

УДК 621.43

М. Д. ГАРИПОВ, К. Н. ГАРИПОВ, А. Г. ХАФИЗОВ

ИСКРОВОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО РАССЛОЕНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ДВС

Предложено возможное направление реализации надежного воспламенения искровым разрядом различных топлив в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха (> 5). Экспериментальные исследования были проведены на установке для изучения сгорания при постоянном объеме, оборудованной системой вырыска топлива. Приведены результаты экспериментального исследования с воспламенением основных товарных топлив и водного раствора этанола (50%). Проведен анализ полученных результатов. Показано, что имеется возможность достижения коэффициентов избытка воздуха, соответствующих дизельным двигателям, при использовании различных топлив. *Двигатели внутреннего сгорания; многотопливность; горение; биотоплива*

ВВЕДЕНИЕ

В работе [4] сформулированы требования к перспективному (унифицированному) рабочему процессу, который позволит объединить лучшие качества двух типов поршневых двигателей (топливную экономичность дизеля, удельную мощность бензинового) и должен работать на всей номенклатуре современных товарных топлив и топливах из растительного сырья, среди которых наиболее перспективным был признан обводненный этанол. Было показано, что решение проблемы реализации унифицированного рабочего процесса делится в основном на две части:

1. Решение вопроса, связанного с обеспечением надежного воспламенения искровым разрядом различных топлив в широком диапазоне температур окружающей среды и коэффициентов избытка воздуха ($\alpha \approx 1 \div 5$).

2. Решение вопроса, связанного с бездетонационным сгоранием в условиях высоких степеней сжатия.

В этой же работе сформулирована гипотеза о возможном способе осуществления в двигателе с искровым воспламенением бездетонационного сгорания при высоких степенях сжатия. Процесс реализуется за счет вдува компрессор-форсункой непосредственно в рабочую камеру двигателя богатой топливовоздушной струи, которая воспламеняется искровым разрядом вблизи ее границ. Этим обеспечивается первый этап сгорания, характерный для бензинового двигателя. В результате повышения давления и темпера-

туры несгоревшей части топливовоздушной смеси, обусловленного сгоранием части смеси, воспламененной искрой, на втором этапе происходит многоочаговое воспламенение и сгорание, характерное для рабочего процесса дизельного двигателя. При этом уровень неоднородности топливовоздушной смеси должен быть таким, чтобы, с одной стороны, исключить возможность возникновения детонации с интенсивностью, близкой к максимальной, с другой стороны, обеспечить максимально возможную степень использования имеющегося в рабочей камере двигателя воздуха. Удовлетворить эти противоречивые требования, вероятно, возможно, если организовать процесс таким образом, чтобы концентрационная неоднородность имела место на локальном уровне, а сами очаги локальной неоднородности были относительно равномерно распределены по объему камеры сгорания. Предполагается, что локальное образование детонационных волн, ослабляющихся в процессе распространения (благодаря неоднородной структуре смеси) до такого уровня, который не представляет опасность для конструкции двигателя и не ухудшает его эффективные показатели, допустимо. Принципы организации процессов смесеобразования и воспламенения, заложенные в предлагаемом рабочем процессе, должны позволить управлять степенью неоднородности. Самовоспламенения может и не быть при использовании высокооктановых топлив, например, водных растворов этанола. Тогда процесс будет одноэтапным.

За рамками рассмотрения в вышеупомянутой работе [4] остались вопросы, касающиеся возможности реализации на частичных нагрузках коэффициентов избытка воздуха, характерных для дизельных двигателей (до $\alpha \approx 5 \div 6$). Между тем, именно эта возможность в значительной степени определяет более высокую топливную экономичность дизелей в условиях эксплуатации по сравнению с двигателями с количественным регулированием мощности (бензиновыми) [3, 6]. Поэтому целью данной работы является исследование возможности искрового воспламенения топливовоздушной смеси, вдуваемой компрессор-форсункой, в условиях высоких среднестатистических по объему рабочей камеры коэффициентов избытка воздуха.

ГИПОТЕЗА

Для реализации качественного регулирования мощности двигатель с принудительным воспламенением должен обладать специфическими свойствами. В режиме холостого хода двигатель должен работать при коэффициенте избытка воздуха порядка 5–6, при котором однородная смесь уже не воспламеняется. Смесеобразование в данном случае должно быть организовано таким образом, чтобы на режимах малых нагрузок и холостом ходе смесь концентрировалась вокруг свечи зажигания, а в остальном объеме камеры сгорания находился воздух.

