

## О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ УСИЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ФАКТОРА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ФОРКАМЕРНОЙ СМЕСИ

И. Б. Самойлов

(Москва)

Как известно [1], «еще в 1936 году А. С. Соколик и А. Н. Воинов предложили и испытали новый способ организации процесса горения в двигателях: форкамерное зажигание». Результаты последующих многочисленных исследований были обобщены в работе [2], где сделан вывод о существенной роли ряда факторов в этом процессе, в том числе активных центров. Значительное место исследования факельного зажигания занимали также в работах [3—8], в которых роли активных центров придано решающее значение. Некоторые особенности обоснования этой концепции рассмотрены в [9, 10], а ее основные положения детально проанализированы в [11].

Цель данной работы — рассмотрение одного из главных факторов, обнаруженного при изучении факельного зажигания в [4—7, 12], — времени пребывания продуктов сгорания в форкамере  $\tau_{пр}$ . Это влияние в [4—7, 12] представляется как прямое доказательство решающей роли активных центров.

При анализе указанных работ обращает на себя внимание неоднозначность полученных в них результатов. Так, в [4—7] показано, что роль  $\tau_{пр}$  непосредственно связана с химической активностью продуктов сгорания предельно богатых смесей, и в случае, когда коэффициент избытка воздуха в форкамере  $\alpha_{\phi} \geq 0,8$ , оно не проявляется. Однако в [12] влияние  $\tau_{пр}$  оказывается эффективным в диапазоне  $\alpha_{\phi} = 0,8 \div 1,7$  (при  $\alpha_{\phi} < 0,8$  сравнительные данные отсутствуют). Результаты подобных опытов в [10] также отличаются от полученных в [4—7].

Поскольку эта неоднозначность не объясняется особенностями процесса рекомбинации активных центров, то можно предположить, что роль  $\tau_{пр}$  обусловлена не только активными центрами, но также изменением температурного поля  $T(x_i, t)$  в форкамерном газе внутри выпускного канала ( $x_i$  — координаты,  $t$  — время). Такое изменение может быть следствием процесса догорания форкамерной смеси, который характерен для работы в режиме так называемого генератора активных центров [3, 4], поскольку его принципиальной особенностью являются конструктивные элементы, обеспечивающие срыв и погасание пламени на выходе из форкамеры. Это одно из необходимых условий известного ЛАГ-процесса [3, 4].

Результаты, полученные в [12], подтверждают, что при величине  $\tau_{пр}$ , соответствующей параметрам генератора активных центров, значительная часть форкамерной смеси не успевает сгореть внутри форкамеры даже в случае предварительно перемешанных газовых смесей. Так, для метана при  $\alpha_{\phi} = 0,85$  и  $\tau_{пр} = 3,5$  мс на выходе из форкамеры регистрируется почти 50% его исходного количества.

Поскольку температура в догорающих очагах значительно превосходит среднюю температуру потока на выходе из форкамеры, характер  $T(x_i, t)$  существенно зависит от догорания. Исходя из этого, рассмотрим процесс догорания в условиях, которые соответствуют опытам [4—7].

### Экспериментальная установка и методика измерений

В данной работе изучался состав стабильных продуктов на выходе из форкамеры и проводилось исследование догорания в потоке этих продуктов в зависимости от  $\tau_{пр}$ .

Для проведения опытов изготовлено более десяти различных конструкций форкамер, рассчитанных на сжигание как распыленного, так

и испаренного топлива двух типов: дизельного (ГОСТ 4749-73) и керосина. В опытах с паровоздушной смесью использовали специальный испаритель — змеевик, расположенный в потоке продуктов сгорания на выходе из серийного авиационного двигателя. После испарения топливо направляли в поток подогретого в смесителе воздуха и образовавшуюся паровоздушную смесь вводили в форкамеру.

Поскольку в случае паровоздушной смеси не обнаружено принципиального отличия результатов по сравнению с гетерогенной смесью, ниже будут описаны опыты только с распыленным дизельным топливом, которые в большей мере соответствуют условиям практики.

Конструкции форкамер разрабатывали с участием Л. А. Гуссака. Они и режим их работы удовлетворяли известным условиям, при которых, согласно [3, 4], можно обеспечить ЛАГ-процесс. Так, относительный перепад давления в форкамере  $\delta p = 0,3$  независимо от  $\alpha_{\text{ф}}$ ,  $\tau_{\text{пр}} = 4$  мс в оптимальном случае. При этом скорость потока в выпускном канале достигала 30 м/с (диаметр канала 2 см). С помощью специальных проставок достигалось изменение  $\tau_{\text{пр}}$  в пределах от 4 до 8 мс.

