

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАССЛОЕНИЕМ ЗАРЯДА В ЦИЛИНДРЕ

И.В. Кузнецов, А.М. Сычев

Предложен новый процесс сгорания расслоенного заряда для двигателя с принудительным воспламенением горючей смеси. Проведены сравнительные исследования выделенного цилиндра, работающего при стандартном процессе и процессе с расслоением заряда, которые показали, что при процессе с расслоением заряда улучшается топливная экономичность более чем на 10%, и снижается содержание оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в отработавших газах на 40–50%.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, расслоение заряда, моторный стенд, выделенный цилиндр, вихревое движение, экономичность, отработавшие газы, оксид углерода, углеводороды, оксиды азота.

Введение

Улучшение топливной экономичности при снижении содержания вредных веществ в отработавших газах (ОГ) является одним из основных направлений совершенствования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с принудительным воспламенением смеси. Для выполнения перспективных требований к выбросам вредных веществ с ОГ зачастую недостаточно модернизировать имеющиеся конструкции ДВС, необходима принципиально новая организация рабочего процесса, которая позволит эффективно сжигать в цилиндре ДВС обедненные топливовоздушные смеси. Сжигание этих смесей в цилиндре ДВС можно осуществлять путем расслоения заряда в цилиндре. В этом случае в области свечи зажигания образуется зона с обогащенной смесью, в то время как остальная часть объема цилиндра заполняется обедненной смесью. Обогащенная смесь легко воспламеняется свечой зажигания и сгорает, а продукты ее сгорания, имеющие высокую температуру, будут догорать в воздухе [1]. Такой организа-

ции рабочего процесса будет способствовать интенсивное движение заряда в цилиндре при условии малого перемешивания заряда в процессе смесеобразования и сгорания. Основными достоинствами подобного процесса являются улучшение топливной экономичности и снижение выбросов токсических веществ с отработавшими газами.

Расслоение заряда используется в серийно выпускающихся двигателях фирм Mitsubishi (Япония), Nissan (Япония), Toyota (Япония), Volkswagen (Германия) [2]. Работы по созданию двигателя с возможностью работы на расслоенном заряде ведутся в ЗМЗ* и НАМИ** [3]. Особенностью конструкции упомянутых выше двигателей является сосредоточение обогащенной смеси в центре камеры сгорания, что ведет к повышению уровня выбросов углеводородов вследствие низких температур на периферии цилиндра ДВС, где сгорает обедненная смесь. В России исследования двигателей с образованием расслоенного заряда проводятся путем применения дополнительных технических

* ЗМЗ - Заволжский моторный завод

** НАМИ - Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт

средств [4, 5]. За рубежом расслоение заряда исследуется как неотъемлемый элемент рабочего процесса двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина [6, 7].

Цель работы – улучшение топливной экономичности при снижении выбросов вредных веществ с ОГ путем расслоения заряда в цилиндре ДВС с принудительным воспламенением горючей смеси.

В соответствии с поставленной целью были исследованы процессы смесеобразования и сгорания, при которых наряду с высокой турбулентностью заряда в цилиндре ДВС сохраняется его расслоение в камере сгорания. Для проведения исследований были разработаны и изготовлены опытные образцы головки цилиндра и впускной трубы для выделенного цилиндра, в котором могут быть реализованы предложенные процессы смесеобразования и сгорания.

Процессы смесеобразования и сгорания

Процессы смесеобразования и сгорания должны обеспечить расслоение заряда при его интенсивном направленном вихревом движении в цилиндре ДВС к моменту зажигания. При этом обогащенная смесь должна быть образована вблизи стенок камеры сгорания, а воздух или обедненная смесь – сосредоточены в центре образованного вихря (рис. 1).