Для возможности воспламенения электрической искрой топливо в районе искрового разряда должно быть в газовой фазе, а смесь — находиться в концентрационных пределах воспламенения. Но возможно ли обеспечить эти условия при использовании различных топлив в широком диапазоне температур окружающей среды?

Как показали исследования, проведенные на кафедре ДВС УГАТУ, существующее противоречие между необходимостью иметь в момент зажигания подготовленную топливовоздушную смесь и ограничением времени приготовления смеси в ДВС с неравномерным распределением заряда в цилиндре может быть разрешено применением системы впрыска с компрессор-форсункой [5]. За счет этого появляется возможность предварительного дробления и испарения топлива непосредственно в компрессор-форсунке. Было показано, что система обеспечивает минимальные цикловые подачи топлива $\approx 0,15 \text{ мм}^3$ до частот $\approx 130 \text{ Гц}$ с высоким

качеством распыла основных товарных топлив: дизельного, бензина и керосина.

В работе [1] исследовалась возможность воспламенения данного топливовоздушного факела искрой. В результате экспериментального исследования было установлено, что при впрыске топливовоздушной смеси существует определенный промежуток времени, при котором вблизи распылителя (на расстоянии до 10 мм по оси ТВФ и как можно ближе к ней (к оси) по радиусу) имеется возможность для воспламенения. Эксперименты на одноцикловой установке показали, что этот промежуток достаточно узок и имеет место в конце впрыска, что ставит вопросы относительно возможности реализации в двигателе всережимного воспламенения. Эксперименты на многоцикловой установке выявили достаточно широкий разброс момента возможного воспламенения относительно процесса впрыскивания в зависимости от частоты циклов и применяемого топлива, что неприемлемо в условиях двигателя. Видимо, эти обстоятельства и стали одним из факторов, благодаря которым данную систему в условиях двигателя реализовать не удалось.

Рассмотрим возможности расширения диапазона устойчивого зажигания при впрыске топливовоздушной струи компрессор-форсункой. Как уже упоминалось, для возможности воспламенения электрической искрой топливо в районе искрового разряда должно быть в газовой фазе, а смесь — находиться в концентрационных пределах воспламенения. Этой возможности, видимо, будет способствовать предварительный нагрев и частичное испарение капель в процессе сжатия топливовоздушной смеси в полости компрессор-форсунки. При этом диапазон температур окружающей среды и спектр применяемых топлив будет в значительной мере зависеть от массового соотношения топливо-воздух и степени сжатия в ней. В соответствии с этими положениями в работе [2] система впрыска компрессор-форсункой претерпела существенные изменения. Была преобразована конструктивная схема компрессор-форсунки. Давление в конце сжатия выросло до 5–12 МПа, против 0,2–0,4 МПа в работе [1]. Количество распыливаемого воздуха — около 5% от общего расхода воздуха. Топливовоздушная струя поджигалась искровым разрядом, находящимся вблизи ее границ, а не ближе к оси факела. В результате проведения этих мероприятий процесс удалось реализовать в условиях двигателя. Однако результаты, полученные в этой рабо-

те, показали, что, в случае распространения свободной топливовоздушной струи, максимально возможное значение коэффициента избытка воздуха, реализуемое в двигателе, ограничено пределами $\alpha \approx 3,3-3,5$.

В данной работе было предположено, что использование предкамеры обеспечит возможность расширения диапазона устойчивого воспламенения богатой топливовоздушной струи, вдуваемой компрессор-форсункой.

Принцип воздействия предкамеры на процесс смесеобразования показан на рис. 1. Движущаяся через предкамеру топливовоздушная струя подсасывает окружающую ее среду, в результате чего образуется зона обратных токов, в которую увлекаются пары и капли топлива, а также воздух. При этом возникает эффект сепарации капель по размерам — пары топлива и наиболее мелкие капли увлекутся в зону обратных токов, тогда как крупные капли вследствие инерции продолжат свое движение, практически не изменяя своей траектории. Зона обратных токов, в которой (или вблизи нее) располагается искровой промежуток, должна характеризоваться небольшими скоростями и турбулентными пульсациями и, вследствие эффекта сепарации, смесью, содержащей в основном газовую фазу топлива и воздух. Применение предкамеры должно также снизить влияние газодинамической обстановки в камере сгорания двигателя на концентрационные поля вблизи искрового разряда.

