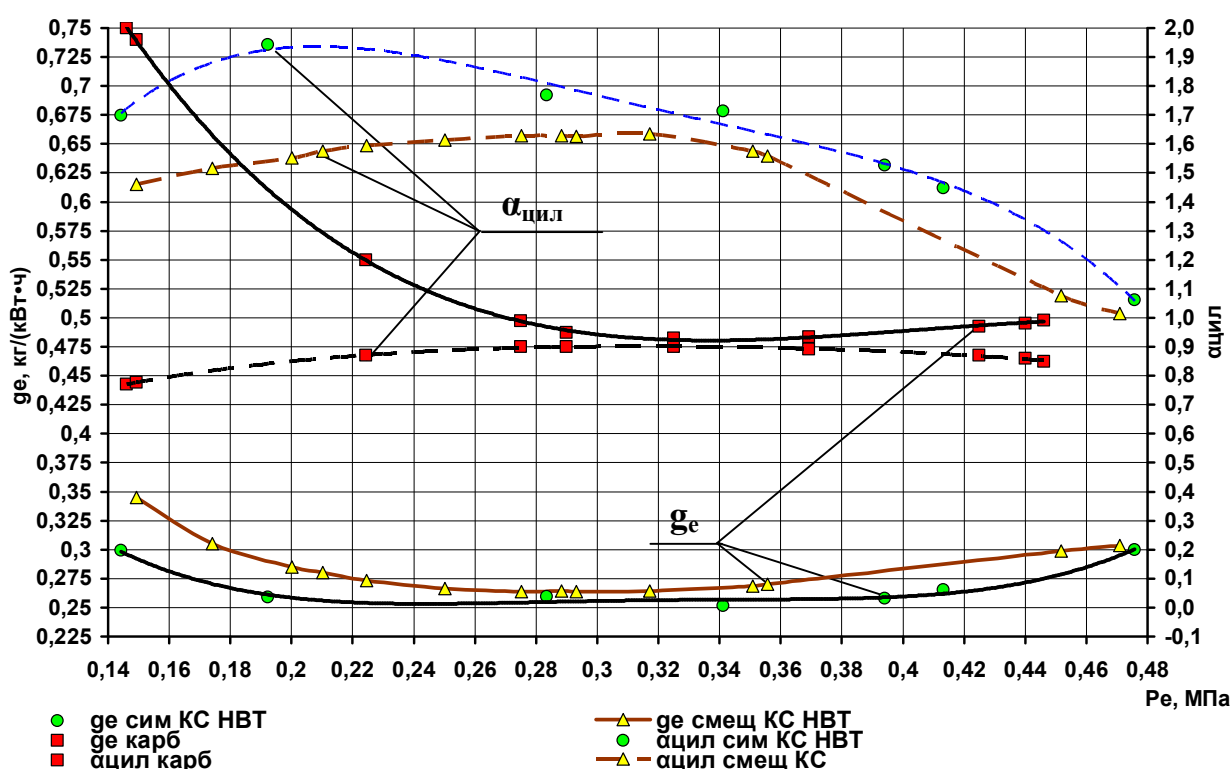


Рис. 1. Значения g_e и $\alpha_{\text{цил}}$ двигателя с карбюраторной системой питания, и при НВТ с обогащенным и обедненным РТВЗ