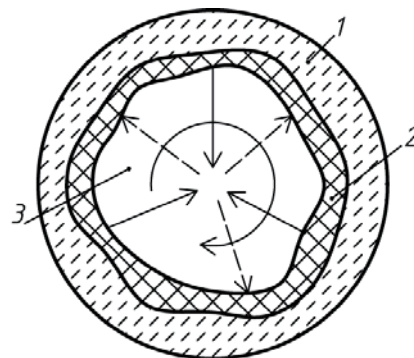


Рис. 1. Особенности процесса сгорания расслоенного заряда:

1 – обогащенная смесь; 2 – зона горения; 3 – воздух; → – движение продуктов сгорания из зоны горения; --→ – движение воздуха в зону горения

Предположим, что горение обогащенной смеси будет происходить в кольцевой зоне вблизи стенок камеры сгорания (КС), в которой коэффициент избытка воздуха $\alpha = 0,9...1,0$. Горячие продукты сгорания, имеющие меньшую по сравнению с воздухом плотность, будут отводиться из зоны горения к оси образованного вихря и, нагревая воздух, вытеснять его в зону горения, куда будет поступать нагретая обогащенная смесь с периферии вихря (от стенок КС). Таким образом, процесс сгорания позволит отвести продукты сгорания из зоны горения, что улучшит полноту сгорания смеси и снизит образование вредных веществ.

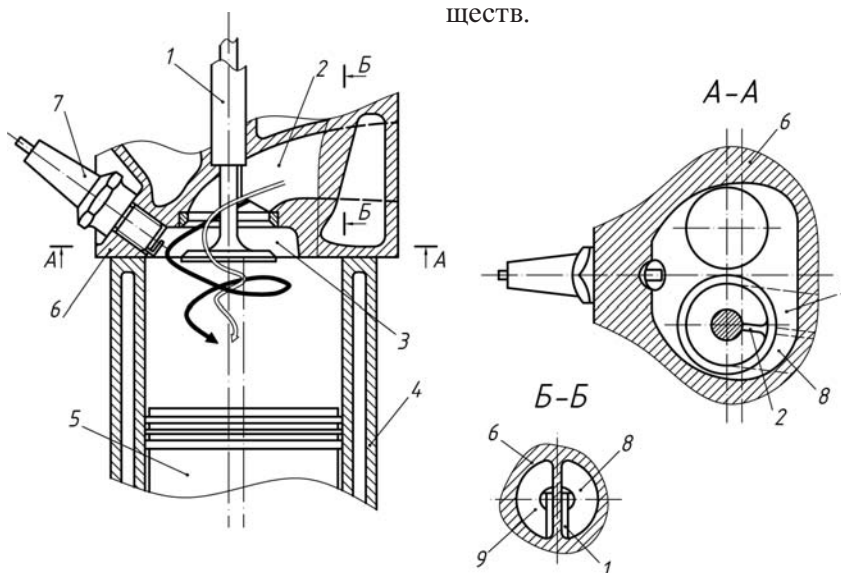


Рис. 2. Схема ДВС с тангенциальным подводом расслоенного заряда в цилиндр:

1 – впускной клапан; 2 – перегородка; 3 – камера сгорания; 4 – цилиндр; 5 – поршень; 6 – головка цилиндра; 7 – свеча зажигания; 8 – канал для подачи обогащенной смеси; 9 – канал для подачи обедненной смеси

Для реализации предложенного рабочего процесса было решено использовать тангенциальный подвод в цилиндр расслоенного заряда. Схема ДВС, в котором может быть реализована подобная организация смесеобразования и сгорания, представлена на рис. 2.

Двигатель имеет цилиндр с поршнем и головкой, в которой размещена камера сгорания со свечой зажигания. Впускной патрубок, размещенный в головке и разделенный при помощи перегородки на два тангенциальных канала, снабжен впускным клапаном и предназначен для подвода в цилиндр свежего заряда. Канал 8 соединен с устройством для образования обогащенной смеси, а канал 9 – с устройством для дозирования воздуха.

Заряд, состоящий из обогащенной смеси и воздуха, поступает в цилиндр по каналам. Обогащенная смесь направляется к стенке цилиндра, а воздух – к оси цилиндра. В результате впуска и сжатия в КС образуется вихревое движение заряда с неравномерным распределением топлива. Обогащенная смесь сосредотачивается вблизи стенок КС, а воздух – в ее центре. Воспламенение обогащенной смеси осуществляется свечой зажигания.

Объектами исследования являлись головки цилиндра, одна из которых от стандартного ДВС была предназначена для подвода в цилиндр гомогенного заряда, а другая экспериментальная для подвода расслоенного заряда. Экспериментальную головку цилиндра собирали из двух частей, в каждой из которых были выполнены полость впускного и полость выпускного каналов, а также полости систем смазки и охлаждения (рис. 3).