Продукты сгорания на выходе из форкамеры отбирали зондом; установленным так, что его входное отверстие располагалось на оси потока вблизи выходного сечения форкамеры. Рабочая часть зонда была изготовлена из кварцевой трубы диаметром 5 мм с конусной концевой частью и помещена в охлаждаемый водой металлический кожух. Диаметр входного отверстия не превышал 0,1 мм. В процессе отбора газа давление в зонде изменялось в диапазоне  $10-10^{-3}$  кПа. Согласно данным [13], подобная конструкция и режим работы зонда позволяют получить достоверные пробы газа.

Последующий химический анализ проводили с помощью хроматографа. Согласно данным тарировки и оценкам, ошибка измерения объемной концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  не превышает 0,1%. Для изучения процесса догорания использовали также оптическую спектроскопию потока. Для этой цели применяли портативный спектрограф фирмы «Gues» (Англия) и ИСП-51 с кварцевой и стеклянной призмами соответственно.

### Результаты измерений

На рис. 1 показаны результаты измерений концентраций  $[\text{CO}]$  и  $[\text{CO}_2]$  при  $\tau_{\text{пр}} = 4$  мс. Они представлены в виде суммы  $r = [\text{CO}] + [\text{CO}_2]$ . Штриховые прямые по вертикали указывают диапазон значений  $r$ , полученный в результате повторных измерений при 9 запусках форкамеры.

Сплошная кривая на рис. 1 получена расчетом  $r$  по уравнениям баланса элементов С, Н, О и N [14]. При этом принято, что вся масса смеси сгорает до  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  и что концентрации активных центров, других промежуточных соединений, а также несгоревших углеводородов равны нулю. Согласно [14], равновесное значение концентраций всех этих компонентов в сумме не превышает 1% (для данного типа топлива и условий горения). Поскольку в уравнения баланса они входят

Рис. 1. Зависимость от  $\alpha_{\text{ф}}$  суммы концентраций  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  на выходе из форкамеры при  $\tau_{\text{пр}} = 4$  мс.  
1 — расчет по уравнениям баланса элементов.

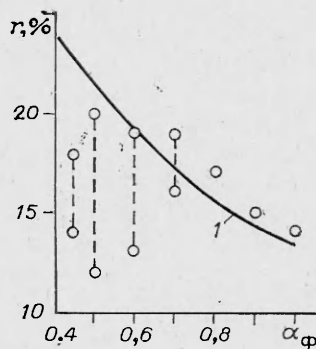




Рис. 2. Спектрограммы излучения в потоке на выходе из форкамеры.  $\alpha_{\phi} = 1,1$  (1) и 0,5 (2, 3);  $\tau_{\text{пр}} = 8$  (1, 3) и 4 мс (2).

в качестве слагаемых с концентрациями основных компонентов, то ошибка при таком расчете  $r$  не выходит за пределы долей процента, т. е. соответствует точности измерений. Кроме уравнений баланса использовали также уравнение, связывающее общее давление  $p$  в смеси с парциальными давлениями  $p_i$  отдельных компонентов

$$p = \sum p_i.$$

В рассматриваемых условиях  $p = 1$  атм. так что  $p_i$  — концентрация соответствующих компонентов в мольных долях. Согласно [15], принято, что в состав дизельного топлива входит (по массе) 86,5% атомов С и 13,5% атомов Н.

Строго говоря, предложенная методика расчета дает только верхний предел суммы  $[\text{CO}] + [\text{CO}_2]$ , так что ее равновесное значение остается неизвестным. Но можно предположить, что рассчитанное указанным способом значение  $r$  близко к нему.

Как видно из рис. 1, в случае  $\alpha_{\phi} \leq 0,6$  имеет место значительное недогорание исходной смеси, достигающее 7—44%. В этом диапазоне  $\alpha_{\phi}$ , т. е. в режиме, когда форкамера является генератором активных центров [3—7], для процесса горения в ней характерна сильная неустойчивость.

