

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ NO И CH_x ПРИ ФОРКАМЕРНО-ФАКЕЛЬНОМ ПОДЖИГАНИИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ II ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Р. И. Мехтиев

(Баку)

Проблемы рационального использования топливных ресурсов и охраны окружающей среды делают весьма актуальным использование бедных топливовоздушных смесей в поршневых двигателях. Успех в решении этой задачи во многом связан с применением форкамерно-факельного способа зажигания рабочего заряда, который разработан в ИХФ АН СССР. Между тем, как показывает опыт, применение данного способа зажигания в бензиновых двигателях с однородным зарядом сопровождается ощутимым увеличением концентраций токсичных компонентов отработанных газов (ОГ): окиси азота NO и несгоревших углеводородов CH_x .

Как известно, высокая эффективность сгорания горючих смесей при факельном зажигании обуславливается гидродинамическим воздействием и объемным воспламенением основной массы заряда форкамерным факелом горящих газов. Выполненные опыты на физической модели камеры сгорания (КС) двигателя [1] показали, что при переходе от искрового к факельному зажиганию ощутимо ускоряется процесс сгорания, вследствие чего увеличивается давление сгорания (рис. 1). Так, например, продолжительность сгорания однородной пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,25$ при искровом зажигании составляет $\tau_1 = 20$ мс (рис. 1, а), при факельном зажигании — $\tau_2 = 16$ мс (уменьшается на 25%). Это сопровождается увеличением давления сгорания на 10% (от $p_1 = 1,30$ до $p_2 = 1,43$ МПа, давление начала сгорания p_0 в обоих случаях поддерживалось 0,2 МПа). При $\alpha = 1,5$ ускоряется процесс сгорания этой же смеси на 30% (продолжительность сгорания уменьшается от $\tau_1 = 30$ до $\tau_2 = 23$ мс), а давление сгорания увеличивается на 13,4% (от $p_1 = 1,04$ до $p_2 = 1,18$ МПа, рис. 1, б).

Для установления причины увеличения концентрации NO при ускорении процесса сгорания нами разработана специальная методика, которая позволяет вести расчет давления и средней температуры газов в КС двигателя, температуры и концентраций 11 равновесных продуктов сгорания в отдельных локальных зонах КС с учетом Махе-эффек-

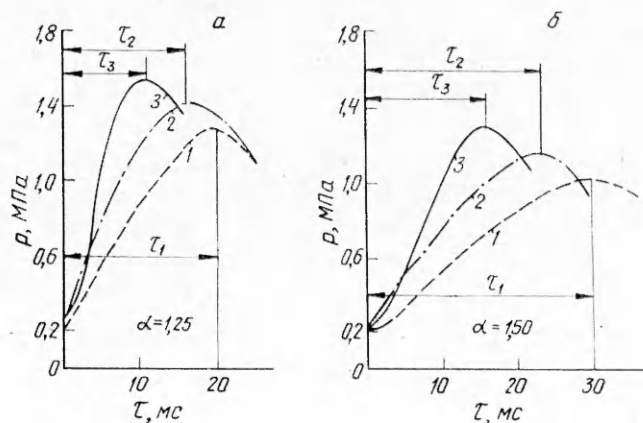


Рис. 1. Совмещенные осциллограммы давления сгорания пропановоздушных зарядов различного состава (а) при искровом зажигании однородной смеси (1), факельном зажигании ($\alpha_\phi = 0,6$) однородной смеси (2) и факельном зажигании ($\alpha_\phi = 0,6$) расслоенной смеси (3).

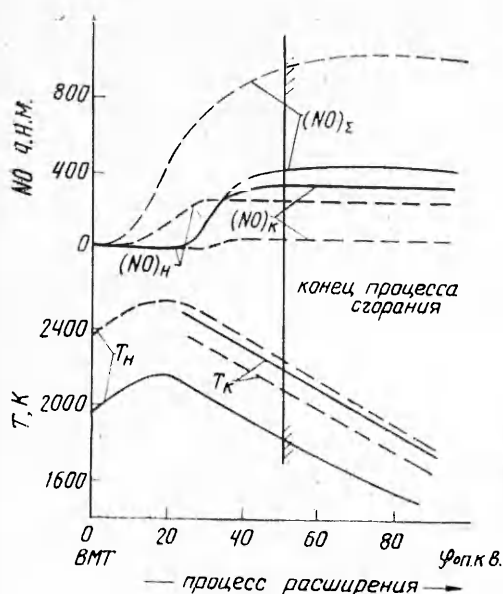


Рис. 2. Зависимость температуры продуктов сгорания и концентрации NO от угла п. к. в. φ при горении однородного (— — —) и расслоенного (—) бензиновоздушного заряда.