Половинки головки были соединены, и в нее были установлены впускной и выпускной клапаны, а также перегородка во впускном канале, конструктивная схема которого приведена на рис. 4.

На рис. 5 показаны головки цилиндра, которые исследовали на моторном стенде.

Экспериментальная установка

Исследования проводили на экспериментальной установке с выделенным цилиндром, изготовленной на базе полноразмерного четырехцилиндрового ДВС УМЗ-414 (рис. 6).

Три цилиндра двигателя являлись вспомогательными и работали при фиксированном, специально подобранном положении

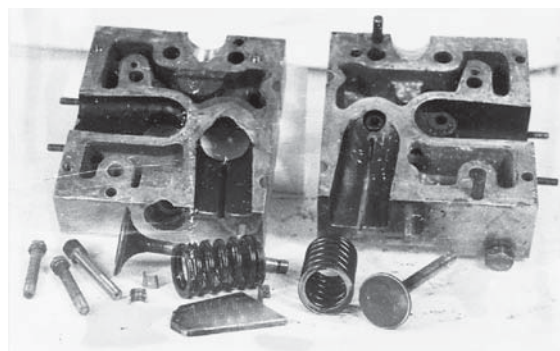


Рис. 3. Экспериментальная головка цилиндра

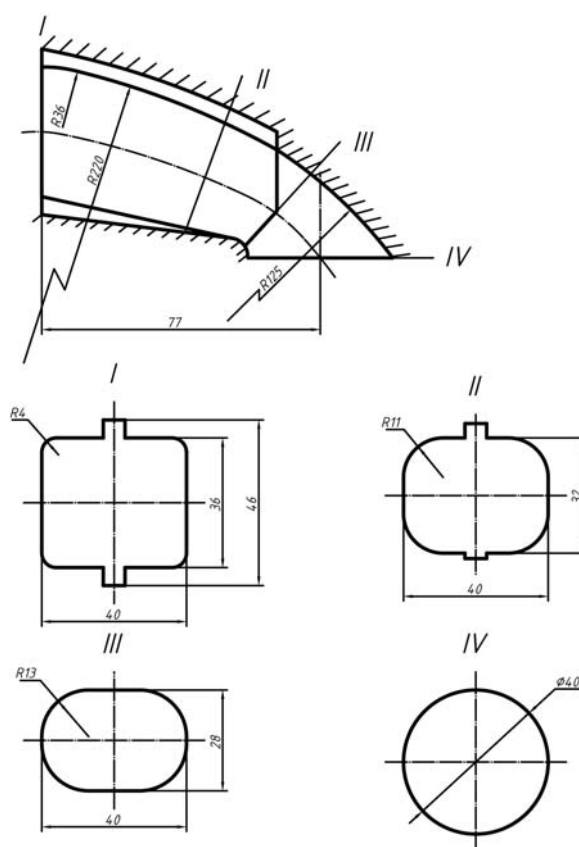


Рис. 4. Конструктивная схема впускного канала

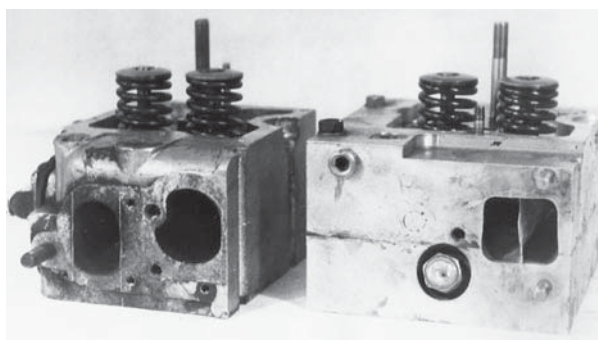


Рис. 5. Головки выделенного цилиндра

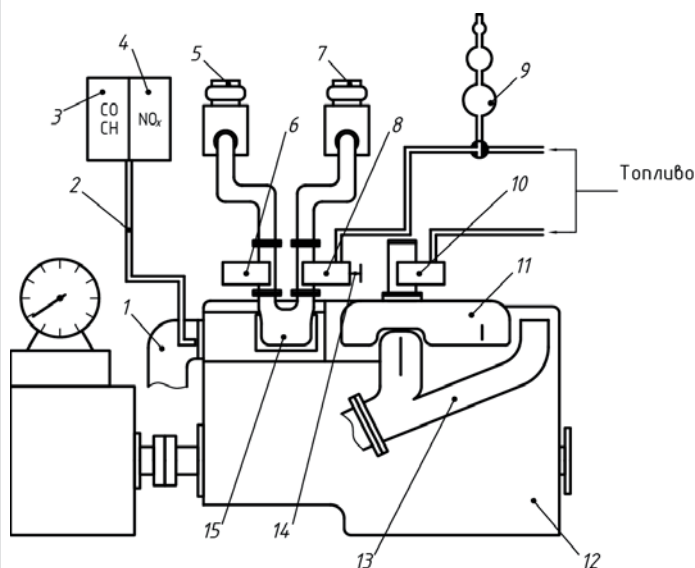


Рис. 6. Схема экспериментальной установки:

1 – выпускная труба выделенного цилиндра;
2 – магистраль подвода ОГ на газоанализаторы;
3 – газоанализатор CO и CH; 4 – газоанализатор NO_x ; 5, 7 – счетчики расхода воздуха; 6 – карбюратор для дозирования воздуха в выделенный цилиндр; 8 – карбюратор для дозирования смеси в выделенный цилиндр; 9 – штихпробер; 10 – карбюратор вспомогательных цилиндров; 11 – впускная труба вспомогательных цилиндров; 12 – двигатель; 13 – выпускная труба вспомогательных цилиндров; 14 – регулировочная игла; 15 – впускная труба выделенного цилиндра.

