

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В СФЕРЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

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

¹Московский технологический университет, ²НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»,
+7 (925) 827-59-03, saaha-1955@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы интенсификации воспламенения топливовоздушных смесей в двигателях внутреннего сгорания с принудительным воспламенением. Рассмотрены условия работы свечи зажигания в камере сгорания двигателя и направления совершенствования организации процесса воспламенения топливовоздушных смесей. Отмечено, что в настоящее время искровое зажигание широко применяется и выполняет одну из основных функций в двигателе внутреннего сгорания, но резервы его совершенствования почти все исчерпаны. В этой связи рассматривается перспективное направление в области интенсификации сгорания бедных смесей в двигателе за счет применения системы лазерного зажигания. В статье приведена конструкция адаптера лазерного зажигания, установленного в свечном отверстии головки блока цилиндров двигателя. Показано, что при интенсификации сгорания бедных смесей в двигателе внутреннего сгорания за счет применения системы лазерного зажигания существенно улучшается процесс развития первичного очага воспламенения, что способствует бурному развитию процесса воспламенения и последующего сгорания. При этом существенно улучшаются показатели двигателя с принудительным воспламенением. Преимущество лазерного зажигания заключается в возможности сфокусировать луч на небольшой площади в центре камеры сгорания двигателя для обеспечения оптимальных условий сгорания. Отмечено, что при воспламенении достигается сначала максимальная температура, а потом происходит ее падение. Показано, что если при искровом зажигании она в значительной степени определяет скорость воспламенения смеси и сгорания, то при использовании лазерного зажигания она практически не оказывает влияния на процесс воспламенения и последующего сгорания смеси. Отмечены и другие преимущества лазерного зажигания по отношению к традиционному, главными из которых являются возможность снижения требований к октановому числу топлива и обеспечение стабильности и надежности рабочего процесса двигателя на бедных смесях.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, процесс воспламенения, топливо-воздушные смеси, адаптер лазерного зажигания, формирование очага горения

Введение

Ужесточающиеся законодательные требования международных организаций по защите окружающей среды вызывают необходимость повышать эффективность использования топливных ресурсов и предписывают снижать выбросы вредных веществ (ВВ) и CO₂ с отработавшими газами при разработке новых автомобилей. В настоящее время основные усилия разработчиков автомобилей направлены на создание силовых установок с применением электропривода, которые обеспечивают низкие ВВ с отработавшими газами и энергоэффективность в эксплуатации. Благодаря передовым технологиям производство автомобилей с электроприводом стремительно развивается и является одним из самых динамичных в автомобилестроении. Вопросам совершенство-

вания рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания (ДВС) стало уделяться меньше внимания, хотя основная часть автотранспорта, а также гибридные автомобили используют в качестве основного источника энергии традиционные ДВС. Следует сказать, что заложенные резервы совершенствования ДВС являются значительными. Одним из направлений совершенствования ДВС является повышение качества рабочего процесса. В этой связи совершенствование организации процесса воспламенения топливо-воздушных смесей в ДВС является одним из важнейших мероприятий, так как начальная фаза сгорания определяет протекание сгорания топливо-воздушных смесей в целом. В связи с этим вопросы интенсификации воспламенения и последующего сгорания топливовоздушных смесей в двигате-

лях с принудительным воспламенением являются актуальными.

Возникает вопрос: за счет чего можно обеспечить эффективное протекание процесса сгорания бедных смесей? Ранее нами были проведены и опубликованы расчетно-экспериментальные исследования воспламенения топливовоздушных смесей в ДВС по определению влияния параметров искрового разряда на показатели ДВС, где были показаны возможности и имеющиеся резервы при совершенствовании искровых систем зажигания [1, 2]. Искровое зажигание широко применяется на двигателях и в настоящее время, хотя и исчерпало почти все свои резервы совершенствования, продолжает выполнять одну из основных функций в ДВС. Для того чтобы определить направления совершенствования организации процесса воспламенения топливовоздушных смесей, отметим некоторые особенности работы искрового зажигания.

