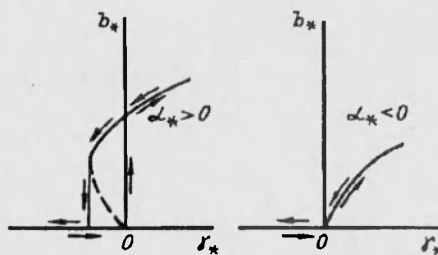


Рис. 4. Зависимость амплитуды автоколебаний от параметров периодического воздействия.



Для $\alpha_* < 0$ при переходе значения γ_* через нуль амплитуда автоколебаний плавно нарастает от нулевого значения, при $\gamma_* < 0$ процесс горения устойчив независимо от начальных условий. Устойчивость горения при отсутствии внешнего воздействия ($p_0 = 0$) выражается неравенством

$$\gamma_0 = \lambda_1 - \lambda_2 < 0.$$

Таким образом, асинхронное возбуждение процесса горения наблюдается при выполнении следующих условий:

$$\gamma_0 < 0, \gamma_* > 0.$$

В этом случае процесс устойчив, при подаче внешнего периодического воздействия возникают автоколебания. Из (8) и (9) вытекает априори и возможность асинхронного гашения автоколебаний, если

$$\gamma_0 > 0, \gamma_* < 0.$$

Анализ неравенства (10) показывает, что наиболее вероятно эффекты нелинейного взаимодействия периодических возмущений давления и зоны горения проявятся при $\lambda_1 - \lambda_2 \sim 0$, т.е. вблизи границы устойчивости процесса горения.

Итак, в работе описан эффект асинхронного возбуждения высокочастотного горения при периодическом изменении площади критического сечения сопла ЖРД. Дан феноменологический подход к описанию данного явления на основе метода асимптотических приближений.

Автор выражает глубокую признательность Ю.И. Бабенко за обсуждение результатов и ряд ценных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харрье Д.Т., Рирдон Ф.Г. Неустойчивость горения в ЖРД. — М.: Мир, 1975.
2. Дорошенко В.Е. и др. О двух режимах работы модельной камеры сгорания, как термоакустической автоколебательной системы // ПМТФ. — 1967. — № 1. — С. 64—70.
3. Каудерер К. Нелинейная механика. — М.: ИЛ., 1961.
4. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1958.

197198, г. С.-Петербург,
РНЦ «Прикладная химия»

Поступила в редакцию
8/IV 1994

УДК 621.43.019.2

В.К. Баев, А.А. Бузуков, Б.П. Тимошенко

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ СО СТЕНКОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Экспериментально на безмоторной установке исследована зависимость периода задержки воспламенения и предельной температуры вспышки топливовоздушной смеси от геометрических характеристик стенки камеры сгорания дизеля, на которую падает высокоскоростная струя. Показано, что для улучшения воспламеняемости в условиях, характерных для пусковых

© В.К. Баев, А.А. Бузуков, Б.П. Тимошенко, 1995.

режимов работы дизеля, предпочтительны скользящий характер взаимодействия струи с поверхностью при первичном касании и резкий разворот потока смеси в зоне ее обратного выброса в свободный объем камеры сгорания. Наблюдаемые эффекты объясняются дополнительным подогревом смеси от резкого торможения и накоплением ее в подогретом состоянии в окрестности точки стагнации.

Совершенствование процесса сгорания топлива в дизелях — наиболее перспективное направление работ по повышению их экономичности и экологичности [1]. Характер этого процесса в значительной мере определяется качеством смесеобразования и предпламенной подготовки топлива, зависящим кроме всех прочих условий от формы камеры сгорания (КС) двигателя. Однако разнообразие форм КС эксплуатируемого парка дизелей [2] свидетельствует о том, что практически не удастся выработать единый подход к их проектированию из-за большого различия в мощности двигателей, их назначении, размерности и организации рабочего процесса. Поэтому на первом этапе опытно-конструкторские разработки ведутся обычно с использованием лишь некоторых общих принципов, а наиболее трудоемкая часть работы падает на доводочные испытания.

Оптимизацию процессов смесеобразования и тепловыделения в значительной мере обеспечивает равномерное распределение топлива по объему КС [3, 4]. Это, по мнению исследователей, способствует более полному сгоранию смеси, снижению дымности, сажеобразования и др. Но практическая реализация этого принципа затруднена, поскольку сам процесс развития струи предопределяет пространственную и временную неоднородность распределения топливного компонента в ее теле [5]. Этот фактор усугубляется тем, что в зависимости от режима работы двигателя (пусковой, частичной или полной нагрузки и др.) динамика смесеобразования меняется. Кроме того, КС не может быть сделана достаточно просторной из-за необходимости достижения степени сжатия, требуемой условиями форсирования двигателя по мощности. Особенно неблагоприятно на процесс выгорания смеси действует то, что основная его фаза приходится на то время, когда головная часть струи достигает стенки КС [6], а само ее развитие идет в стесненных условиях. Это означает, что практически всегда часть топлива оседает на стенках КС и полностью не сгорает даже на поздних стадиях процесса в условиях дефицита окислителя. Поэтому, хотя до настоящего времени и не прекращаются попытки чисто конструктивно решить проблему равномерного распределения топлива по объему КС [7, 8], основные надежды все же возлагаются на интенсификацию движения воздушного заряда в целях обеспечения лучшего перемешивания распыленного топлива с воздухом.