дроссельной заслонки карбюратора и углах опережения зажигания θ , рекомендованных заводом-изготовителем. Питание трех вспомогательных цилиндров осуществлялось через общую впускную трубу, подсоединенную к карбюратору К-126. Выпуск ОГ трех вспомогательных цилиндров осуществлялся в общую выпускную трубу.

В систему питания выделенного цилиндра входит сдвоенная впускная труба 15, которая соединена с двумя карбюраторами К-127 6 и 8 (рис. 7).

Карбюраторы подсоединяли к расходомерам 5 и 7, в качестве которых использовали счетчики РГ-40. Карбюратор 8, предназначенный для подвода в выделенный цилиндр топливовоздушной смеси, подсоединяли к штихпроберу. Расход подаваемого топлива изменяли регулировочной иглой. Карбюратор 6 дозировал в выделенный цилиндр чистый воздух. Выпускная труба выделенного цилиндра снабжалась зондом для отбора проб ОГ, соединенным через

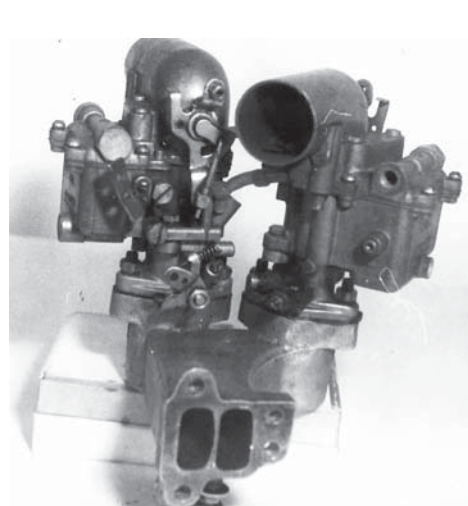


Рис. 7. Впускная труба и карбюраторы для подвода в выделенный цилиндр расслоенного заряда

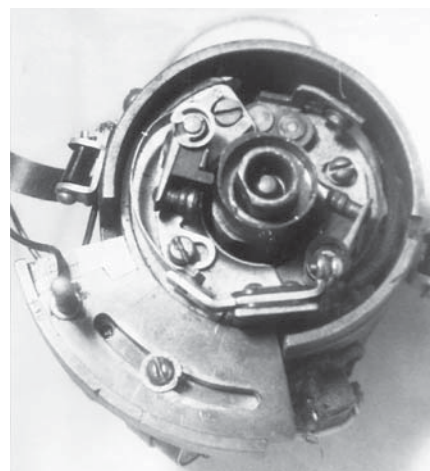


Рис. 8. Экспериментальный распределитель зажигания

магистраль с газоанализаторами. Содержание CO и CH измеряли газоанализатором «Бекман-590», содержание NO_x – газоанализатором «Бекман-951».

