

ТЕХНОЛОГИИ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОРШНЕВЫХ ДВС

М.В. Пищулин; член команды участника Сколково № 1120877

Рассмотрены технологии гомогенизации топливо-воздушной смеси и управления режимом объемного сгорания, в цилиндре поршневого ДВС. Выполнен анализ преимуществ и недостатков управления воспламенением смеси в процессах объемного сгорания HCCI и GDCI.

На протяжении многих десятилетий в тепловых двигателях применялись хорошо управляемые режимы сгорания, основанные на дефлаграционных пламенах. Однако непрерывно ужесточающиеся экологические нормы потребовали более полного и быстрого сгорания топлива. В бензиновых ДВС это обеспечивали, главным образом, за счет повышения степени сжатия. Однако этот путь оказался небеспредельным: возникли проблемы с детонацией, т. е. взрывным сгоранием. Тогда появилось направление так называемого объемного сгорания, реализуемое в технологиях HCCI (воспламенение гомогенного заряда от сжатия) и GDCI (непосредственный впрыск топлива с воспламенением от сжатия), благодаря которым эффективный КПД бензинового двигателя повышается на 7–10 %, значительно сокращается содержание углекислого газа, оксидов азота и сажи

В реализацию этих технологий ведущие производители двигателей вложили много труда, времени и средств. Но их серийное внедрение пока что так и не состоялось. Причина одна: не удается решить проблему управления моментом самовоспламенения топлива. Дело в том, что каждый из вариантов такого управления имеет не только плюсы, но и минусы.

Так, если при сжатии топливовоздушной смеси ее самовоспламенение не произойдет в ВМТ, т. е. при максимальных температуре и давлении в камере сгорания, то после ВМТ температура заряда снижается за счет адиабатического расширения. Поэтому резко снижается вероятность возникновения в ней критической температурной флуктуации. Проще говоря, могут происходить пропуски самовоспламенения, которые не позволяют обеспечить коэффициент остаточных газов, необходимый для гомогенизации смеси в следующем цикле. То есть произойдет своевременный переход на классическое приготовление смеси в камере сгорания. Если же самовоспла-

менение осуществляется чуть раньше ВМТ, то возрастает время передачи теплоты в стенки камеры сгорания, из-за чего начинается разгонный процесс все более раннего самовоспламенения в следующих циклах, что также снижает эффективность HCCI и GDCI-технологий, а ранние максимумы давления создают сильные механические нагрузки, потенциально способные привести к разрушению двигателя.

Таким образом, остается один вариант: смесь должна воспламеняться точно в ВМТ. Однако добиться этого чрезвычайно трудно: топливная смесь — сложная система с большим числом взаимодействующих переменных, поэтому каждое отдельное действие или локальное вмешательство в такую систему обретает комплексный аспект, который влечет за собой самые различные, порой совершенно неожиданные глобальные изменения. Применительно к ДВС это означает, что при одних и тех же граничных условиях, наложенных на систему «топливовоздушная смесь» в виде давления и температуры, но при разных начальных условиях, возникают качественно различные диссипативные структуры, и система эволюционирует в конечное состояние по разным кинетическим механизмам.

Другими словами, трудность задания начальных условий с высокой точностью влечет за собой неопределенность, проявляющуюся в том, что момент самовоспламенения характеризуется случайностью [1]. Например, автор работы [2] подтверждает высокую чувствительность системы к изменению начальных условий тем эмпирически установленным фактом, что при изменении коэффициента α избытка воздуха температура самовоспламенения топливовоздушной смеси меняется почти на 200 °С. Кроме того, не менее сильно сказывается и химический состав топлива, о котором можно говорить лишь с некоторой долей вероятности (~10 % легких, 60 % средних и 30 % тяжелых фракций), поскольку это соотношение зависит от химического состава исходного сырья и технологии его переработки. Наконец, нельзя не учитывать и то, что давление и температура при адиабатическом сжатии зависят от частоты вращения коленчатого вала двигателя, температуры смеси на входе в цилиндр, эффекта повышения давления и температуры в холодных пламенах (хемилюминесценция), теплонапряжен-

ности рабочей камеры, а также флуктуационных колебаний α в газовой фазе, изменения уровня турбулентности в смеси, неравномерности цикловой подачи топлива форсунками. Однако на практике разработчики HCCI и GDCI-технологий учитывают только так называемые взрывные параметры — температуру, давление, период индукции и коэффициент избытка воздуха, чего для точного управления процессом (моментом) самовоспламенения явно недостаточно. Об этом еще в 1940 г. говорил А.С. Соколик [3]. Кроме того, оставаясь в рамках классических представлений, невозможно физически интерпретировать возникающую в турбулентном хаосе упорядоченность (самоорганизацию смеси), проявляющуюся в виде многоочагового сгорания цикла HCCI.