Альтернативой рассматриваемым случаям является организация так называемого М-процесса [9], при котором 95 % всего впрыскиваемого топлива попадает на горячую стенку КС, чем обеспечивается полностью пленочный режим смесеобразования. Такой рабочий процесс характеризуется мягкостью сгорания за счет постепенного испарения топлива с поверхности стенки, но очевидно, что для работы быстроходных форсированных дизелей он неприемлем из-за своей инерционности, поэтому наиболее рациональной считается организация полностью объемного или хотя бы объемно-пленочного режима смесеобразования.

Особо следует отметить отрицательное влияние пленочного смесеобразования на пусковые характеристики двигателей. В данном случае первичное воспламенение может обеспечиваться только той частью впрыснутого топлива, которая зависла в объеме, так как испарение попавшего на холодную стенку КС настолько затруднено, что для него оказывается вредным даже сносящее движение воздушного заряда [10]. С другой стороны, именно на пусковых режимах (слабая компрессия, вялый впрыск и др.) тип смесеобразования наиболее близок к пленочному.

Таким образом, учитывая то, что практически в любом случае нежелательный процесс взаимодействия струи топливовоздушной смеси со стенкой КС имеет место, можно поставить вопрос об его оптимизации. Определенные проработки в этом направлении имеются. С одной стороны, решение

задачи видится в пассивном сокращении времени контакта струи со стенкой или путем устройства в ней каких-либо ниш или выемок [11], или путем создания причудливых форм КС [12]. С другой стороны, разработаны предложения об активном воздействии на струю смеси с помощью, например, сепараторов, разделяющих осевую и периферийную часть струи [13]. К числу таких предложений об активном воздействии на струю топливовоздушной смеси относится и использование так называемого «эффекта вторичного смесеобразования» [14]. Суть этой разработки заключается в том, что стенка КС в месте падения на нее струи профилируется так, чтобы топливовоздушный поток разворачивался обратно в свободное пространство КС и одновременно с этим осуществлялось дополнительное дробление капель топлива.

Идея установки механических отражателей для изменения направления движения струи в целях улучшения воспламеняемости и сгорания топлива уже высказывалась [15]. Но для осмысленной ее реализации необходимы четкие представления и о гидродинамическом механизме процесса взаимодействия высокоскоростной газожидкостной струи с преградой, и о влиянии особенностей такого течения на воспламенение и горение смеси. Однако таких исследований до настоящего времени проводилось сравнительно мало, и их результаты не позволяют достаточно надежно прогнозировать характеристики указанных процессов. Так, например, в [16] и в некоторых других работах оценивается степень влияния стесненности КС на геометрические характеристики струи и лишь косвенно на процесс ее сгорания. В [17] экспериментально путем визуализации зон контакта струи со стенкой КС продемонстрирована возможность некоторого улучшения экономичности дизеля за счет конструктивных решений, направленных на сокращение этих зон.

В [18] наоборот представлены результаты исследования, в котором качественно изучены особенности образования пленки топлива на стенке модели КС, благоприятствующие реализации М-процесса.

Наиболее информативный материал представлен в [19], где изучено изменение контуров импульсной струи топливовоздушной смеси при нормальном ее падении на плоскую стенку, характер растекания смеси по поверхности и плотность распределения капель в потоке. При этом авторами обнаружено появление зон рециркуляции в растекающемся по поверхности стенки газокпельном потоке. Полученные результаты уже позволяют в определенной степени судить о характере течений, развивающихся в случае взаимодействия струи смеси со стенкой КС. Но вопросы, связанные со влиянием такого течения на воспламенение и сгорание смеси, остаются по-прежнему открытыми.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, в которых изучалось воспламенение топливовоздушной смеси в условиях активного взаимодействия ее струи с преградами различных конфигураций. При этом условия проведения опытов были выбраны такими, чтобы они в основном соответствовали пусковым режимам работы дизельного двигателя. Цель исследования — нахождение оптимальных геометрических характеристик стенки, при которых наблюдается улучшение воспламеняемости смеси.

Эксперименты проводились на установке, работа которой подробно описана в [20]. Основной элемент установки — камера сгорания постоянного объема, наполняемая сжатым и подогретым воздухом (исходная температура T_0 в опытах менялась от 550 до 950 К, а статическое давление $p_0 = 0,9, 1,7$ или $2,5$ МПа). С помощью штатной дизельной форсунки, вмонтированной в боковую стенку камеры (рис. 1) и оснащенной однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,4 мм, осуществлялся единичный впрыск дизельного топлива марки ДЛ. Давление в топливной системе создавалось под действием плунжерного насоса, кулачковый вал которого вращался со скоростью 125 об/мин. Эюра давления p_f , записанная пьезоэлектрическим датчиком ЛХ-600, установленным на топливоподающей магистрали в 100 мм от форсунки (на рис. не указан), приведена на

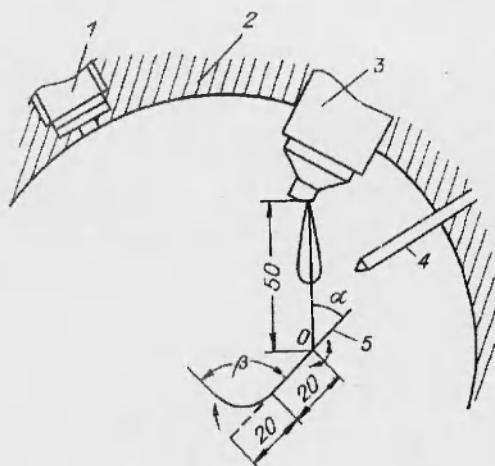


Рис. 1. Схема проведения экспериментов.
1 — датчик давления, 2 — камера сгорания, 3 — форсунка, 4 — термопара, 5 — пластина.