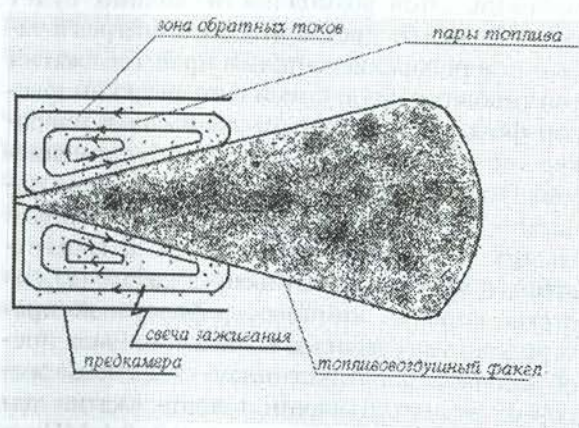


Рис. 1. Принципиальная схема воздействия предкамеры на процесс смесеобразования

Очевидно, что влияние газодинамической обстановки будет тем меньше, чем меньше сечение канала, сообщающего компрессор-форсунку с камерой сгорания двигателя. Однако малое сечение предкамеры ведет к проблемам с ее очисткой, увеличению потерь при пере-

текании, увеличению поверхности теплоотдачи и т. д. К тому же малое выходное сечение предкамеры может привести к переобогащению смеси в районе искрового разряда. Поэтому сечение, находящееся на стыке предкамеры и камеры сгорания должно быть как можно больше, а размеры камеры (из компоновочных соображений) — как можно меньше. Этим соображениям удовлетворяют такие предкамеры, в которых выходное сечение больше или равно их максимальному поперечному сечению. Это, например, формы, близкие к цилиндру, усеченному конусу и т. д. При этом не отвергаются, конечно же, и варианты, когда выходное сечение несколько меньше их максимального поперечного сечения.

Для подтверждения этой гипотезы были проведены исследования на специально созданной одноцикловой экспериментальной установке.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка состоит из 2-х основных частей:

- 1) камера сгорания постоянного объема (бомба);
- 2) экспериментальная система топливоподачи (компрессор-форсунка).

Принципиальная схема приведена на рис. 2.

Камера сгорания постоянного объема 4 имеет цилиндрическую форму (диаметр 80 мм и высота 22 мм). Боковые стенки камеры, изготовленные из кварцевого стекла, позволяют вести оптическую регистрацию процессов воспламенения топливовоздушно-заряда. На образующей поверхности имеется ряд отверстий для установки компрессор-форсунки 6, манометра 3, нагревательного элемента 11, термпары 2, вентиля подачи воздуха и выпуска отработавших газов.

Компрессор-форсунка 6 состоит из системы подачи воздуха 10, системы подачи топлива 9, нагнетательного поршня 7 и привода 8. Подвижные элементы компрессор-форсунки приводятся в действие от пружины. Параметры компрессор-форсунки соответствуют параметрам, реализованным в работе [2].

Для оптической регистрации процессов использовался комплекс для скоростной цифровой видеосъемки, состоящий из:

- 1) цифровой видеокамеры JAI PULNIX Gigabit Ethernet TM 6740 GE;

2) объектива Navitar ZOOM 7000 Macro Zoom с переменным фокусным расстоянием 18–108 мм, F/2.5;

3) персонального компьютера (ПК), в котором отображаются и сохраняются полученные кадры.

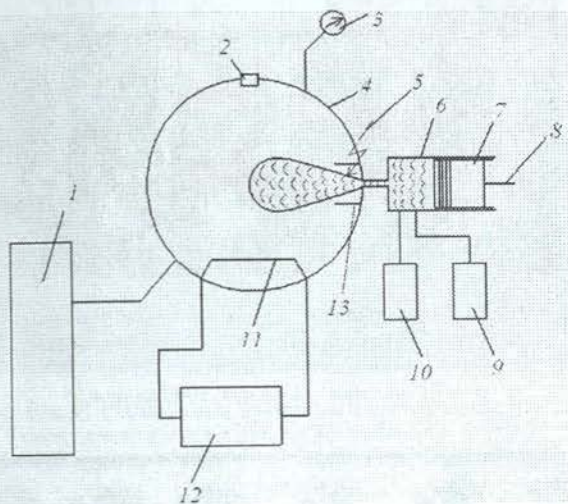


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — баллон со сжатым воздухом; 2 — термopapa; 3 — манометр; 4 — камера сгорания; 5 — свеча зажигания; 6 — компрессор-форсунка; 7 — нагнетательный поршень компрессор-форсунки; 8 — привод компрессор-форсунки; 9 — система подачи топлива; 10 — система подачи воздуха; 11 — нагревательный элемент; 12 — источник питания нагревательного элемента; 13 — предкамера

TM-6740GE — монохромная VGA камера:

- скорость съемки: 200 кадров в секунду при полном сканировании 640x480 и до 3205 кадров в секунду при частичном сканировании;

- выдержка до 1/64000 секунды.

