

ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БЕДНЫХ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В БЕНЗИНОВЫХ ДВС – ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ

к.т.н. Егорушкин Е.А.¹, к.т.н. Шабанов А.В.², Шабанов А.А.³

¹Московский технологический университет, Москва, Россия,

²НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия,

³Московский политехнический университет, Москва, Россия, saaha-1955@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы развития технологий в области совершенствования организации процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с целью решения проблемы защиты окружающей среды и повышения эффективности использования топливных ресурсов. Проведенный анализ показал повышенный интерес исследователей и практиков автомобилестроения к проблеме воспламенения бедных смесей в ДВС методом расслоения топливо-воздушного заряда в камере сгорания. Рассмотрены направления по интенсификации сгорания бедных смесей в двигателях внутреннего сгорания за счет применения различных способов расслоения топливо-воздушного заряда в камере сгорания двигателей внутреннего сгорания. Сгорание бедных смесей обеспечивает низкое содержание выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателя внутреннего сгорания и улучшение топливной экономичности. Преимуществом двигателя внутреннего сгорания, использующим бедные топливо-воздушные смеси, является его работа практически без дросселирования заряда на впуске. При этом обеспечивается снижение расхода топлива и соответственно выбросов CO₂ до 25%. Низкие концентрации выбросов вредных веществ снижают также требования к эффективности нейтрализатора. Процесс сгорания бедных смесей осуществляется благодаря технологиям непосредственного электронного впрыска топлива в камеру сгорания под высоким давлением и каталитической нейтрализации продуктов сгорания бедных смесей. Эффективное сгорание топливо-воздушных смесей достигается с коэффициентом избытка воздуха меньше 1,7. В статье приведены также результаты испытаний форкамерно-факельного двигателя внутреннего сгорания, которые показали возможности использования качественного регулирования мощности двигателя за счет работы на бедных смесях и значительного снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Показано, что применение электронной системы зажигания с повышенной энергией разряда и системой гомогенного смесеобразования приводит к интенсификации сгорания бедных смесей в ДВС, и позволяет работать двигателю на сверхбедных смесях с коэффициентом избытка воздуха 3,5 при устойчивом сгорании топливо-воздушных смесей.

Ключевые слова: выброс вредных веществ, эффективность использования топливных ресурсов, эффективное сгорание, способы расслоения топливо-воздушного заряда, камера сгорания, форкамерно-факельный двигатель внутреннего сгорания, каталитическая нейтрализация продуктов сгорания бедных смесей.

Введение

Постоянный рост мирового автомобильного парка и ухудшение экологии атмосферы заставляет правительства разных стран ужесточать законодательные ограничения на выброс вредных веществ с отработавшими газами двигателя и повышать энергоэффективность новых автомобилей и силовых транспортных установок. За последние десять лет предельно допустимые нормы на выброс вредных веществ в Европе были значительно уменьшены. В настоящее время на территории России действуют нормы уровня выбросов вредных веществ

Евро-5, а на территории ЕЭС уже действуют нормы Евро-6. Выполнение этих норм заставляет производителей активно искать новые пути совершенствования конструкции автомобилей. Уделяется большое внимание развитию технологий в области совершенствования рабочего процесса ДВС, применению на автомобилях электропривода, повышению эффективности процессов нейтрализации вредных веществ продуктов бедного сгорания в ДВС.

В искровых ДВС работа на бедных смесях встречает трудности, в частности, из-за специфики работы свечи зажигания и по ряду других

причин [1, 2]. На воспламенение бедных топливно-воздушных смесей оказывают влияние определенные закономерности, которые показывают, что рассматриваемый процесс, с одной стороны, зависит от величины начального воспламеняемого объема и термодинамического состояния смеси, а с другой стороны, определяется энергией искрового разряда, энергией, выделяемой в процессе воспламенения смеси. Эти закономерности оказывают сильное влияние на пределы обеднения топливно-воздушных смесей и скорость сгорания при искровом воспламенении.

Энергия свечи зажигания и условия ее подведения к зоне воспламенения топливно-воздушной смеси не позволяют создать большой начальный очаг горения, который мог обеспечить быстрое развитие процесса горения. Вследствие этого увеличение энергии разряда в традиционных искровых ДВС не приводит к улучшению процесса воспламенения и показателей ДВС. Однако проблема интенсификации воспламенения бедных смесей в ДВС в настоящее время сохраняет свою значимость и актуальность.