Технические характеристики выделенного цилиндра:

Диаметр цилиндра, м	$92 \cdot 10^{-3}$
Ход поршня, м	$92 \cdot 10^{-3}$
Тип камеры сгорания	Плоскоовальная
Степень сжатия	6,8
Свеча зажигания	A-11
Бензин	АИ-80

Двигатель был снабжен экспериментальным распределителем зажигания с двумя кулачковыми шайбами (рис. 8). Угол опережения зажигания в выделенном цилиндре можно было регулировать независимо от угла опережения

зажигания во вспомогательных цилиндрах и измерять с помощью стробоскопа СТ-5 (рис. 9).

Мощностные и экономические показатели выделенного цилиндра определяли методом отключения в нем зажигания [8]. Для определения индикаторной мощности выделенного цилиндра получали эффективную мощность при работе четырех цилиндров N_{e4} , а затем ключом отключали зажигание в выделенном цилиндре, выводили двигатель на тот же скоростной режим и измеряли эффективную мощность при работе на трех вспомогательных цилиндрах N_{e3} . Таким образом, индикаторную мощность выделенного цилиндра определяли по формуле

$$N_i = N_{e4} - N_{e3}.$$

Топливная экономичность характеризуется удельным индикаторным расходом топлива, определяемым по формуле

$$g_i = \frac{G_T}{N_i},$$

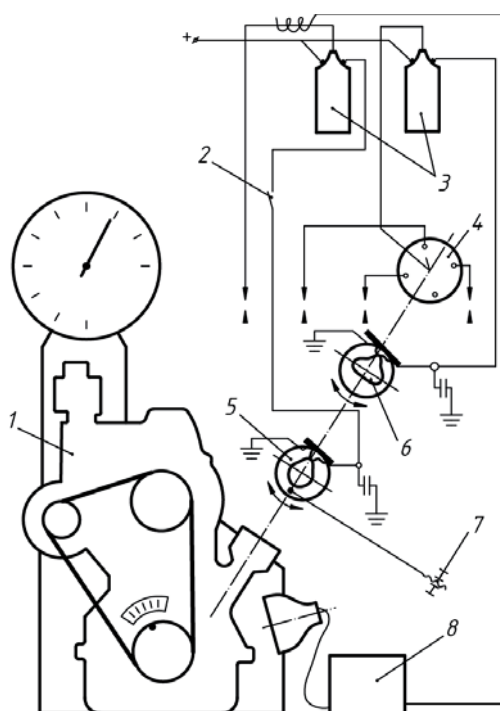


Рис. 9. Схема системы зажигания в экспериментальной установке:

1 – двигатель; 2 – ключ отключения зажигания в выделенном цилиндре; 3 – катушки; 4 – прерыватель; 5 – кулачковая шайба выделенного цилиндра; 6 – кулачковая шайба вспомогательных цилиндров; 7 – регулятор угла опережения зажигания в выделенном цилиндре; 8 – стробоскоп

где G_T – расход топлива, поступающего в выделенный цилиндр, кг/ч.

Программа проведения исследований предусматривала получение регулировочных характеристик по составу смеси при различных значениях коэффициента наполнения, определяемых по формуле

$$\eta_v = \frac{G_{b\Sigma}}{30\rho_b V_h n},$$

где ρ_b – плотность воздуха, поступающего в цилиндр, кг/м³; V_h – рабочий объем выделенного цилиндра, м³; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; $G_{b\Sigma}$ – суммарный расход воздуха через выделенный цилиндр (в кг/ч), определяемый по формуле

$$G_{b\Sigma} = G_{b1} + G_{b2};$$

G_{b1} , G_{b2} – расходы воздуха через смесевой и воздушный каналы, кг/ч.

Коэффициент избытка воздуха в заряде, поступающем в выделенный цилиндр, определяли по формуле

$$\alpha = \frac{G_{b\Sigma}}{G_T l_0},$$

где l_0 – стехиометрическое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива.