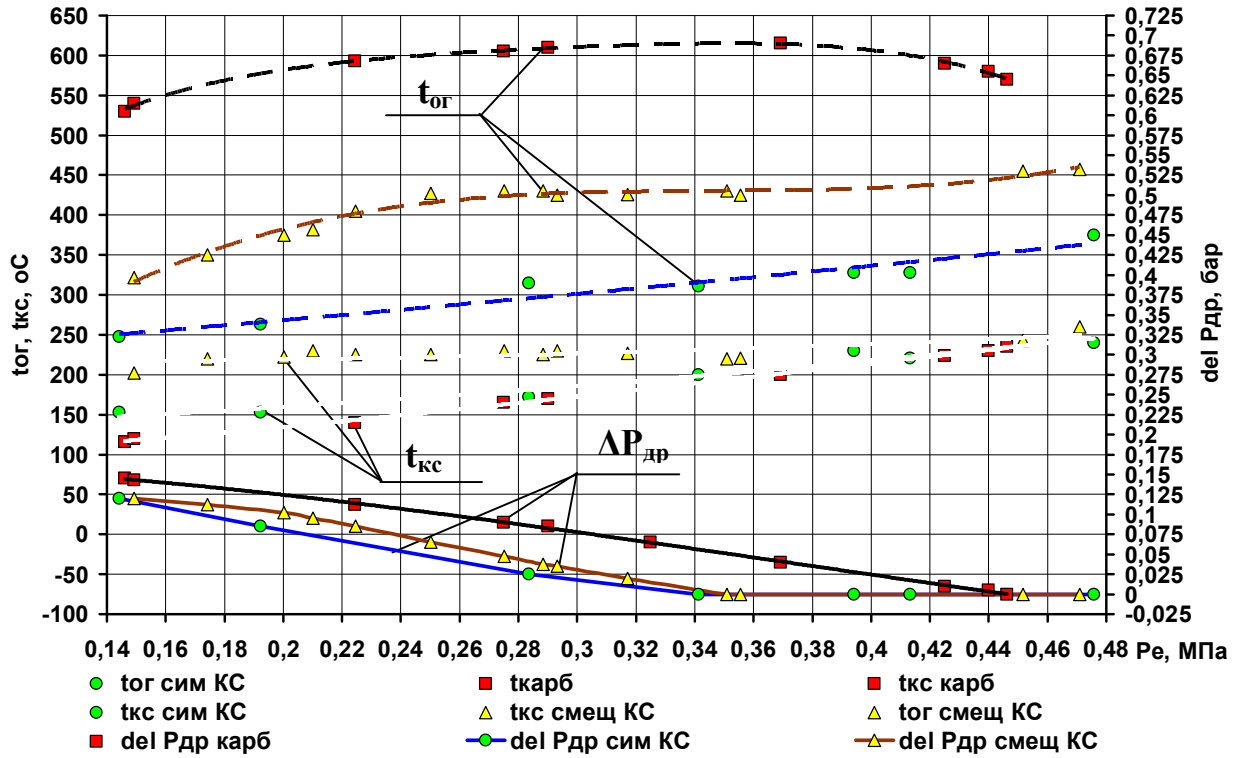


Рис. 2. Значения температур t_{or} , $t_{кс}$ и разрежения на впуске $\Delta P_{др}$ при изменении нагрузки