Ранее нами было показано, что при интенсификации сгорания бедных смесей в ДВС применением системы лазерного зажигания существенно улучшается процесс развития первичного очага воспламенения за счет объемного воспламенения топливно-воздушного заряда, что способствует бурному развитию процесса воспламенения и последующего сгорания [3, 4]. Сгорание бедных смесей обеспечивает низкое содержание выбросов вредных веществ с отработавшими газами ДВС и улучшение топливной экономичности.

Цель исследования

Целью исследования являлось исследование особенностей воспламенения и сгорания расслоенного топливно-воздушного заряда в камере сгорания бензинового ДВС, а также исследование возможности снижения выбросов вредных веществ в отработавших газах при работе ДВС на бедной расслоенной смеси.

Воспламенение бедных топливно-воздушных смесей при расслоении топливно-воздушного заряда в камере сгорания

Одним из направлений решения проблемы воспламенения бедных топливно-воздушных смесей является способ расслоения топливно-

воздушного заряда в камере сгорания ДВС. Еще в 80-х гг. прошлого века для этих целей на серийных бензиновых двигателях легковых автомобилей применяли форкамерно-факельное зажигание. Следует сказать, что данный процесс воспламенения был известен и ранее, еще на стадии развития двигателей. Конструкция камеры сгорания с форкамерно-факельным зажиганием предусматривает разделение рабочего заряда на обогащенную смесь в форкамере, где установлена свеча зажигания и впускной клапан, и обедненную – в основной камере. Процесс сгорания осуществлялся за счет выбрасывания в основную камеру сгорания ДВС огненного факела продуктов сгорания богатой смеси из форкамеры. В результате смесь воспламеняется одновременно в ряде точек. Объемное воспламенение приводит к тому, что в основной камере обедненная смесь способна гореть с высокими скоростями. Такой факел мог поджигать бедную смесь на серийных ДВС с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,6$. Воспроизводимость воспламенения бедных смесей и скорость их сгорания оказываются исключительно высокими. В отличие от искрового зажигания, при котором уже при $\alpha = 1,25$ значения удельных расходов топлива начинают резко возрастать, у факельного зажигания значения минимума индикаторного расхода топлива g_i и соответственно индикаторного КПД достигают при $\alpha = 1,6$ и с дальнейшим обеднением увеличивается незначительно.

Недостатком данного двигателя являлась его неустойчивая работа на режимах близких к полному дросселю вследствие влияния обедненной смеси основной камеры на форкамеру в процессе движения поршня при сжатии смеси. Смесь из основной камеры на режимах близких к полному дросселю попадала в форкамеру и сильно обедняла состав топливно-воздушной смеси форкамеры. Это приводило к пропускам воспламенения зажигания в форкамере. Если эту проблему можно было конструктивно решить, то отсутствие работоспособного кислородного датчика обратной связи и невозможность установки трехкомпонентных нейтрализаторов поставили форкамерно-факельный двигатель в разряд неперспективных. Следует сказать, что заложенные резервы данного способа воспламенения топливно-воздушных смесей не были в то время использованы в полной мере и по ряду других причин

серийное производство такого двигателя было свернуто. Доработка одним из авторов данной статьи поверхности камеры сгорания ДВС у распыливающих отверстий в форкамере показала возможность решения обозначенной выше проблемы и реализации заложенных резервов форкамерно-факельного зажигания на данном двигателе.

На рис. 1 приведены результаты испытаний форкамерно-факельного ДВС ($V_h = 2,45$ л), которые показали возможность использования качественного регулирования мощности на данном типе двигателя за счет работы на бедных смесях, значительного снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) и расхода топлива. На рис. 1 показаны регулировочные характеристики по составу смеси ДВС при полном дросселе и прикрытом, разряжение за дросселем $\Delta P_k = 0,013$ МПа. Частота вращения коленчатого вала ДВС соответствовала режиму работы характерному для городского цикла движения ($n = 2000$ мин⁻¹).