Коэффициент расслоения заряда вычисляли по формуле

$$\xi = \frac{G_{b1}}{G_{b\Sigma}}.$$

Исследования проводили при $\xi = 0,455$.

Коэффициент избытка воздуха в смеси, поступающей в выделенный цилиндр через смесевой канал, определяли по формуле

$$\alpha_1 = \frac{G_{b1}}{G_T l_0}.$$

Результаты исследований

На рис. 10 показаны регулировочные характеристики по составу смеси в выделенном цилиндре, работающем по стандартному процессу и с расслоением заряда. Характеристики получены на различных нагрузочных режимах при $n = 2700$ мин⁻¹ и оптимальных углах опережения зажигания θ . Из сравнения приведенных характеристик видно, что максимальная мощность выделенного цилиндра при стандартном процессе больше, чем при процессе с расслоением заряда на 3–4%. Такое увеличение мощности указывает на снижение скорости сгорания слишком обогащенной смеси в

расслоенном заряде. Однако при работе со стехиометрическими смесями мощности выравниваются. При дальнейшем обеднении смеси мощность выделенного цилиндра в процессе с расслоением заряда превышает мощность цилиндра в стандартном процессе.

При работе на пределе экономичного обеднения величина γ_i цилиндра, работающего с расслоением заряда, снижается на 10–12%. При этом выбросы CO, CH и NO_x с ОГ снижаются на 40–50%.

Отметим, что при работе цилиндра с расслоением заряда и полностью открытыми дроссельными заслонками коэффициент наполнения η_v на 5% меньше. Такое объясняется увеличением сопротивления на впуске, связанным с двумя карбюраторами и перегородкой во впускной трубе и головке цилиндров.

Этим обусловлено снижение расхода топлива G_T по сравнению со стандартным процессом.

При работе с заданным коэффициентом наполнения значения G_T для стандартного процесса и процесса с расслоением заряда совпадают.

Заключение

Стендовые исследования выделенного цилиндра на экспериментальной установке с тангенциальным подводом расслоенного заряда показали, что экономичность топлива улучшена (расход топлива снижен более чем на 10%), содержание оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в отработавших газах снижено на 40–50% по сравнению со стандартным процессом, благодаря увеличению эффективности сгорания обедненных смесей.

Полученные результаты указывают на перспективность применения расслоенного заряда в серийных ДВС и подтверждают обоснованность дальнейших исследований в этой области.