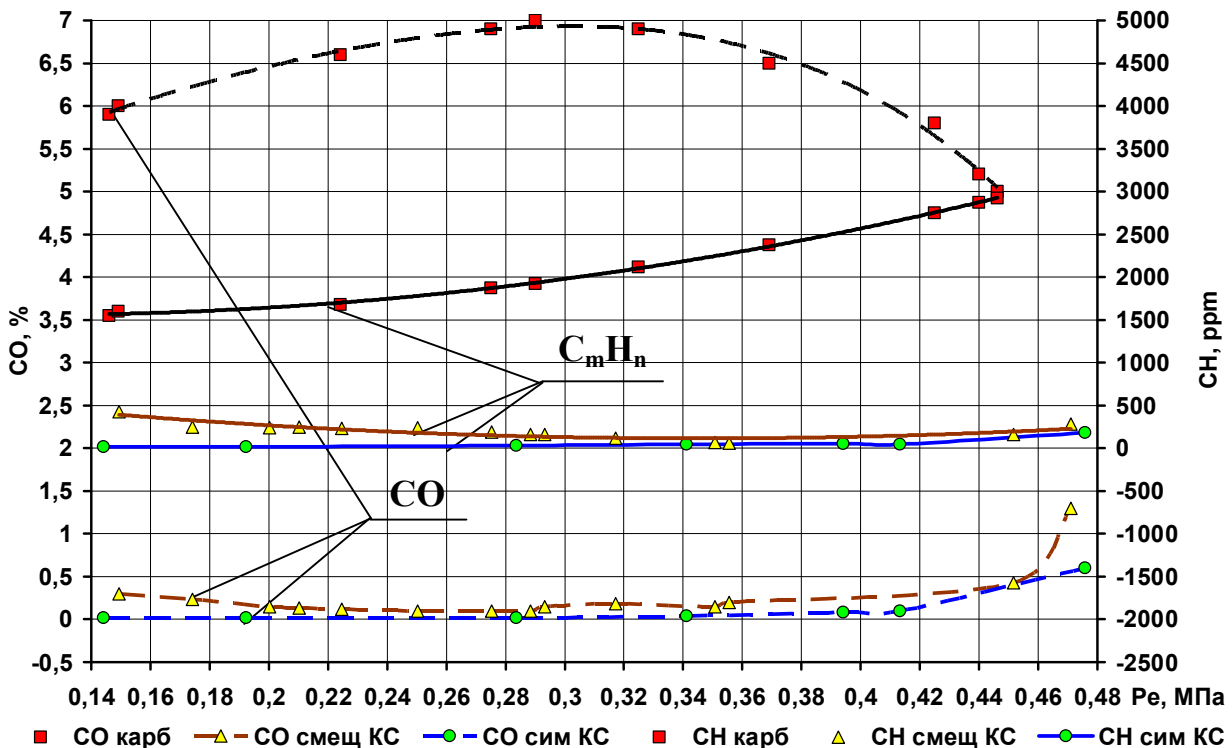


Рис. 3. Содержание CO и C_mH_n в ОГ при изменении нагрузки

Повышение средних значений коэффициента избытка воздуха в цилиндре (до $\alpha_{цил.ср}=1,63$) при минимальных значениях g_e по сравнению с карбюраторной системой питания, где $\alpha=0,9$ способствовало также сокращению выбросов ВВ с ОГ. При

этом, содержание CO в ОГ снижено с 7 % до 0,1 %, а C_mH_n в среднем с 2000 ppm до 200 ppm ($P_e=0,29$ МПа) (рис. 3). Снижение g_e двухтактного двигателя при НВТ по отношению к карбюраторной системе питания согласуется со снижением температуры

ОГ в среднем с 600 °С до 420 °С ($P_e=0,22\div 0,4$ МПа) и повышением температуры поверхности КС в среднем до $t_{кc}=220$ °С, тогда как у карбюраторного ДВС в этом интервале нагрузок $t_{кc}=120\div 210$ °С.

Потенциальные возможности повышения топливно-экологических показателей двухтактного двигателя с РТВЗ имеются при организации сгорания более обедненной топливно-воздушной смеси. С этой целью разработан новый рабочий процесс [8], который позволил более эффективно работать двигателю с искровым зажиганием.

Топливная форсунка также расположена в стенке цилиндра, однако топливная струя с полостью внутри направлена на поверхности симметричной КС. Это позволило на такте сжатия направить с периферии к электродам свечи зажигания практически равномерно по окружности топливную смесь навстречу фронту распространения пламени. Интенсивная турбулизация ТВЗ и избыточный подвод воздуха в зону горения позволяет расширить пределы эффективного сгорания топливно-воздушной смеси обедненного состава (рис. 4).

В сравнении рабочего процесса с НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС новый рабочий процесс с НВТ в симметричную КС позволил повысить степень сжатия до $\epsilon_{геом}=16,3$. В результате экспериментальных исследований установлены рациональные (обеспечивающие минимум g_e) регулировочные характеристики топливной аппаратуры: $P_{впр}=3,2$ МПа и $\phi_{впр} = 224$ град. п.к.в. после ВМТ по всей нагрузочной характеристике при $n=3000$ мин⁻¹. Угол опережения зажигания от минимальных до средних нагрузок $\theta_{зж} = 10$ град. п.к.в. до ВМТ и при максимальных нагрузках $\theta_{зж} = 15$ град. п.к.в. до ВМТ.

При НВТ в симметричную полуразделенную КС в диапазоне минимальных нагрузок ($P_e=0,144\div 0,192$ МПа) получено максимальное значение коэффициента избытка воздуха в цилиндре $\alpha_{цил} = 1,94$ по отношению к НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС, где $\alpha_{цил}=1,55$, $P_e=0,192$ МПа. При этом расход топлива снижен до 20 %. С повышением нагрузки до $P_e=0,341$ МПа $\alpha_{цил}$ снизился до 1,71, где минимальный расход топлива составил $g_e=0,252$ кг/(кВт·ч), что на 5 % меньше, чем при НВТ в смещенную к выпускному окну полуразделенную КС ($\alpha_{цил}=1,6$). В основном интервале максимальных нагрузок значения коэффициента избытка воздуха в цилиндре при обеих организациях рабочих процессов снижаются качественно одинаково, с разницей примерно 10 %, расход топлива также в среднем снижен на 10 %. Избыток воздуха при НВТ в симметричную полуразделенную КС позволяет сжечь