Следует отметить, что наряду с модернизируемой камерой сгорания ДВС в исследованиях использовалась электронная искровая система зажигания с повышенной энергией разряда ($E_p = 60$ мДж) и система гомогенного смесеобразования (ЭСФВЭ-90), разработанная проф. д.т.н. Ю.Б. Свиридовым в лаборатории ЛенКАРЗа. Это позволило ДВС работать на

сверхбедных смесях с $\alpha = 3,5$ при устойчивом сгорании топливно-воздушных смесей. Только при $\alpha > 2,0$, как видно из рис. 1, наблюдался линейный рост углеводородов в ОГ ДВС. Для анализа СН использовался быстродействующий пламенно-ионизационный газоанализатор с непосредственным отбором проб из отработавших газов ДВС. Концентрации СН определяются температурой пристеночных слоев смеси, где происходит ее неполное сгорание, а линейный ее рост при обеднении смеси объясняется постепенным снижением температуры в камере сгорания ДВС и, соответственно, ростом пристеночного у камеры сгорания топливно-воздушного несгораемого слоя. По данным исследований [3] толщина пристеночного слоя, или как еще ее называют зона гашения пламени, составляет 2 мм, и при снижении температуры в камере сгорания она постепенно увеличивается. Следует отметить зависимость снижения концентраций NOx при небольшом дросселировании топливно-воздушного заряда и возможность значительного обеднения смеси при этом. Этот эффект, как будет показано ниже, используется на современных бензиновых ДВС зарубежных фирм с принудительным воспламенением смеси.

Снижение концентраций NOx, как известно, определяется температурой сгорания топливно-воздушной смеси, а максимальное их значение наблюдается при $\alpha = 1,1$. Концентра-

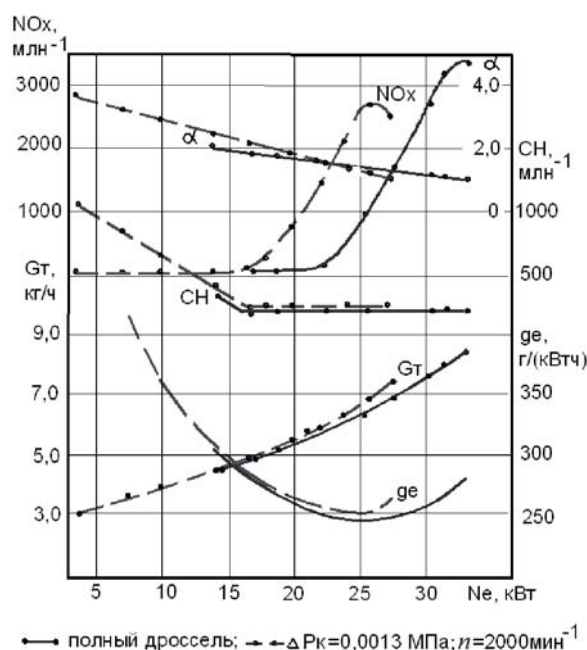


Рис. 1. Регулировочные характеристики по составу смеси форкамерного ДВС ($V_h = 2,45$ л)

ции СО в ОГ ДВС находились на минимальном уровне и составляли десятые доли процентов при работе двигателя на бедных смесях. Низкие концентрации ВВ снижают требования к эффективности нейтрализатора. В России, несмотря на полученные положительные результаты исследований, работы по модернизации форкамерно-факельным ДВС из-за состояния технологии и производства того уровня были прекращены. Конструктивные решения, предложенные в прошлом веке, не смогли конкурировать с более простым искровым зажиганием. Однако на современном этапе развития научно-технического прогресса, внедрения передовых достижений в двигателестроении в зарубежных странах они уже успешно реализованы в другом исполнении.

Новые технологии воспламенения бедных топливо-воздушных смесей в ДВС

В настоящее время процесс сгорания бедных смесей осуществляется благодаря появившимся технологиям непосредственного электронного впрыска топлива в камеру сгорания под высоким давлением и каталитической нейтрализацией продуктов сгорания бедных смесей. Ведущими зарубежными фирмами серийно выпускаются двигатели, работающие на бедной расслоенной смеси практически без дросселирования заряда на впуске, обеспечивающие снижение расхода топлива и соответственно выбросов CO_2 на 25% (до 40% на отдельных режимах) [5].

Это достигается благодаря и высокой степени сжатия ($\epsilon = 10...12$), которая позволяет работать двигателю практически без дросселирования. Эти факторы также существенно уменьшают тепловые потери и потери на газообмен. За счет охлаждения заряда при испарении топлива в цилиндре ДВС увеличивается коэффициент наполнения и мощность, а также улучшаются антидетонационные качества двигателя, что позволяет ему работать со степенями сжатия $\epsilon = 11...11,5$ при высоких значениях индикаторного КПД.