Искровые свечи зажигания, как источник энергии воспламенения в ДВС топливо-воздушной смеси, прошли долгий путь развития. Свеча зажигания работает в чрезвычайно сложных и чрезвычайно напряженных условиях. Рабочая часть ее располагается в камере сгорания, а корпус свечи – в головке блока цилиндров. При работе двигателя температура в камере сгорания колеблется от 70 до 2500°C, максимальное давление достигает 5–6 МПа, напряжение на свече достигает 20 кВ. Поэтому к свечам зажигания предъявляются повышенные требования. Изолятор свечи должен обладать стойкостью к высокой температуре, электрической и механической стойкостью и выдерживать напряжение не менее 30 кВ при максимальной температуре сгорания смеси. Выполнение этих требований достигаются значительными усилиями разработчиков искровых свечей зажигания, применением дорогостоящих материалов. Вместе с тем ресурс свечей из-за сложных условий работы имеет ограниченный ресурс, обычно не превышающий 500 часов. Ресурс свечей в значительной степени также зависит от качества топлива.

Цель исследования

Цель исследования – разработка методов интенсификации воспламенения топливовоздушных смесей ДВС.

Материалы, методы и результаты исследования

Перспективное направление в области интенсификации сгорания бедных смесей в ДВС открывается с созданием относительно простой и дешевой системы лазерного зажигания. Эта новая технология может стать прорывом на автомобильном рынке и вполне может успешно конкурировать с другими разработками в области систем зажигания. На современном этапе развития передовых технологий имеются реальные предпосылки практического решения данной проблемы. В настоящее время созданы системы лазерного зажигания в виде адаптера, установленного в свечном отверстии ДВС, которые существенно улучшают показатели двигателя с принудительным воспламенением. На рис. 1 приведено сравнение размеров свечи зажигания и лазерного адаптера, который устанавливается в свечном отверстии камеры сгорания ДВС.

Отметим преимущества лазерного зажигания по отношению к традиционному зажиганию от искровой свечи:

- возможность при невысоких энергетических характеристиках быстрого воспламенения большего, чем при искровом зажигании, начального объема топливо-воздушной смеси;
- возможность регулирования энергетических параметров вспышки (энергии накачки луча лазера) топливо-воздушной смеси в любой точке камеры сгорания;
- значительное повышение скорости воспламенения бедной смеси и ее последующего сгорания, возможность работы ДВС с более высокой степенью сжатия;
- возможность снижения требований к октановому числу топлива и использования топлив с более низким октановым числом

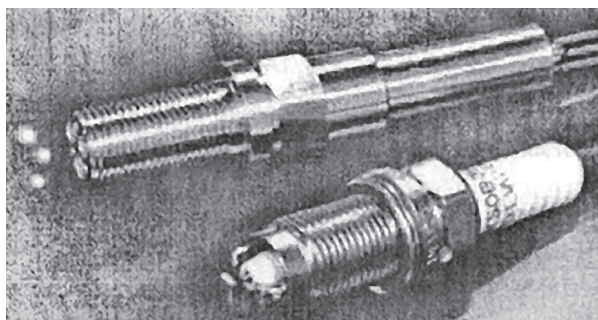


Рис. 1. Внешний вид свечи зажигания
и лазерного адаптера

(данное направление заслуживает отдельного рассмотрения);

- обеспечение стабильности и надежности рабочего процесса ДВС при работе на бедных смесях;
- улучшение топливно-экономических и энергетических показателей;
- безызносное функционирование лазерного адаптера зажигания по отношению к искровой свече зажигания и значительное увеличение ресурса его работы.