Из сказанного выше становится очевидным: для реализации технологий HCCI и GDCI необходима система точного управления моментом воспламенения топливовоздушной смеси от цикла к циклу. Причем система должна обеспечить оптимальные условия реализации объемного сгорания, которые, например, в формулировке Броне сводятся, во-первых, к организации предпламенных реакций в смеси; во-вторых, наработке свободных радикалов; в-третьих, созданию точечного очага воспламенения, способного поджечь смесь. [4].

Также А.С. Соколик говорил о необходимости выполнения этих условий, когда анализировал «стук» трех видов в двигателе: он показал, что в отличие от «стука», вызванного детонационным сгоранием, в конечном объеме заряда возможна реализация условий «недетонационного стука», когда возникает сферическая ударная волна, но без детонационного сгорания. Им также отмечено, что сгорание при «недетонационном стуке» становится фактором повышения эффективности рабочего цикла двигателя. [2] По поводу же специфических свойств такого сгорания он написал следующее: «Поскольку детонация в двигателе представляет сферическую (в простейшем случае — плоскую) детонационную волну, к ней неприменим механизм образования ударной волны аккумуляцией элементарных волн сжатия. Единственно возможным способом образования такой волны является особого рода объемное самовоспламенение — идея, высказанная в общем виде Серрюисом в так называемой теории ядерного воспламенения, однако без конкретной физической или химической интерпретации явления».

Рассмотрим вышеприведенные условия подробнее, чтобы установить, какие из них разработчики систем управления самовоспламенением не выполняют. Причем особое внимание уделим предпламенным процессам. Как установлено, в

предпламенном периоде распределение неупруго сталкивающихся частиц перестает быть случайным. Химические корреляции в системе становятся крупномасштабными, и система ведет себя как единое целое, несмотря на то что химическое взаимодействие носит короткодействующий характер. Априори можно ожидать, что неупругие столкновения вместе с диффузией приведут к хаотическому распределению продуктов первичного окисления. Однако это не так. [5]. Дело в том, что в механизме высокотемпературного воспламенения реакции продолжения и разветвления цепи идут с участием кислорода. Неупругие столкновения, начиная с первичных бимолекулярных реакций присоединения кислорода, порождают локальные пространственные асимметрии в межмолекулярных столкновениях. Интенсивность столкновений молекул во внешних областях остается неизменной, а от молекул топлива, присоединяющих кислород, снижается. Локальные потоки молекул кислорода из внешних областей к топливным молекулам или частям молекул сдерживают диффузию отщепляющихся от них частей. Кроме того, транспортные процессы с ростом давления от сжатия подавляются и усиливающейся интенсивностью столкновений. В результате при разветвлении цепи диффузия отщепляющихся фрагментов не может значительно превысить длину свободного пробега частиц в системе. Локализация же промежуточных компонентов, т. е. их близкое пространственное расположение, если учесть избыток молекул кислорода (бедные смеси), будет фактически соответствовать эффекту притяжения молекул в реакциях продолжения цепи. Иначе говоря, процесс столкновения молекул в предпламенный период характеризуется нарушением случайности, т. е. они упорядочиваются, амплитуды корреляций при подходе к точке бифуркации возрастают и в системе «топливовоздушная смесь» появляется множество активных центров («ядер») с повышенной концентрацией продуктов первичного окисления, имеющих ярко выраженный взрывной характер. При этом наиболее активное формирование «ядер» приходится именно на стадию голубых пламен. Как показали Бейли и Норриш, голубое пламя, образующееся в продуктах холодного пламени, характеризуется более глубоким изменением состава продуктов, резким снижением количества исходных углеводородов и сильным снижением концентрации свободного кислорода, активное присоединение которого усиливает локальные потоки молекул кислорода к топливным молекулам, что способствует подавлению транспортных процессов в системе и, как показали исследования Гейдона и Мура, образованием в спектре голубых пламен весьма интенсивных