рис. 2, а. Измеренное весовым методом значение цикловой подачи составляло 90 мг и от одного впрыска к другому оно менялось не более чем на 3 %. Исходные температура и давление в среде непосредственно перед впрыском топлива фиксировались термопарой, установленной в 15 мм от оси струи, и образцовым манометром с инструментальной погрешностью 2 %.

Для изучения процесса воспламенения топливовоздушной смеси при взаимодействии ее струи со стенкой КС на некотором отдалении от сопла распылителя устанавливалась стальная пластина (см. рис. 1), поворотом которой вокруг оси 0 обеспечивался тот или иной угол встречи α , менявшийся в различных опытах от 15 до 90°. Дальний от точки пересечения оси 0 с осью струи участок пластины протяженностью 40 мм разделен на две равные части. Верхняя плоская естественно продолжает поверхность, на которую падает струя. Нижняя плавно загибается так, чтобы обеспечивался вторичный выброс скользящего по пластинке потока смеси в свободный объем КС под углом разворота β (в разных опытах менялся от 180 до 45°). При этом радиус закругления здесь автоматически определялся значением угла β и длиной дуги 20 мм.

Эффективность воздействия имитатора стенки КС на воспламеняемость струи топливовоздушной смеси оценивалась по двум критериям [21]. Первый — период задержки воспламенения (ПЗВ) — имеет строгий физический смысл для простых реакций, когда кинетические зависимости полностью определяются законом Аррениуса и для определения ПЗВ может быть использовано широко известное уравнение, построенное на базе модели теплового воспламенения гомогенных газовых смесей:

$$\tau_i = A p_0^{1-\nu} \exp(E/RT_0)$$

где p_0 и T_0 — исходные давление и температура смеси перед началом процесса, ν — суммарный порядок реакции окисления, R — универсальная газовая постоянная, A — размерный коэффициент, E — энергия активации.

При изучении процесса самовоспламенения в условиях работы дизелей традиционно принято описывать ПЗВ жидких углеводородных топлив, распыляемых в среде нагретого окислителя, такой же по форме зависимостью [22], но в качестве E используется собирательное понятие эффективной энергии активации E_e . Это связано со сложным многоступенчатым и порою неоднозначным характером протекания химической реакции, зависящим как от условий в среде, так и от хода процесса смесеобразования.

Второй критериальный параметр — предельная температура самовоспламенения T_i — означает, что при любых условиях эксперимента существует температура, ниже которой никаких процессов, свидетельствующих о начале воспламенения в КС, зафиксировать не удастся. При этом визуальные наблюдения показывают, что при исходной температуре воздуха, несколько меньшей T_i , топливо все же может загораться, но это обычно происходит на стенке КС и с большим (порядка долей секунды) временем индукции. Такой процесс продолжается долго с обильным сажевыделением, т.е. происходит обычное диффузионное горение топлива на орошенной им поверхности (это, кстати, не имеет отношения к М-процессу). А при пере-

Рис. 2. Эпюры давления в топливной системе (а) и в свободной камере сгорания (б) при температуре воздуха 800 К.

p_0 , МПа: 1 - 2,5, 2 - 1,7, 3 - 0,9.

ходе через T_i первоначальная вспышка возникает именно в объеме КС. Переход через температурный рубеж T_i характеризуется появлением заметного всплеска давления в КС, регистрируемого датчиком ЛХ-601, установленным в стенке камеры (рис. 1). Именно это наблюдение использовалось в опытах для определения пороговой температуры воспламенения.

В настоящей работе ПЗВ измеряли путем синхронной записи эпюр давления в топливной системе p_f и в камере сгорания p_c (рис. 2). ПЗВ определялся как интервал времени между началом поступления топлива в объем и моментом подъема в нем давления, вызванного начинающимся тепловыделением [20]. Для отождествления начала впрыска с формой эпюры давления в топливной системе (запорный клапан в распылителе срабатывал при достижении давления 20 МПа) проводилось специальное исследование и этот момент в ходе экспериментов надежно фиксировался (стрелка на рис. 2, а). Таким образом, процедура определения ПЗВ ясна из рисунка.

Точность изменения временных интервалов составляла 5 %, но основная погрешность, возникающая при определении ПЗВ, вызвана нестабильностью термохимических процессов в этом отрезке времени. Поэтому в целях повышения надежности получаемых результатов τ_i измеряли через каждые 5 К и как минимум дважды при «прогоне» температуры сверху вниз и обратно при постоянном давлении в среде p_0 . Затем полученные значения ПЗВ усреднялись в диапазоне $T_0 \pm 15$ К. Оценка показывает, что благодаря такой процедуре обработки экспериментальных данных, относительная по-