Камера соединена с ПК посредством сети Gigabit Ethernet. Управление камерой осуществляется посредством программного обеспечения, которое позволяет устанавливать выдержку кадра, скорость съемки, режим просмотра и т. д. Камера имеет внутреннюю память кадров и посылает только текущие данные изображения через интерфейс Gigabit Ethernet. Данные видеозаписи посылаются как IP-пакеты. Камера позволяет проводить синхронизацию по внешним или внутренним сигналам.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовались следующие топлива: бензин, дизельное топливо и

50% водный раствор этанола. Выбранные термодинамические параметры в бомбе ($P = 1$ МПа, $T = 140^\circ\text{C}$) соответствуют приблизительно степени сжатия воздуха равной 7, с начальной температурой -30°C . Температура воздуха в компрессор-форсунке и температура топлива соответствовала $+20^\circ\text{C}$. Коэффициент избытка воздуха в компрессор-форсунке составлял приблизительно 0,01–0,03 единицы. Впрыск производился в неподвижную среду. Соотношение масс впрыскиваемого топлива и воздуха в бомбе варьировалось таким образом, что среднеинтегральный по объему бомбы коэффициент избытка воздуха составлял 6 и 20 единиц. Для каждого значения α определялся диапазон воспламенения, сопоставляемый с продолжительностью впрыскивания. Исследование процессов воспламенения и горения топливовоздушных струй проводилось в условиях цилиндрической предкамеры. Воспламенение или пропуски определялись визуально или при помощи скоростной видеосъемки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воспламенение и последующее сгорание в условиях высоких коэффициентов избытка воздуха будет возможно, если будет воспламеняться топливовоздушная струя, еще не успевшая распространиться по всему объему камеры сгорания, т. е. если организовать горение предварительно перемешанной (или частично перемешанной смеси). Степень расслоения топливовоздушного заряда в данном случае будет определяться моментом воспламенения струи — чем ближе к началу впрыска, тем расслоение больше. В условиях двигателя необходимая ее величина будет различной в зависимости от газодинамической обстановки в рабочей камере, частоты циклов, нагрузки и т. п. факторов, которые определяются конкретным двигателем и режимом его работы. Поэтому для возможности реализации данной системы в двигателе диапазон воспламенения струи должен быть как можно шире — от близкого к началу впрыска, до его окончания.

Эксперименты показали, что зажигание топливовоздушной струи возможно в достаточно широком диапазоне — начиная с первой трети периода впрыска до момента его окончания. Необходимо отметить, что данный результат получался независимо от вида применяемого топлива.

На рис. 3, 4 представлены видеogramмы процесса впрыскивания и горения при под-

жигании в момент приблизительно середины впрыска. Горение на обоих рисунках начинается на четвертом кадре. Видно, что охват пламенем топливовоздушной струи происходит довольно быстро (в пределах разрешающей способности выбранного режима съемки): 3 кадр — воспламенения еще не произошло, а на четвертом кадре пламенем охвачена уже вся струя. В дальнейшем происходит относительно медленное диффузионное горение. Для наглядности на рис. 5, 6 представлены видеогаммы процесса горения в районе сопла предкамеры в увеличенном масштабе. Для получения более четких кадров горения подсветка была отключена, поэтому несгоревшую топливовоздушную струю не видно.