полос радикалов HCO^* и CN^* , которые отсутствуют в холодных пламенах. Все это приводит к тому, что формирующиеся в период голубого пламени «ядра» обеспечиваются свободными радикалами, необходимыми для быстрого развития сгорания. Вовлечение же в гомогенизацию на впуске и в предпламенные процессы тяжелых топливных погон с высокими температурами фракционной разгонки значительно (особенно на стадии голубых пламен) увеличит число молекул в системе. Это еще больше способствует повышению плотности образующихся активных «ядер» и позволяет плазменному шнуру при искровом разряде осуществить тепловое, радиационное и электронное воздействие на значительное число активных «ядер» для воспламенения, т. е. если смесь не достигла температур самовоспламенения, воздействие искрового разряда искусственно генерирует в системе критическую температурную флуктуацию, группа «ядер» воспламеняется и образует градиент давления, который через адиабатическое сжатие подожмет смесь. В формулировке И. Р. Пригожина это означает, что первичная локальная область через адиабатическое сжатие со скоростью звука подает инновационный сигнал (транспортный процесс) остальным активным «ядрам» на необратимый процесс перехода в новое устойчивое состояние. При этом даже при флуктуационном разбросе параметров в «ядрах» активная их часть с параметрами, близкими к воспламенению, через волны сжатия воспримет сигнал к переходу в новое устойчивое состояние и воспламенится. Остальные же «ядра», обеспеченные свободными радикалами, за счет общего повышения температуры и элементарных волн сжатия тоже очень быстро вовлекаются в необратимый процесс сгорания.

Приведенная выше интерпретация полностью соответствует представлениям, развитым «брюссельской группой» относительно поведения сильно неустойчивых систем в окрестности точек бифуркации и подтверждается выводами Регера, Тизара и Пая о том, что самовоспламенение может возникать, если оставшая часть смеси после сжатия не достигла температур самовоспламенения. Это означает, что мнение, будто многоочаговое сгорание в объеме смеси НССИ-цикла возникает благодаря адиабатическому сжатию, не соответствует физической реальности.

Нельзя назвать правильным и мнение в отношении условий наработки свободных радикалов в виде CO , транслируемых в цилиндры с отработавшими газами (рециркуляция). Ведь содержание этих радикалов в отработавших газах зависит от полноты сгорания топливоздушная смеси, а коэффициент остаточных газов в текущем цикле осуществляется отработавшими газами

от предыдущего цикла. Значит, этот параметр содержит неопределенность, устранить которую можно, если использовать свободные радикалы тяжелых топливных фракций, бензина (их в товарных бензинах $\sim 30\%$). Потому что при увеличении числа атомов в молекулах число степеней свободы вращательного и колебательного движения значительно превосходит энергию поступательного движения, что ведет к быстрому разрушению внутримолекулярных связей, а следовательно, запускает в низкотемпературной зоне окисления механизм разветвления цепи с образованием активных промежуточных продуктов в виде перекисей, альдегидов, формальдегида и углеводородных радикалов, а на стадии голубых пламен, когда давление стабилизирует наработку перекисей, способствуют распаду формальдегида, высших альдегидов и углеводородных радикалов с образованием радикалов HCO^* и CN^* . То есть участие в предпламенных процессах многоатомных молекул топлива (тяжелые погоны) более эффективно решает задачу обеспечения смеси радикалами.

Что касается точечного очага воспламенения, способного поджечь смесь, то, на первый взгляд, искровой разряд не способен создать локальную область воспламенения (верхний предел воспламенения, как известно, $\alpha \sim 1,3$). Однако трансляция этого предела на смеси, в которых прошли предпламенные процессы, некорректна. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, полученные при работе двигателя на бедных смесях, в которых прошли предпламенные процессы (Ливедаль, Говард): они показывают, что облегченное воспламенение наблюдается, начиная с $\alpha = 1,25$, а смеси — с $\alpha \sim 1,5-1,6$, т. е. обедненные на 40–50 %, по условиям воспламенения эквивалентны смесям стехиометрического состава.

Доказательством того, что объемному сгоранию всегда предшествует первичный точечный очаг зажигания, можно привести комментарии А.С. Соколика к выводам Регера, Тизара и Пая и ссылки на фотографические регистрации, полученные методом непрерывной развертки в опытах Диксона и Дюшена: самовоспламенение всегда начинается в одной точке — даже при тепловом взрыве, когда температурные флуктуации подавлены. То же самое следует и из трудов Л.Д. Ландау: он считал, что создание очага зажигания от искры и воспламенение от горячей точки — явления аналогичные. Значит, наиболее простой способ облегчения условий воспламенения топливоздушной смеси при $\alpha \sim 1,5-1,6$ — это точное принудительное управление воспламенением не сжатием, как в технологиях НССИ и GDCI, а использование искрового зажигания.