большее количество топлива и повысить значения максимальной нагрузки до $P_e=0,476$ МПа ($\alpha_{цил}=1,06$). Более высокие значения $\alpha_{цил}$ получены при значениях разрежения на впуске на частичных нагрузках. Повышение эффективности использования топлива при новом рабочем процессе согласуется со снижением $t_{ог}$ на 100÷150 °С и $t_{кc}$ до 30 °С на минимальных нагрузках.

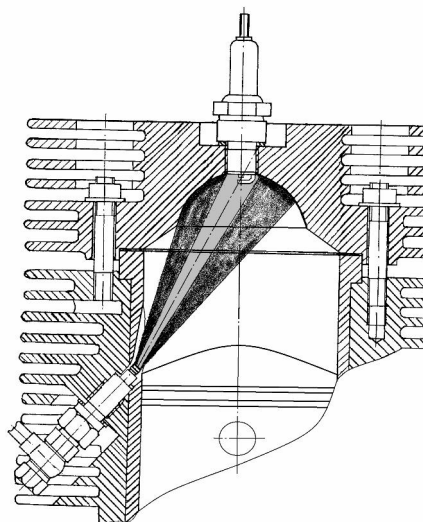


Рис. 4. НВТ в симметричную полуразделенную КС

Повышение коэффициента избытка воздуха позволило сократить содержание СО в ОГ в диапазоне нагрузок $P_e=0,144\div 0,341$ МПа до 0,02÷0,04 %, т.е. в среднем в 10 раз. В области максимальных нагрузок ($P_e=0,476$ МПа) содержание СО в ОГ возрастает до 0,6 %

Улучшение условий сгорания с избытком воздуха также позволило сократить содержание C_mH_n в ОГ до 15÷20 ppm (в среднем в 100 раз) на частичных нагрузках. Максимальное содержание несгоревших углеводородов в ОГ (180 ppm) зарегистрировано на режиме максимальной мощности.

Выводы. Разработка нового рабочего процесса с РТВЗ позволила дополнительно повысить топливно-экологические показатели двухтактного двигателя ДН-4 с искровым зажиганием. Удельный эффективный расход топлива в диапазоне от минимальной до средней нагрузки ($P_e=0,144\div 0,341$ МПа) снижен по сравнению с РТВЗ и обогащенным составом топливно-воздушной смеси на 20 %, в свою очередь по сравнению с карбюраторной системой питания более, чем в 2 раза. Снижение расхода топлива в диапазоне максимальных нагрузок по сравнению с РТВЗ и обогащенным составом смеси составило в среднем 10 % и по сравнению с карбюраторной системой питания в 1,7÷1,9 раза. Работа двигателя на более обедненном РТВЗ со-

кратила содержание СО в ОГ в среднем в 10 раз, а содержание C_mH_n в среднем в 100 раз. Уровень выбросов токсичных веществ позволяет выполнить современные требования без применения трехкомпонентного нейтрализатора отработавших газов.

Дальнейшие исследования по влиянию концентрации топливно-воздушной смеси в РТВЗ в новом рабочем процессе позволяют оценить как экономические, так и мощностные показатели двигателя на установившихся режимах.

Список литературы:

1. Zhao H. *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry* / Edited by Zhao Hua. – Cambridge: CRC Press, 2007. – 557 p. 2. Илей Л.В. Новый двухтактный двигатель «Orbital» / Л.В. Илей // *Автомобильная промышленность США*. – 1986. – №7. – С. 5-8. 3. Zhao H. *Advanced Direct Combustion Engine Technologies and Development. Volume 1: Gasoline and gas engines* / Edited by Zhao Hua. – Oxford: CRC Press, 2010. – 325 p. 4. Merker G. *Combustion Engines Development* / G. Merker, C. Schwarz, R. Teichmann. – Berlin: Springer, 2009. – 699 p. 5. Корогодский В.А. Организация пленочного смесеобразования и определение степени расслоения заряда в двигателе с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием топлива / В.А. Корогодский, С.В. Обозный // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2003. – №1-2. – С. 41-48. 6. Корогодский В.А. Организация рационального способа регулирования мощности в двигателе с искровым зажиганием // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2013. – №1. – С. 11-16. 7. Пат. 60614А України, МКІ F02B 17/00. Двигун внутрішнього згорання / В.А. Корогодський, С.В. Обозний (UA).