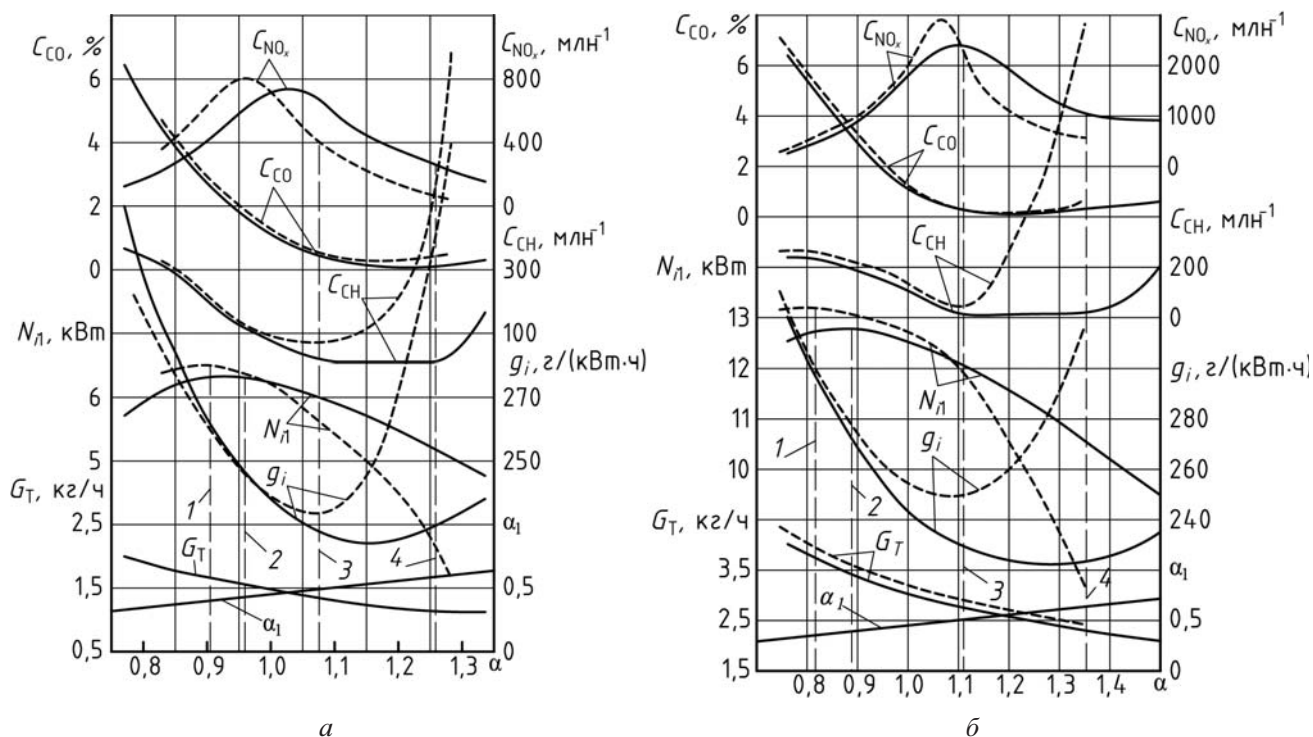


Рис. 10. Сравнительные регулировочные характеристики по составу смеси при $n = 2700 \text{ мин}^{-1}$:

а – при $\eta_v = 0,39$; $\theta = 37^\circ$ п.к.в.;

б – при полностью открытых дроссельных заслонках; $\theta = 29^\circ$ п.к.в.; $\eta_v = 0,89$ (для стандартного процесса); $\eta_v = 0,86$ (для процесса с расслоением заряда);

1, 2 – мощностные составы смеси для стандартного процесса и процесса с расслоением заряда;

3, 4 – пределы экономичного обеднения для стандартного процесса и процесса с расслоением заряда;

----- стандартный процесс; — процесс с расслоением заряда;

C_{NOx} , C_{CO} , C_{CH} – содержание NO_x, CO, CH в смеси

Список литературы

1. Кузнецов И.В. Увеличение мощности, улучшение топливной экономичности, экологических показателей и детонационных качеств в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием. – М.: МГИУ, 2008. – 158 с.
2. Arcoumanis, C., Kamimoto, T. Flow and Combustion in reciprocating Engines. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. – 420 S.
3. Сонкин В.И., Артемов А.А., Бажинов А.А., Миронычев М.А. Экспериментальный бензиновый двигатель ЗМЗ-НАМИ с непосредственным впрыскиванием // Автомобильная промышленность. 2007. № 1. С. 10–14. № 2. С. 8–11. № 3. С. 12–14.
4. Гибадуллин В.З. Влияние локальных микродобавок водорода на процесс воспламенения в ДВС с искровым зажиганием // Известия ВолгГТУ. Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. 2011. Т. 8. № 3. С. 64–66.
5. Самойлов Н.П., Самойлов Д.Н., Михеев А.А., Москалев Л.В. Влияние дополнительного завихрения и расслоения заряда в цилиндре на процесс наполнения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2008. Т. 8. № 2. С. 153–156.
6. Kubota, T., Shinmura, N., Naitoh, K. Cycle-Resolved Computations of Stratified-Charge Turbulent Combustion in Direct Injection Engines // Proc of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2012. Vol. 2. P. 931–940.
7. Park C., Kim S., Kim H., Moriyoshi Y. Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine // Energy. 2012. Vol. 41. No. 1. P. 401–407.
8. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для втузов / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

Материал поступил в редакцию 13.11.2012

КУЗНЕЦОВ Игорь Валентинович

Тел.: (495) 314-27-89

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО МГИУ, заслуженный изобретатель СССР. Сфера научных интересов – тепловые двигатели. Автор монографии, более 70 научных работ, 33 изобретений.

СЫЧЕВ Артем Максимович

Е-mail: sam61@mail.msiu.ru
Тел.: (915) 159-44-62 (моб.)

Аспирант ФГБОУ ВПО МГИУ. Сфера научных интересов – повышение эффективности рабочих процессов двигателей с искровым зажиганием.