В связи с этим возникает вопрос: почему в экспериментах с технологиями HCCI и GDCI возможность принудительного управления воспламенением от искрового разряда системы зажигания не обнаружена? Ответ на него однозначен: все дело в эффективности гомогенизации топливовоздушной смеси. В циклах HCCI и GDCI в приготовлении смеси всегда участвует значительное количество холодного воздуха. Причем при $\alpha \approx 1,5-1,6$ число его молекул в разы превышает число молекул топлива и отработавших газов. Но повышенной энергией обладают только молекулы отработавших газов. Значит, если учесть статистическое усреднение межмолекулярных столкновений, то есть все основания утверждать, что в период приготовления смеси на одно столкновение молекул топлива и отработавших газов, приводящее к ее активации, приходится гораздо большее число столкновений с молекулами воздуха, которые ее дезактивируют. Кроме того, для активации молекул топлива, имеющих большую массу, требуется значительное число столкновений с молекулами отработавших газов. В итоге параллельный и превалирующий процессы дезактивации не позволяют существенно увеличить энергию тяжелых топливных молекул, а тем более аэрозоля, т. е. к моменту сжатия в смеси присутствует в микродозах жидкая фаза, а энергия отработавших газов будет перераспределена между молекулами воздуха, топлива и капельками аэрозоля. При этом жидкая фаза выводит из предпламенных процессов в первую очередь тяжелые топливные фракции, т. е. из самоорганизации и наработки свободных радикалов.

Таким образом, недостаточная плотность «ядер» и радикалов исключает возможность создания условий облегчения воспламенением при $\alpha \approx 1,5-1,6$. Поэтому на входе в двигатель и приходится устанавливать компрессор: он играет роль инструмента управления самовоспламенением, способного вовлечь тяжелые фракции бензина с температурами кипения порядка 150–195 °С в процесс гомогенизации смеси.

На недостаточную эффективность отработавших газов в процессе гомогенизации указывают отсутствие возможности реализации HCCI-цикла на режиме холостого хода двигателя (термодинамические параметры отработавших газов на этом режиме самые низкие) и регистрируемое в отработавших газах HCCI-цикла повышенное, по сравнению с классическим циклом, содержание монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

Как видим, проблема стабильного управления объемным сгоранием может быть полностью решена включением в гомогенизацию тяжелых топливных фракций. Но в случае бензинового двигателя без высокотемпературных условий

приготовления смеси и принятия дополнительных мер эту проблему не решить, даже если выполнить второе и третье из перечисленных условий.

Однако это не означает, что она вообще неразрешима: автор данной статьи еще несколько лет назад предложил (см. АП, 2011, № 2.) способ организации эффективной гомогенизации смеси, суть которого сводится к следующему: топливо подается в тонкостенные испарительные патрубки, число которых равно числу цилиндров ДВС. Эти патрубки нагреваются электрическим током. Подогретое в них топливо принудительно обогащается до $\alpha \approx 0,1-0,2$, благодаря чему молекулы бензина воспринимают температуру от стенок испарителей и гарантированно активизируются. Покидая поверхность пленки на участке нагрева и испарения, они обладают энергиями, соответствующими температурам конца их фракционной разгонки. Но так как при $\alpha \approx 0,1-0,2$ число молекул топлива и воздуха примерно одинаковые, а масса первой на порядок больше массы второй, то активированные молекулы топлива в процессе диссипации на молекулах воздуха в испарителях теряют незначительную часть энергии возбуждения, т. е. остаются активированными. Кроме того, прогрев смеси в испарителях обеспечивает нарастание возбуждения молекул топлива и воздуха с задействованием вращательных и колебательных энергий.

Такая смесь смешивается с основной массой воздуха вблизи впускных клапанов и обедняется до $\alpha \approx 1,5-1,6$. При этом для дезактивации колебательных энергий тяжелых молекул топлива потребуется $\sim 108-109$ их столкновений с молекулами воздуха за секунду. Однако возможности нет: время приготовления смеси составляет всего лишь 0,1–0,01 с. Так что изменяя силу тока, получаем реальную возможность вовлечь тяжелые молекулы топлива в процесс гомогенизации смеси на впуске в предпламенные процессы при ее сжатии. Такое решение позволяет создать и использовать условия облегчения воспламенения смеси при $\alpha \approx 1,5-1,6$, т. е. повысить топливную экономичность бензиновых ДВС, на 40–50 %.

Литература

1. Г. Николис Г., И. Пригожин И. Познавание сложного. Издательство URCC, М., 2003.
2. А. Соколик А. Самовоспламенение пламя и детонация в газах. — М.: Издательство Академии наук СССР, 1960.
3. Соколик А. Самовоспламенение и сгорание в газах // Успехи физических наук. Т. XXIII. Вып. 3. 1940.
4. Брозе Д. Сгорание в поршневых двигателях. — М.: Машиностроение, 1969.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему. — М.: Издательство URCC, 2006.