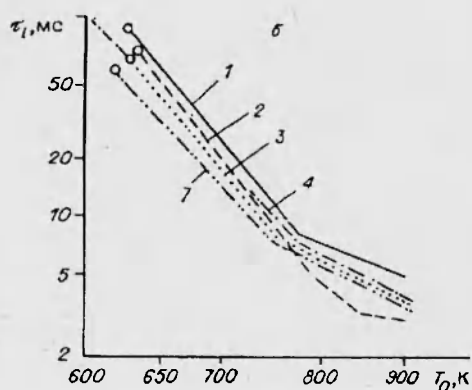
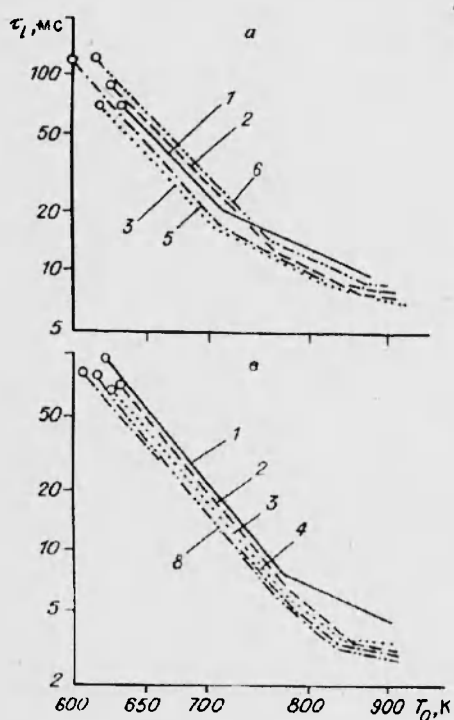
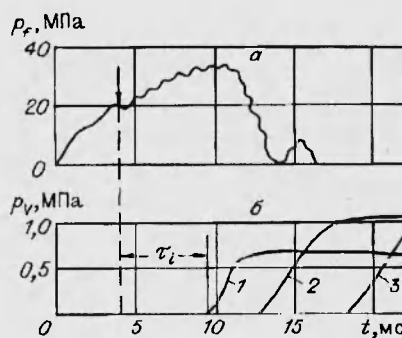


Рис. 3. Зависимость периода задержки воспламенения от температуры среды для давлений в КС — 0,9 (а), 1,7 (б) и 2,5 МПа (в). Углы падения и разворота струи, град. 1 - свободная камера, 2 - 45 и 180, 3 - 30 и 45, 4 - 75 и 45, 5 - 30 и 90, 6 - 45 и 60, 7 - 15 и 45, 8 - 45 и 45.

решность измерений во всем исследовавшемся диапазоне параметров не превышала 10 %. Интервал времени между отдельными впрысками топлива составлял 30 ± 40 с, что обеспечивало надежную продувку камеры от продуктов сгорания и выравнивание температуры воздуха в ней и температуры пластины — имитатора стенки КС.

На рис. 3 приведены наиболее характерные зависимости ПЗВ от температуры среды при различных давлениях в ней. На графиках с учетом структуры указанной выше формулы данные представлены в координатах, в которых ось ординат линейна относительно $\ln \tau_i$, а ось абсцисс — относительно обратной температуры среды. Качественное рассмотрение полученных зависимостей показывает, что они независимо от условий экспериментов представляют собою низко- и высокотемпературные ветви [20, 21]. В низкотемпературном диапазоне (600—750 К) при изменении давления в среде или конфигурации имитатора стенки КС зависимости, являющиеся отрезками прямых, испытывают плоскопараллельный сдвиг. Поэтому линии на всех графиках имеют одинаковый наклон и с учетом этого может быть получена однозначная величина эффективной энергии активации $E_e = 70 \pm 5$ кДж/моль.

Правомерность определения этого параметра как химико-энергетической константы рассматриваемого энергоносителя оправдана тем, что при низкой температуре среды процесс смесеобразования, включающий распыление, прогрев и испарение необходимого для начала воспламенения количества топлива, завершается относительно быстро. А основное время, входящее в ПЗВ, тратится на развитие предпламенных термохимических процессов в квазиравновесной системе пары топлива — воздух. Это, кстати, не исключает диффузионного догорания остатков капель топлива. В высокотемпературном диапазоне (750—950 К) однозначное определение E_e невозможно, и вообще эта процедура здесь некорректна в связи с тем, что в этом случае ПЗВ сравним со временем формирования реакционноспособной смеси и макрокинетические явления в виде продолжающегося интенсивного перемешивания компонентов активно вмешиваются в ход молекулярно-кинетических превращений. При этом, чем ниже давление в среде и соответственно с этим выше местные скорости движения потока смеси, тем более замедляется процесс самовоспламенения.

На рис. 3 для каждой серии опытов точками отмечены значения предельных температур самовоспламенения T_i . Как отмечено выше, значения T_i определены с предельно возможной точностью до 5 К.

Но, что касается ПЗВ, соответствующих этим пороговым температурам, то их оценка оказалась практически невозможной ввиду большого разброса значений τ_i , достигающего 40 %. А при температурах среды, даже на 10 К превышающих предельную, измерения ПЗВ становятся вполне надежными. Чтобы наглядно охарактеризовать влияние углов α и β на T_i на рис. 4 приведены зависимости от этих параметров значений относительного снижения пороговых температур самовоспламенения $\Theta = (T_{i0} - T_i)/T_{i0}$, где T_{i0} — предельная температура самовоспламенения при впрыске топлива в свободную КС.

Для получения сравнительных количественных данных на рис. 3, 1 отображены опорные зависимости $\tau_i(T_{i0})$, полученные в тех сериях опытов, где на пути распространения струи топливоздушной смеси отсутствуют какие-либо препятствия (именно для этого случая определены значения T_{i0}). Остальные кривые соответствуют наиболее характерным результатам опытов с использованием имитаторов стенки КС различной конфигурации. Эксперименты показывают, что влияние процесса взаимодействия струи смеси с преградой на воспламеняемость оказывается различным в зависимости от температуры среды.