Рассмотрим более подробно особенности работы лазерного зажигания в ДВС. Преимущество лазерного зажигания заключается в возможности сфокусировать луч на небольшой площади в любом месте цилиндра для обеспечения оптимальных условий сгорания. Этим местом является середина камеры сгорания, т.к. в этом случае время распространения пламени до самой дальней точки камеры сгорания будет минимальным. Это сокращает продолжительность процесса сгорания топливовоздушной смеси и улучшает детонационные характеристики ДВС. Традиционная свеча зажигания обеспечить это не может. Независимо от величины энергии накачки луча лазера воспламенение смеси происходит значительно быстрее, чем в традиционных электронных системах [3]. Устойчивая работа ДВС на обедненных смесях позволяет значительно снизить в отработавших газах концентрацию двуокиси углерода, что весьма выгодно выделяет лазерное зажигание с точки зрения снижения парниковых газов в атмосферу.

При лазерном импульсе продолжительностью в несколько наносекунд за счет фокусировки энергии в зоне выделения энергии создается плазменная структура с температурой порядка 10000°C . Создание мощного и объемного теплового плазменного очага воспламенения, образованного в результате лазерного импульса, вызывает ионизацию топливовоздушной смеси, быстрое формирование очага горения, уменьшение периода задержки воспламенения смеси и рост скорости горения бедных смесей. Это видно из рис. 2, где приведено сравнение развития процесса воспламенения лазерной и искровой системами зажигания на различных этапах горения смесей в камере сгорания ДВС при углах опережения зажигания ($14,2$ и $7,0^{\circ}$ п.к.в.). Под воздействием лазерного импульса давление в очаге быстро

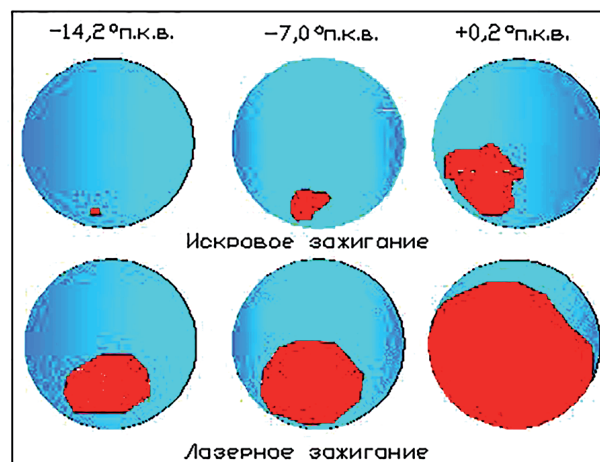


Рис. 2. Развитие очага воспламенения при искровом и лазерном зажигании [3]

повышается и к моменту окончания действия лазерного импульса достигает $6 \cdot 10^2$ МПа. В верхнем положении поршня $+0,2^{\circ}$ п.к.в. при лазерном зажигании процесс сгорания охватывает почти всю камеру сгорания, в то время как при искровом воспламенении фаза горения находится на стадии развития. Эти исследования были выполнены И.Г. Ассовским в институте химической физики РАН им. Семенова [4].

Преимущества лазерного зажигания топливовоздушной смеси в цилиндрах ДВС также продемонстрировали научные сотрудники Технологического института г. Карлсруэ (Германия) [5]. Эффективность лазерной системы сравнивалась с искровой системой зажигания с источником энергии в 110 мДж. Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровом четырехклапанном бензиновом ДВС (базовая модель Mercedes-Benz M272DE35) со степенью сжатия 11,68 и с рабочим объемом 583 см^3 .

В исследовательских работах применялась лазерная система в виде адаптера, установленного в свечном отверстии. На рис. 3 показана конструкция адаптера лазерного зажигания. Адаптер вворачивается в резьбовое свечное отверстие головки блока цилиндров ДВС. В адаптере находится линза, выполненная из синтетического кварцевого стекла с фокусным расстоянием $L=22,6 \text{ мм}$. Окно из сапфирового стекла защищает линзу от пламени.

В исследованиях применялась система с двухимпульсной лазерной накачкой с длиной волны импульса $\lambda=1064 \text{ нм}$, диапазон частот волны импульса $f = 0 \dots 50 \text{ Гц}$, продолжительность импульса $t_{\text{имп}} = 4 \text{ нс}$, диаметр луча 2 мм .