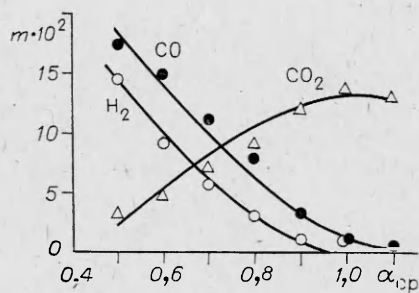
Рассмотрим теперь, в какой мере эти свойства связаны с  $\tau_{\text{пр}}$ . На рис. 2 приведены результаты спектрального анализа излучения. При  $\alpha_{\phi} = 0,5$  и  $\tau_{\text{пр}} = 4$  мс на спектрограмме видны полосы  $\text{CN}^*$  и  $\text{C}_2^*$ , что однозначно указывает на горение перемешанной углеводородно-воздушной смеси [16]. Общий вид спектрограммы и соотношение интенсивностей полос на ней соответствуют пламени богатого состава (например, внутреннему конусу бунзеновского пламени). При этом необходимо подчеркнуть, что на спектрограмме отсутствует характерный признак диффузионного горения, связанный с излучением раскаленных сажистых частиц, — континуум, перекрывающий полосы  $\text{CN}^*$  и  $\text{C}_2^*$  [16].

При  $\tau_{\text{пр}} = 8$  мс спектрограмма излучения существенно иная: на ней отсутствуют полосы и она практически совпадает с полученной в случае  $\alpha_{\phi} = 1,1$ . Это означает, что при данном времени экспозиции фотопленки горение топлива на выходе из форкамеры не регистрируется.

Результаты химического анализа в форкамерной струе показаны на рис. 3. При их сопоставлении с данными рис. 1 можно сделать вывод, что увеличение  $\tau_{\text{пр}}$  приводит к существенному повышению полноты сгорания в форкамере, т. е. в выпускном канале действительно имеет место процесс догорания. Так, при  $\alpha_{\phi} = 0,5$  и  $\tau_{\text{пр}} = 8$  мс измеренное значение  $r$  всего на 0,5% ниже расчетного, тогда как при  $\tau_{\text{пр}} = 4$  мс это различие достигает 44%.

Таким образом, результаты химического и спектрального анализов согласуются между собой и указывают на то, что в выпускном канале форкамеры, работающей в режиме генератора активных центров, имеет место процесс догорания исходной форкамерной смеси, интенсивность которого при прочих равных условиях определяется величиной  $\tau_{\text{пр}}$ . Из этого, в частности, следует, что в таком режиме  $\tau_{\text{пр}}$  определяет количество и распределение в форкамерном факеле очагов с высокой концентра-

Рис. 3. Зависимость мольных концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  на выходе из форкамеры от  $\alpha_{\text{ф}}$  при  $\tau_{\text{пр}} = 8$  мс.



цией  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , температура которых на несколько сот градусов выше средней в потоке. При достаточно малом  $\tau_{\text{пр}}$  такие очаги могут возникнуть и в случае  $\alpha_{\text{ф}} \geq 1$ , поскольку при наличии воздуха превращение углеводородов в пламени не останавливается на образовании  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  и лимитирующей стадией является догорание этих компонентов. Этим, по-видимому, можно объяснить результаты работы [12], когда влияние  $\tau_{\text{пр}}$  при  $\alpha_{\text{ф}} > 1$  также оказалось существенным.

### Обсуждение

Представление о механизме факельного зажигания, в том числе и о роли активных центров, в значительной мере зависит от правильной оценки влияния теплового фактора. Это непосредственно видно из работы [6], где рассмотрена типичная схема использования форкамеры в качестве генератора активных центров. Согласно [6], температура в факеле на срезе выпускного канала близка к максимальной при  $\alpha_{\text{ф}} = 1$ , однако в зоне смешения факела с воздухом или с бедной основной смесью далее по потоку максимум  $T$  отмечен в случае предельно богатой смеси вследствие повышения  $T$  при дожигании  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . Именно в эту зону помещают топливную форсунку для обеспечения наиболее эффективного испарения и воспламенения топлива. Очевидно, что при такой схеме форкамерного устройства обогащение смеси усиливает влияние теплового фактора.

В этой связи показательно, что в случае предварительно перемешанных основных составов обогащение форкамерной смеси дает эффект только для предельно бедных основных смесей [4, 8, 12]. По-видимому, одна из причин этого — ингибирование углеводородами воспламенения и дожигания  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  [14, 17].

Результаты данной работы указывают на еще один механизм усиления теплового фактора в результате обогащения форкамерной смеси при  $\tau_{\text{пр}} = 4 \div 6$  мс. Этот механизм связан с выносом в зону факельного зажигания локальных очагов пламени, окруженных высокотемпературными продуктами сгорания с высокой концентрацией  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . Задержки воспламенения этих компонентов при контакте с воздухом в условиях, характерных для факельного зажигания ( $T \geq 1400$  К,  $p \geq 0,1$  МПа), находятся в диапазоне  $10^{-5} - 10^{-6}$  с [14, 18]. Поэтому в случае достаточно бедных основных смесей, когда ингибирование несущественно и когда именно и имеют место положительные эффекты применения факельного зажигания, указанные очаги могут играть самую существенную роль, особенно если учесть, что в них может содержаться до половины исходной форкамерной смеси.