Процесс сгорания бедных смесей за счет расслоения заряда в камере сгорания ДВС зарубежные фирмы решают различными способами. В ультрабедном варианте ДВС достигается эффективное сгорание на топливо-воздушных смесях с $\alpha < 1,7$. Следует сказать, что сложность формирования расслоен-

ного заряда у свечи зажигания (богатая смесь) и (бедная) по объему камеры сгорания заключается в различии динамики топлива и воздуха в широком диапазоне режимов работы ДВС. В одном случае (серийные двигатели «Рено» и опытные ДВС фирмы «Мерседес-Бенц») она решается установкой свечи зажигания вблизи топливной форсунки, так чтобы электроды свечи находились у края впрыскиваемого топливного факела. В других случаях, в четырехклапанных ДВС свечу устанавливают в центре камеры сгорания, а форсунку на периферии под впускным клапаном [5]. Формирование расслоенного заряда у свечи зажигания (богатая смесь) и (бедная) по объему камеры сгорания обеспечивается за счет динамики топлива и воздуха в широком диапазоне режимов работы ДВС. Для расслоения смеси применяют интенсивный вихрь на впуске, который создают специально спроектированные впускные каналы. Такую схему применяют «Мицубиси», «Тойота», «Нисан», «Ситроен».

На двигателях фирмы «Нисан» проблеме работы двигателя в области гомогенного и расслоенного сгорания удалось решить за счет регулирования интенсивности вихря на впуске с помощью индивидуальных заслонок, установленных во впускном тракте между головкой цилиндров и впускной трубой. На двигателях «Мицубиси» – за счет регулирования расхода воздуха (интенсивности вихря) байпасным электромагнитным клапаном на входе во впускную трубу. В другом варианте расслоение обеспечивается за счет применения позднего (на такте сжатия) впрыска топлива не на поршень, а ближе к центру камеры сгорания. Отсюда обогащенный топливом заряд переносится к свече зажигания с помощью внутрицилиндрового течения. Двойной впрыск обеспечивает регулирование расслоения заряда и позволяет исключить пропуски воспламенения зажигания при изменении режимов работы ДВС. Первая порция топлива двойного впрыска впрыскивается на такте впуска, вторая – на такте сжатия, формируя расслоение заряда в цилиндре (автомобили «Тойота») [5].

Одной из главных проблем для ДВС, работающего на бедной смеси, является работа нейтрализатора с продуктами бедного сгорания. В настоящее время существует несколько способов нейтрализации NO_x ДВС: селективно-восстановительный, накопительный (ад-

сорбционный) нейтрализаторы и др. Первый тип использует фирма «Мицубиси», а второй – «Тойота». Селективно-восстановительный катализатор использует углеводороды ОГ для восстановления NOx и действует непрерывно. Накопительный катализатор действует циклически. Он адсорбирует NOx в течение минуты и генерирует накопленные NOx довольно быстро (за несколько секунд) в азот, когда двигатель работает на стехиометрической или богатой смеси. Накопительный катализатор наиболее эффективен в температурном диапазоне 250...450 °С, обеспечивая максимальный коэффициент конверсии NOx на уровне 90% смесей [6]. При длительной работе на бедных смесях катализатор необходимо регулярно очищать от накопленных NOx контролируемой подачей ОГ от богатых смесей. Снижение NOx обеспечивает также и рециркуляция отработавших газов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что сгорание обедненных смесей при расслоении топливо-воздушных смесей в ДВС обеспечивает низкое содержание выбросов вредных веществ с отработавшими газами ДВС и существенно улучшает топливную экономичность ДВС. Данный процесс также дает возможность использования качественного регулирования мощности на двигателе в широком диапазоне нагрузок за счет устойчивой работы ДВС на бедных смесях. Практическое использование этого способа стало возможным благодаря новым технологиям непосредственного электронного впрыска топлива в камеру сгорания под высоким давлением и каталитической нейтрализации продуктов сгорания бедных смесей расслоенного заряда в камере сгорания ДВС.