В высокотемпературном диапазоне значения τ_i снижаются по сравнению с опорными данными тем более заметно, чем выше исходное давление

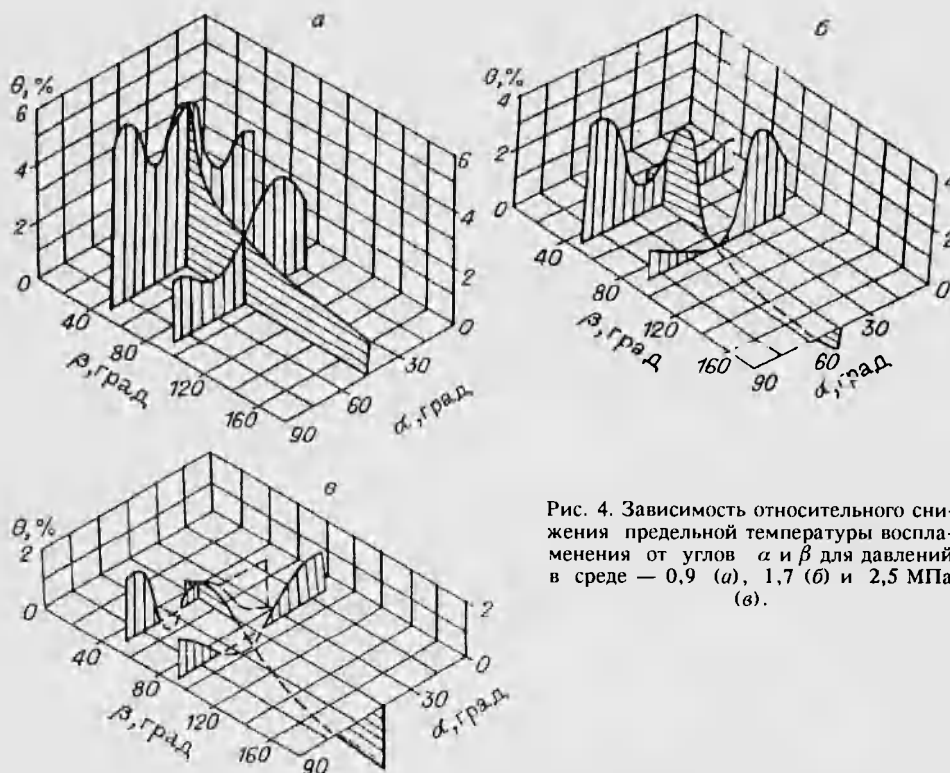


Рис. 4. Зависимость относительного снижения предельной температуры воспламенения от углов α и β для давлений в среде — 0,9 (а), 1,7 (б) и 2,5 МПа (в).

воздуха в КС. Так, при $T_0 = 850$ К и $p_0 = 0,9$ МПа ПЗВ уменьшается на 15 %, при $p_0 = 1,7$ МПа снижение составляет 25 %, а при $p_0 = 2,5$ МПа оно оказывается двукратным. Но установить какую-либо систематическую зависимость этого эффекта от углов α и β здесь трудно, так как полученные при наличии отражающих струю пластин различной формы кривые лежат довольно кучно. Основная причина уменьшения ПЗВ — дополнительный адиабатический подогрев смеси от торможения при натекании головной части струи на преграду. При сравнительно высокой начальной температуре среды такого подогрева оказывается достаточно для ускорения воспламенения. Подтверждение тому — такое же снижение при использовании развернутой пластины с $\beta = 180^\circ$ (рис. 3, 2). В пользу указанного довода говорит и то, что ПЗВ, достигнув при определенных условиях своего минимального значения ~ 3 мс, стабилизируется. Одновременно с этим, если ПЗВ при других условиях не опускается до такого же минимального значения, традиционная зависимость $\tau(T_0)$ сохраняется. Такой же результат наблюдался ранее [23], и он объясняется тем, что в данном случае ПЗВ определяется лишь временем пролета головной части струи до препятствия, а не временем термохимического процесса, который в свободной струе развивается более медленно.

При понижении исходной температуры ниже 750 К взаимное расположение зависимостей на графиках меняется и оно оказывается связанным как с давлением в КС, так и с геометрическими характеристиками преграды. При $p_0 = 0,9$ МПа в зависимости от комбинации углов α и β может наблюдаться как превышение значений ПЗВ над опорными, так и их снижение (см. рис. 3, а). Увеличение ПЗВ происходит при углах встречи α и рассеяния β , превышающих 45 и 90° соответственно. Это означает, что для процесса самовоспламенения оказываются неблагоприятными жесткое столкновение струи с поверхностью и малоинтенсивный вторичный разворот потока, скользящего по поверхности пластины. Оптимальным в смысле снижения ПЗВ оказался вариант $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$ (см. рис. 3, 3): в интервале температур от 630 до 700 К τ уменьшается на 40 %.