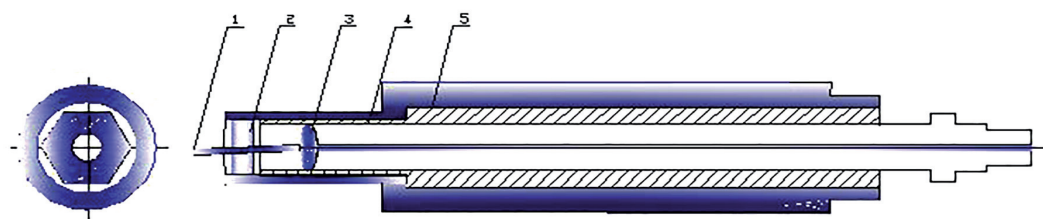


Рис. 3. Устройство лазерного адаптера зажигания:

1- лазерный луч; 2 – окно; 3 – линза; 4 – держатель линзы; 5 – адаптер зажигания

Лазерное излучение фокусируется вдоль оптической оси в направлении поршня в виде энергии плазмы с общей энергией до 150 мДж. Относительно невысокие энергетические характеристики системы лазерного зажигания связаны с низкими тепловыми потерями и повышенной эффективностью плазмообразования.

В экспериментах лазер излучал энергию в виде двух импульсов ($E=2 \times 25=50$ мДж) продолжительностью несколько наносекунд с частотой 10 Гц. Оба импульса можно было регулировать во временном интервале относительно друг друга. Положение линзы и вид луча в применяемой системе изменяются за счет смещения (до 4,5 мм) вдоль оптической оси лазера прецизионной винтовой передачей. Из-за смещения фокуса точка воспламенения может смещаться в область струи впрыскиваемого топлива и оказывать положительное влияние на процесс воспламенения и сгорания топливо-воздушной смеси. Следует сказать, регулирование направления луча лазера необходимо только для исследовательских работ. При выборе оптимальной точки фокуса лазерного луча необходимость настройки отпадает, и конструкция лазерного адаптера упрощается.

Исследования показали, что устойчивая работа двигателя обеспечивается при энергии накачки луча лазера всего с $E=10$ мДж (коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,2$ – $1,4$). В результате в камере сгорания исключаются пропуски воспламенения топливо-воздушной смеси, характерные для бедных смесей с традиционными системами зажигания. В результате наблюдения за процессом установлено, что при воспламенении достигается сначала максимальная температура, а потом происходит ее падение, что вызывает в ядре диссоциацию молекул (обратный эндотермический процесс). Далее температура достигает локального минимума, а затем возрастает из-за снова возникающей экзотермической реакции. Следует от-

метить, что данная закономерность, как было отмечено нами ранее в работе [1], характерна и для искрового зажигания. Данная закономерность, как было показано, в значительной степени определяет скорость воспламенения смеси и последующего ее сгорания при искровом зажигании. Однако если в искровых системах зажигания увеличение энергии искры свыше определенного предела не приводит к расширению предела обеднения, то при лазерном зажигании увеличение энергии до максимального значения позволяет работать ДВС на сверхбедных смесях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,75$.

При сильном расслоении смеси воспламенение происходит только в области подвода энергии. Но процесс воспламенения при лазерном источнике энергии можно оптимально реализовать при трехступенчатом впрыскивании топлива. При этом способе впрыскивания область эффективного воспламенения смесей значительно расширяется. После второго впрыска топливная смесь все еще является очень бедной, и для поддержания горения смеси нужен третий впрыск топлива. Лазерное излучение в виде энергии плазмы (50 мДж), как было уже отмечено выше, позволяет работать двигателю с $\alpha = 1,4$ – $1,5$ и минимальными значениями индикаторного расхода топлива, за счет большего начального очага воспламенения и оптимальной достигнутой фокусировки энергии в цилиндре двигателя [4].