Таким образом, в данной работе рассмотрен достаточно важный и ранее не учитывавшийся фактор. Его количественный вклад в наблюдаемые практические эффекты, так же как и других факторов, остается неустановленным, поскольку все они взаимосвязаны и изменение одного влечет изменение других [2].

В заключение подчеркнем, что в основе факельного зажигания, как и всякого другого процесса воспламенения и горения, находятся цепные реакции, осуществляемые посредством активных центров. Роль этих

центров количественно не определена, и нет теоретических и экспериментальных данных, указывающих на то, что в инженерном плане она может стать решающей в результате обогащения форкамерной смеси. Это является одним из основных следствий обнаруженного в данной работе возможного механизма усиления теплового фактора.

Можно указать по крайней мере две области техники, где этот вывод принципиально значим: камеры сгорания ГТД авиационного типа и печи для безокислительного нагрева металлов. В обоих случаях факельное зажигание происходит в условиях избытка топлива в основной смеси. В ГТД, кроме того, имеет место чрезвычайно сложная картина течения за фронтным устройством обычного типа, с помощью которого обеспечивается стабилизация горения на расчетном режиме. Как показывают результаты [19], где изучалось автономное форкамерное устройство для камеры сгорания такого типа, на расчетном режиме положительный эффект от применения форкамеры не наблюдается. Исследования форкамерных горелок для газоздушных смесей [8, 12], которые рассматриваются как модели горелок для печей безокислительного нагрева, также показали, что в случае стехиометрической и богатых основных смесей обогащение форкамерной смеси не дает положительного эффекта в сравнении с бедными форкамерными составами.

Итак, принципиальной особенностью форкамерных устройств, работающих в режиме генератора активных центров, является догорание в выпускном канале, в котором может участвовать до 50% исходной смеси. Этот процесс может оказать существенное влияние на характеристики форкамерных устройств, в частности путем усиления роли теплового фактора, вследствие чего догорание необходимо учитывать при их разработке, а также при изучении роли различных факторов в процессе факельного зажигания.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность С. А. Цыганову за ценные замечания, в результате которых общая направленность работы была принципиально изменена.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Эмануэль.— В кн.: Советская химическая физика (состояние и перспективы). М.: Наука, 1981.
2. А. С. Соколик, В. П. Карпов.— В кн.: Горение и смесеобразование в дизелях. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
3. Л. А. Гуссак.— В кн.: Открытия в СССР. М.: Госкомизобретений СССР, 1974, с. 14.
4. Л. А. Гуссак.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
5. L. A. Gussak, M. C. Turkish. Stratified Charge Engine Conference. I. Mech. E. London, 1976, p. 134—145.
6. А. М. Токарев, Л. А. Гуссак.— В кн.: Горение газов и натуральных топлив. Черногородка, 1980.
7. Ю. М. Гершензон, Л. А. Гуссак, О. Б. Рябиков.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
8. Л. А. Гуссак, Е. С. Семенов, О. Б. Рябиков.— В кн.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черногородка, 1977.
9. И. Б. Самойлов. Изв. АН СССР. Сер. химическая, 1982, 8.
10. В. П. Богославский, И. Б. Самойлов. ФГВ, 1982, 18, 5.
11. J. R. Creighton. SAE Paper N 790249, 1979.
12. Е. С. Семенов. Хим. физика, 1982, 1, 1122.
13. Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. Структура пламени. М.: Металлургия, 1969.
14. Е. С. Щетников. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
15. Я. П. Сторожук. Камеры сгорания стационарных газотурбинных и парогазовых установок. Л.: Машиностроение, 1978.
16. A. G. Gaydon. The Spectroscopy of Flames. London: Chapman and Hall, 1974.
17. В. В. Азатян. Докт. дис. ИХФ АН СССР, 1978.
18. T. A. Brabbs, F. E. Bells, R. S. Brakow. XIII Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, Pa.: The Combustion Institute, 1971.
19. И. Б. Самойлов, А. Ф. Мурашов, Е. А. Озеров и др. Теплоэнергетика, 1981, 6.

*Поступила в редакцию 26/XII 1984,  
после доработки — 22/VII 1985*