Объяснить полученные результаты можно следующим образом. При впрыске топлива в среду с относительно низким давлением струя смеси имеет высокую скорость продвижения и малый угол конусности, представляя собою высокоскоростной газожидкостный боек со значительной плотностью содержащегося в его теле топливного компонента. При ударе о преграду под тупым углом в зоне торможения возникают повышенные давление и температура. Но определяющим в данном случае является быстрый разброс подогретой смеси в стороны и новое ее охлаждение, благодаря чему разрушаются уже возникшие зоны, в которых начинается процесс подготовки к воспламенению. В результате этого условия для самовоспламенения в целом ухудшаются и ПЗВ возрастает (максимальное увеличение составило 30 %, рис. 3, б). Этому же способствует еще и то, что в теле такой компактной струи не распространяются акустические возмущения от точки стагнации [5], которые могли бы интенсифицировать процесс перемешивания и дополнительного разогрева смеси [24]. Отсюда очевидно, что значительная деформация и разрушение структуры сложившегося однонаправленного потока при первичном относительно жестком натекании его на препятствие приводит к тому, что влияние угла β уже оказывается несущественным, что хорошо подтверждается экспериментально.

Если же высокоскоростная компактная струя падает на поверхность под острым углом ($\alpha = 15 \div 30^\circ$), то ее разрушение минимально и поток течет вдоль стенки с малыми потерями. Основную роль здесь играет вторичное взаимодействие его с конечным участком пластины, служащим для обратного выброса смеси в КС. Если пластина развернута на угол $\beta = 100 \div 180^\circ$, то в целом эффективность воздействия такой преграды на воспламенение мала и сколь-нибудь заметного отклонения измеренных значений ПЗВ от опорных не обнаруживается. Но при $\alpha = 45 \div 60^\circ$ конечный участок пластины превращается в «ловушку». Она быстро заполняется сжатой и подогретой за счет торможения последующих набегающих слоев смесью, благодаря чему в ней создаются и в течение некоторого времени поддерживаются условия для наблюдаемого на опыте ускорения воспламенения.

Описанной физической картине отвечают также и графики рис. 4, а. Наибольшее падение предельной температуры вспышки по сравнению с T_0 , составляющее 6 %, действительно получено при малых α и β . Но заметный положительный результат наблюдается и при $\alpha = 75 \div 90^\circ$. Этот вариант, как указывалось выше, для снижения ПЗВ не годится, а уменьшение T_i в этом случае связано с постепенным накапливанием (длительность впрыска 10 мс) разбрасываемой и подогретой от первичного соударения смеси в окрестности точки торможения до состояния, необходимого для самовоспламенения.

При более высоком давлении в среде, чем в рассматриваемом выше случае, характер развития струи топливовоздушной смеси меняется. Скорость ее продвижения падает, струя становится более широкой и рыхлой и в ней начинает проявляться «свойство продольной упругости» [5], т.е. возможность обмена квазиакустическими волнами сжатия между головной и тыловой ее частями. В результате разброс подогретого сжатия материала струи меньше и, таким образом, наблюдается снижение ПЗВ только за счет первичного соударения. При этом лучший эффект достигается при более жестком столкновении струи с преградой независимо от угла β (см. рис. 3, 4). Но все же оптимальным, как показали опыты, является вариант, когда первичное столкновение происходит под острым углом, а после скольжения по поверхности струя попадает в ловушку. В экспериментах показано, что в диапазоне температур 650—750 К и при давлениях в среде 1,7 и 2,5 МПа лучшие результаты по снижению ПЗВ на 40 и 30 % соответственно получены при $\alpha = 15 \div 30^\circ$ и $\beta = 45 \div 60^\circ$ (см. рис. 3, 7, 8).

Из рис. 4, б, в следует, что падение температуры вспышки на 4 и 2 % соответствует уже указанным выше условиям. Но не меньшие значения Θ получены и при жестком первичном столкновении, т.е. при $\alpha = 75 \div 90^\circ$, хотя снижение ПЗВ здесь не максимально. Объясняется это как и раньше

тем, что ведущим механизмом снижения T_i в данном случае становится процесс накопления подогретой смеси, разбрасываемой с места натекания струи на преграду в окрестности точки торможения.

По-видимому таким же накопительным процессом, ведущим к заметно-му улучшению воспламеняемости, объясняется особо выделяющийся результат, полученный при $p_0 = 1,7$ МПа и $\alpha = 30^\circ$, но при $\beta = 90^\circ$ (см. рис. 4, б). Здесь первичный скользящий удар струи по преграде как обычно не приводит к нарушению целостного потока. Поэтому, сохранив компактность и высокую интенсивность своего движения, струя не задерживается в ловушке, а выбрасывается после вторичного взаимодействия с поверхностью, т.е. в полной мере реализуется эффект вторичного смесеобразования [14]. В результате для рассматриваемого варианта наблюдается и относительно высокое значение $\Theta = 3,5$ % и ПЗВ уменьшается на 25 %.

Данные, представленные на рис. 4, показывают, что при некоторых условиях в зависимости от конфигурации рабочей поверхности пластины могут наблюдаться и повышение предельных температур вспышки по сравнению с вариантом свободного развития струи. И чем выше исходное давление в среде, тем менее ярко выражается эффект снижения T_i под влиянием процесса перестроения структуры потока смеси. Это связано с падением общей скорости движения струи, интенсивности ее взаимодействия с преградой и соответственно температуры дополнительного разогрева при торможении. Но указанная тенденция к ухудшению воспламеняемости еще не говорит о том, что она будет сохраняться при переходе режима работы двигателя к номинальному, так как в данном случае впрыск топлива оказывается существенно более интенсивным.