Заключение

Таким образом, проведенный анализ показал повышенный интерес исследователей и практиков автомобилестроения к проблеме интенсификации процесса воспламенения смесей. Интенсификация воспламенения топливовоздушных смесей существенно улучшает процесс развития первичного очага, что способствует бурному развитию процесса

воспламенения и сгоранию в целом, при этом пределы эффективного воспламенения и сгорания смесей значительно расширяются. Значительные резервы улучшения показателей ДВС, таких как экономические и экологические, открываются при применении лазерных систем зажигания.

Литература

1. Шабанов А.В., Шабанов А.А. Расчетная модель воспламенения топливовоздушных смесей в искровом ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 1(27). С. 60–65.
2. Кутенев В.Ф., Шабанов А.В. Оценка интенсивности воспламенения топливовоздушной смеси искровым разрядом // Труды НАМИ. 2003. № 231. С. 146–153.
3. 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. № 247. С. 64–75.
4. Асовский И.Г. Взаимодействие лазерного излучения с реагирующим веществом // Доклады РАН. 1994. Т. 337. № 6. С. 752–756.
5. Gross V., Kubach H., Spicher U., Schiessl R., Maas U. Laserzündung und Verbrennung im Ottomotor mit Direkteinspritzung // MTZ, 07–08.2010, pp. 532–541.

References

1. Shabanov A.V., Shabanov A.A. Calculation model of fuel-air mixtures ignition in spark ICE. Izvestiya MGTU «MAMI», 2016, No 1(27), pp. 60–65 (in Russ.).
2. Kutenev V.F., Shabanov A.V. Evaluation of ignition intensity of fuel-air mixture by spark discharge. Trudy NAMI, 2003, No 231, pp. 146–153 (in Russ.).
3. Kutenev V.F., Asovskiy I.G., Ryabikov O.B., Shabanov A.V. Ignition and combustion of lean mixtures in internal combustion engines with positive ignition – new stage. Trudy NAMI, 2011, No 247, pp. 64–75 (in Russ.).
4. Asovskiy I.G. The interaction of laser radiation with a reactive substance. Doklady RAN, 1994, T. 337, No 6, pp. 752–756 (in Russ.).
5. Gross V., Kubach H., Spicher U., Schiessl R., Maas U. Laserzündung und Verbrennung im Ottomotor mit Direkteinspritzung. MTZ, 07–08.2010, pp. 532–541.

INNOVATIVE DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF INTENSIFICATION OF FUEL-AIR MIXTURES IGNITION

Ph.D. **E.A. Egorushkin**, Ph.D. **A.V. Shabanov**, **A.A. Shabanov**
 Moscow Technological University,
 Automobile and Engine Research Institution NAMI Testing Centre
 +7 925 827-59-03, saaha-1955@mail.ru

The article discusses the intensification of fuel-air mixtures ignition in internal combustion engines with positive ignition. The conditions of operation of the spark plug in the combustion chamber and directions of improving fuel-air mixtures ignition process organization were considered. It was noted that nowadays spark ignition is used widely and it performs one of the basic functions in internal combustion engine, but reserves for its improving are almost exhausted. In this context, a promising direction in the field of intensification of lean mixtures combustion in the engine through the use of laser ignition system is considered. The article describes the design of the laser adapter plug installed in the spark plug hole of engine cylinder head. It is shown that the intensification of combustion of lean mixtures in the internal combustion engine through the use of laser ignition system significantly improves the process of primary focus ignition, which contributes to the rapid development of the ignition and subsequent combustion process. And engine with positive ignition performance characteristics significantly improves. The advantage of laser ignition is the ability to focus the beam on a small area in the center of combustion chamber to ensure optimal combustion conditions. It was noted that during ignition firstly the maximum temperature is reached and then it drops. It is shown that during the spark ignition it largely determines the speed of ignition and combustion, but when laser ignition is used it has practically no influence on the ignition and subsequent combustion of the mixture. There are also other advantages of the laser ignition in relation to the traditional ignition, the most important are: the possibility of reducing the requirements for octane level and ensuring stability and reliability of the engine when operating on poor mixtures.

Keywords: internal combustion engine, ignition process, fuel-air mixture, laser adapter plugs, combustion source formation.