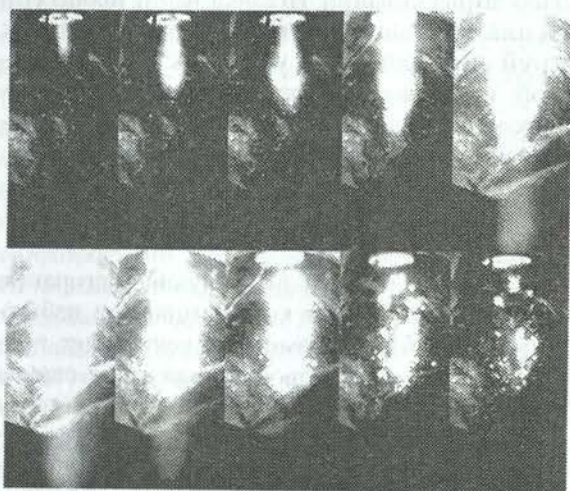


Рис. 3. Регистрация процесса горения топливовоздушного факела: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 6$; топливо — бензин; 1000 кадров/с

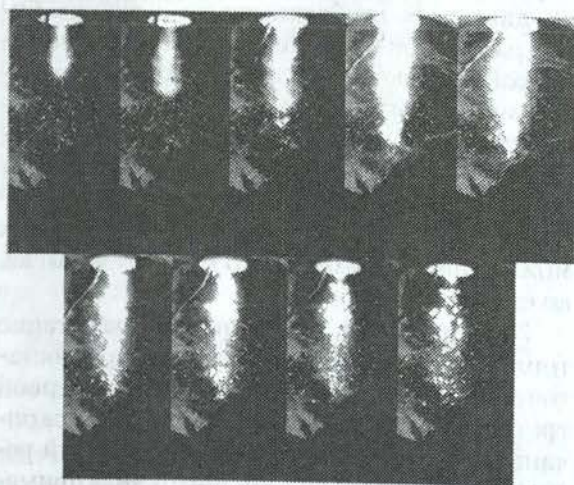


Рис. 4. Регистрация процесса горения топливовоздушного факела: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 6$; топливо — дизельное; 1000 кадров/с

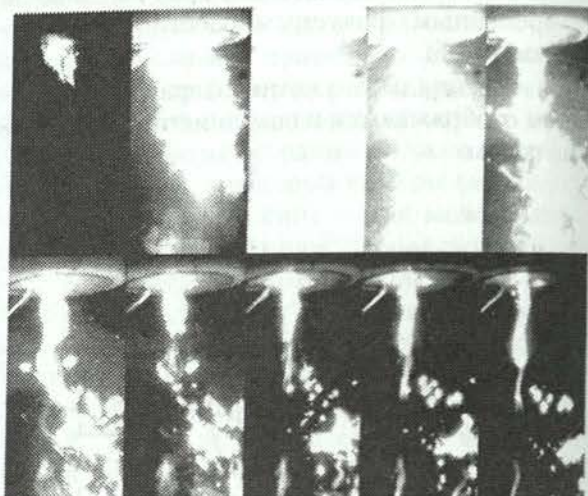


Рис. 5. Регистрация процесса горения топливовоздушного факела вблизи сопла предкамеры: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 6$; топливо — бензин; 1000 кадров/с

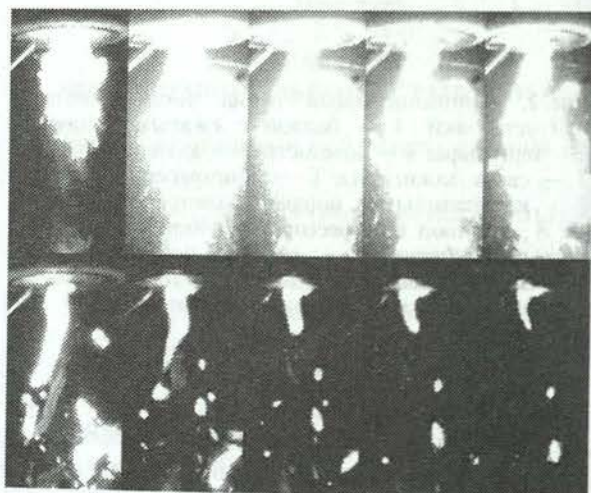


Рис. 6. Регистрация процесса горения топливовоздушного факела вблизи сопла предкамеры: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 6$; топливо — 50% (по массе) водный раствор этанола; 1000 кадров/с

На рис. 7 представлены видеогаммы процесса впрыскивания и горения при поджигании приблизительно в первой трети периода впрыска. Среднеинтегральный по объему бомбы коэффициент избытка воздуха составляет 20 единиц.

На рис. 8 представлены видеогаммы процесса впрыскивания и горения при поджигании после окончания впрыска. Топливоздушная струя уже успела перемешаться с окружающим воздухом, и концентрационный состав вышел за пределы распространения пламени. Но интересный факт: видно (кадры 4–9), что воспламенение и горение вбли-

зи сопла предкамеры происходит даже в этих условиях.