тодике при работе двигателя в условиях $\alpha = 1,30$, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_v = 0,82$ и $\epsilon = 8$. Как видно, при сгорании однородного бензиновоздушного заряда температура газов в зоне КС, где начинается горение, больше, чем в зоне, где завершается горение ($T_H > T_K$). Начальная температура продуктов сгорания смеси, вступающей в реакцию сгорания в первую очередь, достигает 2340 К, впоследствии из-за дополнительного сжатия (Махе-эффект) повышается до 2540 К, а затем постоянно падает за счет превращения тепловой энергии в механическую. Температура продуктов сгорания смеси, вступающей в реакцию сгорания в последнюю очередь, достигая вначале $T_K = 2360 \text{ К}$, тут же падает, так как уже не растет давление газов в КС из-за расширяющего хода поршня. В связи с этим в случае сгорания однородного заряда наибольшее влияние на образование NO оказывает та часть смеси, которая сгорает в первую очередь ($(NO)_H > (NO)_K$).

Ускорение процесса сгорания при осуществлении факельного зажигания обуславливает значительное увеличение температуры газов, сгоревших в начале процесса. Благодаря этому концентрация NO в ОГ форкамерных двигателей при прочих равных условиях становится больше, чем в ОГ двигателей с искровым зажиганием. Поэтому одним из наиболее эффективных путей уменьшения NO является снижение температуры газов, участвующих в сгорании в первую очередь. Это достигнимо путем направленного расслоения рабочего заряда так, чтобы возле форкамеры располагалась обогащенная часть смеси с $\alpha = 0,6 \div 0,8$, занимающая при среднем по КС коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ не более 55–60% объема КС. Остальную часть объема должна занимать обедненная смесь [2].

Как показали опыты в бомбе, направленное и оптимальное расслоение газовой смеси позволяет ощутимо улучшить эффективность сгорания. Как видно из рис. 1, при этом существенно ускоряется процесс сгорания (~50%) и увеличивается давление газов (8–11%) по сравнению с $p_{\max}$ при сгорании однородного заряда такого же общего состава.

Ускорение процесса сгорания связано с тем, что сначала горит богатая часть расслоенного заряда, при котором наряду с конечными про-

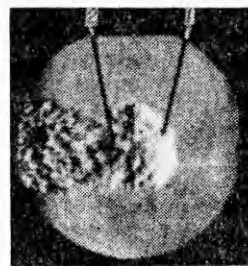


Рис. 3. Характерный вид форкамерного факела.

1 — вытесняемая фронтом факела несгоревшая смесь; 2 — фронт истекающего факела.

та, истинных значений коэффициентов молекулярного изменения и потерь теплоты сгорания топлива из-за диссоциации газов, а также кинетики образования NO согласно расширенному механизму Я. Б. Зельдовича.

На рис. 2 показаны некоторые результаты расчета по данной мето-

дуктами сгорания появляются и более реакционноспособные продукты неполного сгорания, например, H , H_2 , O , OH , CO и др. По-видимому, эти химически активные продукты, диффундируя под воздействием турбулентного форкамерного факела в обедненную часть заряда, становятся инициаторами поджигания бедной части заряда с ускоренным темпом.

При сгорании расслоенного заряда вначале, когда горит обогащенная часть смеси, рост давления несколько отстает от увеличения давления при сгорании однородного заряда (см. рис. 1). Однако спустя 3—5 мс, наблюдается ускорение процесса сгорания, сопровождаемое интенсивным возрастанием давления газов.

Расчет показал, что увеличение давления сгорания расслоенного заряда зависит не только от ускорения процесса сгорания, но и от нелинейности зависимости коэффициента молекулярного изменения μ в процессе сгорания от состава смеси. Известно, что по мере обогащения смеси значение μ , прогрессивно возрастая, в определенной мере компенсирует снижение температуры пламени и обуславливает некоторый рост давления, несмотря на то, что в этом случае значительная доля теплоты сгорания топлива оказывается неиспользованной. Дальнейшее дожигание химически более активных продуктов неполного сгорания в обедненной части заряда вызывает дополнительное увеличение давления газов.

Такой поэтапный характер сгорания расслоенного заряда обуславливает также резкое снижение температуры продуктов сгорания в начальной зоне КС (см. рис. 2), в результате чего не только уменьшаются общие потери теплоты сгорания топлива из-за диссоциации газов, но и исключаются необходимые концентрационно-температурные условия для образования NO .

Как видно из рис. 2, концентрация NO в начальной зоне КС при сгорании богатой части расслоенного заряда мала и ею можно пренебречь ($[\text{NO}]_n \approx 0$). Наиболее благоприятные условия для образования NO создаются в течение последующего этапа процесса сгорания ($T_k > T_n$). Однако из-за его краткости вклад этого периода в общее образование NO очень мал. Поэтому, если при горении однородного заряда выделение NO наблюдается почти в начале процесса сгорания, то при сгорании расслоенного заряда NO образуется незадолго до окончания процесса сгорания и с пониженной интенсивностью. Это уменьшает общее ее содержание в ОГ более чем в 2 раза ($[\text{NO}]_z = 450$ против $[\text{NO}]_z = 1020$ ч. н. м.) в данном режиме работы двигателя.