Обобщая результаты проведенного исследования, можно сделать следующие основные выводы. Использование эффекта вторичного смесеобразования позволяет повысить воспламеняемость топливовоздушной смеси в условиях, соответствующих пусковым режимам работы дизельного двигателя. Реализация этого эффекта достигается путем такого профилирования поверхности стенки камеры сгорания в месте падения на нее струи смеси, при котором ее поток претерпевает благоприятные для самовоспламенения изменения скорости и направления движения. Улучшение воспламеняемости проявляется в снижении периода задержки воспламенения и нижней предельной температуры самовоспламенения смеси по сравнению со случаем свободного и беспрепятственного развития струи. И наоборот, падение струи на стенку КС, форма которой не является в данных условиях оптимальной, может привести к ухудшению воспламеняемости.

Основным физическим механизмом, через который осуществляется влияние процесса натекания струи смеси на преграду, является локальное повышение давления и температуры в зоне торможения и разворота потока. При этом важны как само повышение температуры, приводящее к активизации химико-кинетических процессов, так и время выдержки определенного объема дополнительно подогретой смеси, необходимое для накопления необходимой концентрации активных центров.

Рассмотрен один из вариантов профилирования стенки КС для реализации активного механического воздействия на струю топливо-воздушной смеси. Чисто геометрически его можно охарактеризовать двумя определяющими параметрами — углом α первичного падения струи на поверхность КС и углом β вторичного разворота потока смеси для выброса ее в свободное пространство. Показано, что при углах α близких к прямому (жесткое столкновение струи с поверхностью), в основном наблюдается падение температуры воспламенения смеси при мало меняющемся ПЗВ, что объясняется процессом постепенного накапливания подогретого от резкого торможения горючего в окрестности места столкновения. Влияние угла β в данных условиях оказывается незначительным. При скользящем первичном взаимодействии с поверхностью препятствия струя без больших потерь достигает места вторичного разворота и тогда влияние угла β становится определяющим. В этом случае удается существенно снизить и температуру

вспышки и ПЗВ, если изгиб поверхности пластины образует подобие лопушки ($\beta = 30 + 60^\circ$).

Наиболее яркие результаты получены в опытах при исходном давлении в среде 1,7 МПа и в диапазоне температур $T_0 = 630 + 750$ К, где ПЗВ снижается на 40 % при оптимальных углах падения и рассеяния струи 15 и 45° соответственно, а при $p_0 = 0,9$ МПа относительное снижение предельной температуры самовоспламенения на 5,5 % (т.е. с 635 до 600 К) достигнуто при $\alpha = 75^\circ$ и $\beta = 45^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Б.Н., Иванченко Н.Н. Задачи повышения топливной экономичности дизелей и пути их решения // Двигателестроение. — 1990. — № 11. — С. 3—7.
2. Каныш В.В., Токарь В.В. Камеры сгорания дизелей и направления их совершенствования / Обзор литературных источников. — Волгоград: Волг. политех. ин-т, 1991. — 96 с. — Деп. в ЦНИИТЭИавтосельхозмаш 25.02.91, № 1386-тс 91.
3. Васильев Ю.А., Вейнблат М.Х., Липчук В.А. Результаты исследования открытых камер сгорания дизелей типа ЧН 21/21 // Двигателестроение. — 1984. — № 12. — С. 7—9.
4. Прошкин В.Н. Форма камеры сгорания и организация рабочего процесса в дизелях // Двигателестроение. — 1986. — № 3. — С. 10.
5. Баев В.К., Бажайкин А.Н., Бузуков А.А., Тимошенко Б.П. Качественные особенности развития факела при впрыске топлива в среду с противодавлением до 10 атм // ПМТФ. — 1981. — № 2. — С. 66—70.
6. Прошкин В.Н. Рациональное смесеобразование в дизелях и форма камеры сгорания // Двигателестроение. — 1989. — № 8. — С. 6, 7, 36.
7. Кутаев М.М., Касьянов А.В., Завлин М.Я., Сухарев Н.О. Повышение топливной экономичности дизелей Д50 маневровых тепловозов // Двигателестроение. — 1991. — № 8—9. — С. 60, 61.
8. Семенов Б.Н., Прошкин В.Н., Куров В.М. Формы открытых камер сгорания и характеристики рабочих процессов малоразмерных дизелей // Двигателестроение. — 1991. — № 10—11. — С. 4—6.
9. Meurer S. Der Wandel in der Vorstellung vom Ablauf der Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor // MTZ. — 1966. — В. 27, N 4.
10. Степанов В.Н., Шлоссер Б. Экспериментальное подтверждение нецелесообразности вращения заряда в цилиндре дизеля при пуске в условиях низких температур // Двигателестроение. — 1984. — № 9. — С. 5—7.
11. А.с. 1556546 СССР, МКИ F 02 B 23/06. Поршень для двигателя внутреннего сгорания / Филип Альбер Генри Джейн. — Оpubл. 07.04.90. Бюлл. № 13.
12. А.с. 1548483 СССР, МКИ F 02 B 23/06. Камера сгорания дизеля / Б.Н. Файнлейб, В.И. Афанасьев, Ю.Г. Грудский и др. — Оpubл. 07.03.90. Бюлл. № 9.
13. А.с. 1470986 СССР, МКИ F 02 B 23/00. Камера сгорания двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия / М.Я. Завлин, И.М. Айгунова. — Оpubл. 07.04.89. Бюлл. № 13.
14. Баев В.К., Бузуков А.А., Тимошенко Б.П. Эффект вторичного смесеобразования как средство улучшения воспламеняемости смеси в дизеле // Проблемы совершенствования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания: Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф., М., 4—6 фев., 1986. — М.: МАДИ, 1986. — С. 85, 86.
15. А.с. 1097814 СССР, МКИ F 02 B 19/04. Двигатель внутреннего сгорания / С.С. Жилин, Н.Ф. Разлейцев, Л.Т. Жилина, А.И. Филликовский. — Оpubл. 15.06.84. Бюлл. № 22.
16. Лышевский А.С., Мыльнев В.Ф., Сулейманов В.И. Влияние на длину факела стесненности камеры сгорания дизеля, близкой по форме к факелу // Двигателестроение. — 1982. — № 1. — С. 41—43.
17. Быков В.И., Парсаданов И.В., Строков А.П. Экспериментальный метод оценки взаимодействия топлива со стенками камеры сгорания дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. — Харьков: ХПИ, 1987. — Вып. 46. — С. 48—52.
18. Тихомиров Г.З. Исследование процесса взаимодействия струи топлива со стенкой при впрыске в цилиндрическую камеру // Исследование и конструирование топливной аппаратуры дизельных двигателей. — Л.: ЦНИТА, 1983. — Вып. 81. — С. 9—14.
19. Naohito Katsura, Misahiro Saito, Jiro Senda, Hajime Fujimoto. Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall // SAE Techn. Pap. Ser. — 1989. — N 890264. — P. 191—207.
20. Баев В.К., Бажайкин А.Н., Болдырев И.В. и др. Задержка воспламенения бензина при впрыске в модель камеры сгорания дизеля // ФГВ. — 1981. — 17, № 2. — С. 28—35.
21. Бузуков А.А. Промотирующее влияние алкилнитратов на самовоспламенение керосино-воздушной смеси // ФГВ. — 1994. — 30, № 3. — С. 12—20.
22. Семенов В.И. Исследование индикаторного периода задержки воспламенения быстроходного многотопливного дизеля с камерой в поршне // Изв. вузов. Машиностроение. — 1970. — № 1. — С. 81—85.
23. Бузуков А.А., Тимошенко Б.П. Особенности тепловыделения при распыливании топлива в высокотемпературном воздушном заряде // Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла: Тезисы докл. Всесоюз. семинара, Новосибирск, 19—22 июня 1990. — Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1990. — С. 35.