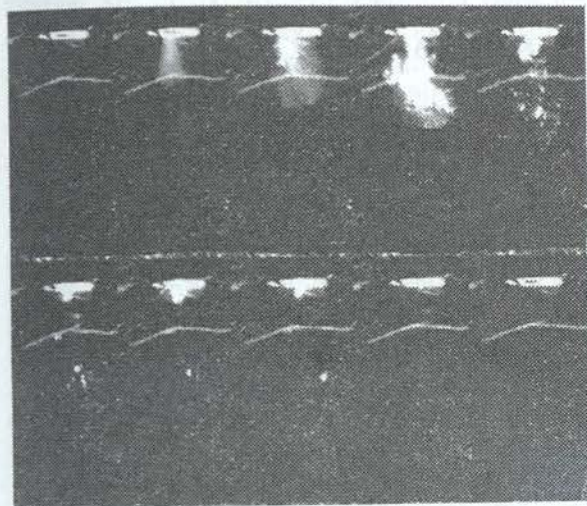


Рис. 7. Регистрация процесса горения топливо-воздушного факела: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 20$; топливо — бензин; 1000 кадров/с

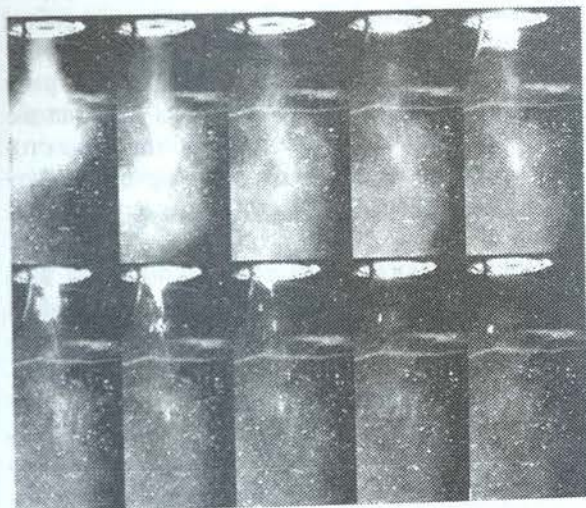


Рис. 8. Регистрация процесса горения топливо-воздушного факела: давление в «бомбе» 1 МПа; температура 140°C; $\alpha \approx 6$; топливо — дизельное; 1000 кадров/с; зажигание после окончания впрыска

Таким образом, показано, что предкамера может играть роль стабилизатора состава и скорости смеси в зоне вокруг электродов свечи и тем самым способствовать падению воспламенению электрической искрой впрыскиваемой ТВС. За счет этого появляется возможность достижения коэффициентов избытка воздуха, соответствующих дизельным двигателям, при использовании различных топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галиев, Р. А.** Воспламенение топливо-воздушного факела искрой в двигателях внутреннего сгорания : дис. ... канд. техн. наук / Р. А. Галиев. Уфа: УАИ, 1994. 130 с.
2. **Гарипов, М. Д.** Унифицированный рабочий процесс поршневых ДВС : дис. ... канд. техн. наук / М. Д. Гарипов. Уфа, 2004. 105 с.
3. **Гарипов, М. Д.** Влияние степени сжатия и способа регулирования нагрузки на эффективные показатели поршневых ДВС / М. Д. Гарипов, Р. Ю. Саккулин // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 54–57.
4. **Еникеев Р. Д.** Рабочий процесс перспективного поршневого ДВС / Р. Д. Еникеев, М. Д. Гарипов // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 3. С. 12–22.
5. **Рудой, И. Б.** Высокочастотный впрыск малых цикловых доз топлива : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1987. 130 с.
6. **Стечкин, Б. С.** Избранные труды. Теория тепловых двигателей / Б. С. Стечкин. М. : Физматлит, 2001. 432 с.

ОБ АВТОРАХ



Гарипов Марат Данилович, ст. преп. каф. ДВС. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. перспективных рабочих процессов ДВС, биотоплив.



Гарипов Кирилл Назифович, лаб. той же каф. Дипл. бакалавр техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. перспективных рабочих процессов ДВС, биотоплив.



Хафизов Амир Гуддулович, лаб. той же каф. Дипл. бакалавр техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. перспективных рабочих процессов ДВС, биотоплив.