Ускорение процесса сгорания однородного заряда при применении факельного зажигания обуславливает также увеличение концентрации CH_x . Рассмотрением большой серии теневых изображений процесса сгорания в условиях бомбы [1] установлено, что фронт истекающего форкамерного факела как поршень вытесняет в сторону холодной стенки КС определенную дозу несгоревшей смеси (рис. 3). Причем, чем больше скорость истечения факела, тем больше количество вытесняемой смеси, видимо, из-за меньшего времени, отводимого для взаимной диффузии промежуточных продуктов окисления в зоне сгорания со свежей смесью. Как установлено, скорость распространения пламени при факельном зажигании гораздо больше, чем при искровом, соответственно больше и количество вытесняемой смеси к стенкам и «защемленным» зонам КС, где пламя гасится. Очевидно, этим можно объяснить столь высокое содержание CH_x в ОГ форкамерных двигателей.

Опыты в условиях бомбы показали, что расслоение заряда в разумных пределах выгодно и с точки зрения снижения концентрации CH_x [3]. Дело в том, что при расслоении заряда заметно уменьшается скорость истечения форкамерного факела, улучшается полнота процесса сгорания и уменьшается относительное содержание топлива в пристеночном слое на противоположной от форкамеры стенке. Тем не менее, как показали опыты на двигателе [2], одного только расслоения недостаточно для снижения концентрации CH_x хотя бы до уровня, который имеет место при искровом зажигании. Дело еще больше усугубляется при по-

вышении степени сжатия с целью увеличения топливной экономичности двигателя.

По-видимому, ускорение процесса сгорания при увеличении степени сжатия также сопровождается вытеснением фронтом пламени большого количества несгоревшей смеси к стенкам КС. Кроме того, имеет место и увеличение плотности пристеночного слоя и смеси в «защемленных» зонах КС из-за высокого давления сжатия. Оба эти фактора в совокупности обуславливают возрастание эмиссии CH_x при увеличении степени сжатия.

Выполненные эксперименты показали, что для обеспечения безвредного выпуска по всем токсичным компонентам ОГ двигателей с форкамерно-факельным зажиганием и высокой степенью сжатия необходимо осуществить направленное расслоение рабочего заряда и применить КС с кольцевым вытеснителем для предотвращения попадания топлива в периферийные и «защемленные» зоны КС до и после процесса сгорания [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Мехтиев. Двигателестроение, 1979, 10, 3.
2. Р. И. Мехтиев, Ф. М. Гасанов, Р. А. Меджидов. Двигателестроение, 1982, 5, 5.
3. Р. И. Мехтиев, В. П. Карпов и др. Archiwum termodynamiki i spalania, 1978, 9, 4, 646.

УДК 536.46.533.607

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧЕГО ГАЗА, ИСТЕКАЮЩЕГО В СРЕДУ ГАЗООБРАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

В. К. Баев, В. В. Шумский, М. И. Ярославцев
(Новосибирск)

В работе рассматривается истечение горючего газа из емкости при быстром удалении непроницаемой перегородки, отделяющей сжатый в емкости горючий газ от воздушного пространства. При этом и температура горючего газа в емкости, и температура окружающего воздуха значительно ниже температуры самовоспламенения горючего газа в воздухе, например, равны комнатной. Такая ситуация может, в принципе, встречаться при разрушении сосуда с горючим газом, при выбросе горючего газа в трубопровод из-за резкого открытия арматуры, отделяющей сжатый горючий газ от воздушной среды в трубопроводе, при работе устройств, обеспечивающих дозированный и быстрый впрыск горючего газа в среду окислителя и т. д.

При рассмотрении истечения газа, возникающего при быстром удалении перегородки, встает вопрос, могут ли только за счет давления газа создаваться условия, обеспечивающие самовоспламенение «холодного» горючего газа в «холодной» среде окислителя. В работах [1, 2] показано, что в ряде случаев такие условия могут создаваться за счет повышения температуры одного из компонентов (горючего газа или окислителя) с помощью ударной волны. С целью изучения условий, при которых происходит самовоспламенение «холодного» газа, истекающего в «холодную» среду окислителя, проведена серия опытов на установке, на которой при механическом разрушении диафрагмы создавалось нестационарное истечение сжатого горючего газа в среду окружающего воздуха.

Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена принципиальная схема установки. Горючий газ, заполнявший баллон 2 объемом 250 см³ при температуре 15°C, отделялся от окружающей воздушной среды с помощью медной диафрагмы 6 толщиной 0,4—0,8 мм. Разрыв диафрагмы осуществлялся следующим обра-