24. Бузуков А.А. Акустический резонанс в камере сгорания ДВС // Динамика сплошной среды: акустика неоднородных сред. — Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 1991. — Вып. 100. — С. 44—50.

630090, г. Новосибирск,
ИТПМ СО РАН

Поступила в редакцию
25/III 1994

УДК 614.841.12

А.Я. Корольченко, А.В. Трунев, Ю.Н. Шебеко,
С.Г. Цариченко, Е.Н. Простов

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В НЕГЕРМЕТИЧНОМ СОСУДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Представлены результаты крупномасштабных экспериментов по горению водородовоздушных смесей на стенде с реакционным сосудом объемом 20 м^3 . Показано, что для быстрогорящих смесей (30 % водорода в воздухе) при расположении сбросного отверстия в непосредственной близости от области локального горения газа удается снизить скорость нарастания давления взрыва и ее максимальную величину. Для медленногорящих смесей (10 % водорода в воздухе) давление уменьшается при расположении сбросных отверстий вдали от области локального горения. Изучено совместное влияние неподвижных чередующихся препятствий и газодинамического возмущения, вызванного движением среды к сбросным отверстиям, на процесс интенсификации горения локальных водородовоздушных смесей.

Для взрывозащиты технологических аппаратов в промышленности применяются предохранительные устройства, позволяющие снижать давление взрыва парогазовых смесей до допустимой величины путем сброса продуктов сгорания в атмосферу или в буферную емкость. При определении площади легкобрасываемых конструкций F необходимо учитывать зависимости основных параметров процесса (давление p , скорость нарастания давления dp/dt и т.д.) не только от значения F , но и от расположения сбросных проемов. При этом трудно оценить фактор турбулизации X (отношение действительной поверхности пламени к площади поверхности сферы, в которую можно собрать продукты горения).

Величина X зависит от размеров и формы сосуда и существенно образом от его внутреннего устройства (наличие турбулизирующих препятствий). Если динамика сгорания газа в замкнутом сосуде без турбулизирующих препятствий исследована достаточно хорошо [1—4], то механизм ускорения пламени при его распространении в объемах с различной степенью загроможденности изучен не полно, что затрудняет нахождение X .

Наличие на пути распространения пламени турбулизирующих препятствий приводит в большинстве случаев к увеличению его видимой скорости [5—9]. Однако в [10] отмечено, что препятствия на пути распространения пламени в случае медленногорящих (например, ингибированных) пламен не ускоряют, а замедляют распространение пламени. Качественно близкий результат получен в работе [11], где изучено влияние турбулизаторов на горение бедных водородовоздушных смесей (объемная концентрация водорода $c_{\text{H}_2} \leq 10 \%$) в камере объемом 20 м^3 . Показано, что присутствие турбулизаторов хотя и приводит к увеличению полноты выгорания и росту давления взрыва (особенно при $c_{\text{H}_2} < 9 \%$), но может не только повышать, но и снижать скорость нарастания давления взрыва (т.е. фактически замедлять скорость распространения пламени).

В работе [2] обнаружен немонотонный характер зависимости величины (dp/dt) от степени загроможденности пространства для водородовоздушных

© А.Я. Корольченко, А.В. Трунев, Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, Е.Н. Простов,
1995