№2003010308; Заявл. 14.01.2003; Опубл. 15.10.2003, Бюл. №10. – 4 с. 8. Пат. PCT/IB 2007/004105, МКІ F02B 23/10. *A Method of Mixing in a Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine and a Spark-Ignition Direct-Injection Stratified Fuel-Air Charge Internal Combustion Engine*: Пат. PCT/IB 2007/004105, МКІ F02B 23/10 Korohodskiy V.A. (UA), Kyrylyuk I.O. (UA), Lomov S.G. (UA); Kulygin V.I. (UA) / № WO 2009/044225 A1; Заявл. 03.10.2007; Опубл. 09.04.2009. – 45 с.

Bibliography (transliterated):

1. Zhao H. *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry* / Edited by Zhao Hua. – Cambridge: CRC Press, 2007. – 557 p. 2. Iley L.V. *Novyj dvuhaktnyj dvigatel' «Orbital»* / L.V. Iley // *Avtomobil'naja promyshlennost' SShA*. – 1986. – №7. – S. 5-8. 3. Zhao H. *Advanced Direct Combustion Engine Technologies and Development. Volume 1: Gasoline and gas engines* / Edited by Zhao Hua. – Oxford: CRC Press, 2010. – 325 p. 4. Merker G. *Combustion Engines Development* / G. Merker, C. Schwarz, R. Teichmann. – Berlin: Springer, 2009. – 699 p. 5. Korogodskij V.A. *Organizacija plenocnogo smeseobrazovanija i opredelenie stepeni rassloenija zarjada v dvigatele s iskrovym zazhiganiem i neposredstvennym vpryskivaniem topliva* / V.A. Korogodskij, S.V. Oboznij // *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. – 2003. – №1-2. – S. 41-48. 6. Korogodskij V.A. *Organizacija racional'nogo sposoba regulirovanija moshhnosti v dvigatele s iskrovym zazhiganiem* // *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. – 2013. – №1. – S. 3-8. 7. Pat. 60614A Ukraïni, MKI F02B 17/00. *Dvigun vnutrishn'ogo zgorjannja* / V.A. Korogodskij, S.V. Oboznij (UA). – №2003010308; Zajavl. 14.01.2003; Opubl. 15.10.2003, Bjul. №10. – 4 s. 8. Pat. PCT/IB 2007/004105, MKI F02B 23/10. *A Method of Mixing in a Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine and a Spark-Ignition Direct-Injection Stratified Fuel-Air Charge Internal Combustion Engine*: Pat. PCT/IB 2007/004105, MKI F02B 23/10 Korohodskiy V.A. (UA), Kyrylyuk I.O. (UA), Lomov S.G. (UA); Kulygin V.I. (UA) / № WO 2009/044225 A1; Zajavl. 03.10.2007; Opubl. 09.04.2009. – 45 s.

Поступила в редакцию 07.06.2013

Корогодский Владимир Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, преподаватель кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, Харьков, Украина, e-mail: korogodskiy@mail.ru

ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДВОТАКТНОГО ДВЗ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВНУТРІШНЬОГО СУМІШОУТВОРЕННЯ

В.А. Корогодський

Представлена оцінка ефективних та екологічних показників двотактного двигуна з карбюраторною системою живлення й системою безпосереднього впрыскування палива. Експериментальні дані отримані при раціональних регульованих характеристиках паливної апаратури (тиск впрыскування палива, початок подачі палива) і близьких до оптимальних значень моменти подання іскри запалювання.

IMPROVEMENT FUEL EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A TWO-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH SPARK-IGNITION ENGINES BY IMPROVING THE PROCESSES OF INTERNAL MIXING

V.A. Korohodskiy

The estimation of effective and environmental performance indices of two-stroke engine with a carburetor system and power supply system of direct injection fuel is offered. The experimental data obtained by adjusting the optimal characteristics of fuel system (fuel injection pressure, the start of the fuel delivery process), and close to the optimal values of the time of starting the spark plug.