Литература

1. Шабанов А.В., Шабанов А.А. Расчетная модель воспламенения топливно-воздушных смесей в искровом ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 1(27). С. 60–65.
2. Кутенев В.Ф., Шабанов А.В. Оценка интенсивности воспламенения топливно-воздушной смеси искровым разрядом // Труды НАМИ. 2003. Выпуск № 231. С. 146–153.
3. Егорушкин Е.А., Шабанов А.В., Шабанов А.А. Инновационные разработки в сфере интенсификации воспламенения топливовоздушных смесей // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 2(28). С. 8–12.
4. Кутенев В.Ф., Асовский И.Г., Рябиков О.Б., Шабанов А.В. К вопросу воспламенения и сгорания обедненных смесей в ДВС с принудительным зажиганием – новый этап // Труды НАМИ. 2011. Выпуск 247. С. 64–75.
5. Каменев В.Ф., Миронычев М.А., Сонкин В.И. Перспективы и проблемы применения непосредственного впрыска в бензиновых двигателях // Журнал ААИ. 2002. № 11. С. 42–47.
6. Кутенев В.Ф., Кисуленко Б.В., Шуте Ю.В. Экологическая безопасность автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. М.: Экология. Машиностроение, 2009. 253 с.

References

1. Shabanov A.V., Shabanov A.A. Calculation model of ignition of fuel-air mixtures in a spark ICE. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2016. No 1(27), pp. 60–65 (in Russ.).
2. Kutenev V.F., Shabanov A.V. Estimation of ignition intensity of a fuel-air mixture by a spark discharge. *Trudy NAMI*. 2003. No 231, pp. 146–153 (in Russ.).
3. Egorushkin E.A., Shabanov A.V., Shabanov A.A. Innovative developments in the field of intensification of ignition of fuel-air mixtures. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2016. No 2(28), pp. 8–12 (in Russ.).
4. Kutenev V.F., Asovskiy I.G., Ryabikov O.B., Shabanov A.V. Ignition and combustion of lean mixtures in an ICE with forced ignition - a new stage. *Trudy NAMI*. 2011. No 247, pp. 64–75 (in Russ.).
5. Kamenev V.F., Mironychev M.A., Sonkin V.I. Prospects and problems of using direct injection in gasoline engines. *Zhurnal AAI*. 2002. No 11, pp. 42–47 (in Russ.).
6. Kutenev V.F., Kisulenko B.V., Shute Yu.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobiley s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya* [Environmental safety of automobiles with internal combustion engines]. Moscow: Ekologiya. Mashinostroenie Publ., 2009. 253 p.

IGNITION OF POOR FUEL-AIR MIXTURES IN GASOLINE-DRIVEN ICES - PROBLEMS, SOLUTIONS

PhD in Engineering **E.A. Egorushkin**¹, PhD in Engineering **A.V. Shabanov**², **A.A. Shabanov**³

¹Moscow Technological University, Moscow, Russia, ²NAMI's Testing Centre, Moscow, Russia,

³Moscow Polytechnic University Moscow, Russia, saaha-1955@mail.ru

The article deals with the development of technologies in the field of improving the organization of the combustion process in internal combustion engines in order to solve the problem of protecting the environment and increasing the efficiency of fuel resources. The carried out analysis has shown the increased interest of researchers and automotive experts in the problem of ignition of poor mixtures in ICE by the method of fuel-air charge separation in the combustion chamber. The directions of intensification of combustion of poor mixtures in internal combustion engines are considered due to application of various methods of fuel-air charge separation in the combustion chamber of internal combustion engines. Combustion of poor mixtures ensures low emissions of harmful substances with exhaust gases of the internal combustion engine and improved fuel economy. The advantage of an internal combustion engine using poor fuel-air mixtures is its operation with little or no charge throttling at the inlet. At the same time, fuel consumption and, correspondingly, CO₂ emissions are reduced to 25%. Low concentrations of harmful emissions also reduce the efficiency requirements of the neutralizer. The process of combustion of poor mixtures is carried out due to the technologies of direct electronic fuel injection into the combustion chamber under high pressure and catalytic neutralization of combustion products of poor mixtures. Effective combustion of fuel-air mixtures is achieved with an excess air factor of less than 1.7. The article also contains the results of tests of the prechamber-flare internal combustion engine, which showed the possibility of using qualitative engine power regulation due to work on poor mixtures and a significant reduction in emissions of harmful substances with exhaust gases. It is shown that the use of an electronic ignition system with an increased discharge energy and a system of homogeneous mixture formation leads to an intensification of combustion of poor mixtures in the internal combustion engine, and allows the engine to operate at superhigh mixtures with an air excess factor of 3.5 with stable combustion of fuel-air mixtures.

Keywords: emission of harmful substances, efficiency of fuel resources use, efficient combustion, fuel-air charge separation methods, combustion chamber, prechamber-flare internal combustion engine, catalytic neutralization of combustion products of poor mixtures.