

УДК 662.954 : 662.69

В. Г. Ионов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СТАДИЙ
ФОРКАМЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ
ПРИ ПОМОЩИ КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Форкамерное зажигание осуществляется, как правило, продуктами сгорания, которые образуются в результате сжигания вспомогательной смеси и затем в виде струи самопроизвольно инжектируются через соединительный канал в основную камеру, где вступают в реакцию взаимодействия с рабочим зарядом смеси. Это взаимодействие при соответствующих условиях и параметрах форкамерной системы заканчивается воспламенением и последующим свободным распространением пламени по объему основной камеры.

В данной работе рассмотрены некоторые закономерности форкамерного зажигания метановоздушных смесей, которые выявлены в результате анализа кинематографических материалов, полученных методом Теплера с использованием оптического прибора ИАБ-451 и скоростной камеры СКС-1.

Конструкция экспериментальной установки детально описана в [1]. Последовательность проведения опытов включала в себя следующие основные операции: составление вспомогательной и рабочей смеси; контрольная проверка концентрационного состава интерферометром ИТР-1; вакуумирование форкамеры и основной камеры и заполнение их соответствующими смесями; проведение цикла форкамерного зажигания с одновременной регистрацией процесса; обработка и анализ кинофотоматериала.

На рис. 1 представлена теплерограмма процесса форкамерного зажигания (кадры следуют через 3 мс). Начальным моментом служит искровой разряд, воспламеняющий вспомогательную смесь в форкамере. От образовавшегося очага фронт пламени ламинарно распространяется в направлении соединительного канала. Если размеры канала достаточно малы (как в рассматриваемом случае), то происходят срыв и погасание пламени, после чего в основную камеру высокотемпературной струей инжектируются продукты сгорания. Они вступают во взаимодействие с рабочей смесью, которое заканчивается быстрым развитием реакции горения.

Рассмотрим отдельные стадии форкамерного зажигания в соответствии с последовательностью их протекания.

Горение в форкамере. Эта стадия представляет интерес при сравнении времени пребывания про-

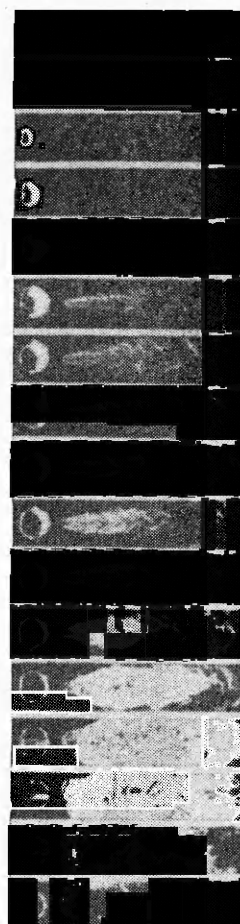


Рис. 1.

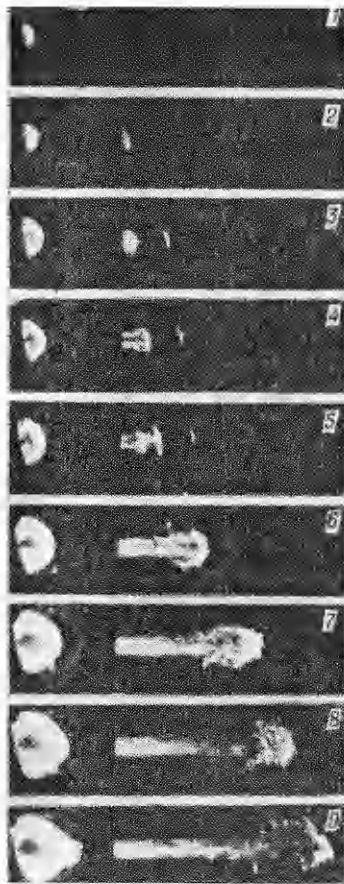


Рис. 2.

тесняет определенный объем вспомогательной смеси через соединительный канал в основную камеру. Этот объем, перемешиваясь с рабочей зарядом, образует в непосредственной близости от соединительного канала зону, которая играет заметную роль в последующем воспламенении.

Визуализацию зоны смещения можно осуществить, если в форкамере и основной камере использовать смеси, в значительной степени отличающиеся по плотности.

На серии теплорограмм (рис. 2, кадры следуют через 1,5 мс) зарегистрирован процесс вытеснения, когда основная камера заполнена газом с малой плотностью — водородом, а форкамера — богатой метано-воздушной смесью с относительно большой плотностью. Видно, что вытеснение начинается практически одновременно с образованием и распространением фронта пламени в форкамере, причем ему предшествует появление передней оптической неоднородности. Происхождение этой неоднородности объясняется тем, что в соединительном канале после удаления перемычки за счет взаимной диффузии образуется смесь, не столь значительно отличающаяся от рабочей, как вспомогательная. В результате этого передняя оптическая неоднородность зарегистрирована не столь отчетливо, а ее боковые границы вследствие неизбежного подсоса рабочей среды и дальнейшего плотностного выравнивания практически не видны. К моменту времени, зарегистрированному на кадре 6, данная неоднородность (в пределах чувствительности используемой визуализирующей диафрагмы) полностью теряет свою индивидуальность.

На рис. 3 приведена зависимость продвижения вытесняемой среды. Используя эту зависимость и зная диаметр соединительного канала,

продуктов сгорания в форкамере с временем жизни короткоживущих атомов и радикалов, которым в работе [2] отведена определяющая роль в воспламенении рабочей смеси.

Время пребывания продуктов сгорания в форкамере t при ламинарном распространении фронта пламени от искры зажигания до соединительного канала зависит от места их образования. Так, например, порция продуктов, образовавшихся непосредственно у искры, находится в форкамере весь период времени, пока непроницаемый для нее ламинарный фронт не дойдет до соединительного канала. Только после этого возможно истечение рассматриваемой порции в основную камеру и развитие взаимодействия химически активных центров с рабочей смесью. Очевидно, что наименьшее время пребывания будет у продуктов, образующихся вблизи от соединительного канала.

Для богатой вспомогательной смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\phi} = 0,8$ $t = 2 \div 9$ мс. Сравнение этих значений с временем жизни химически активных атомов и радикалов (~ 10 мс [3]) показывает, что необходимый признак наличия химической активности у продуктов сгорания имеется, поскольку основная часть активных центров в данных условиях имеет возможность выйти в основную камеру.

Вытеснение вспомогательной смеси в основную камеру сгорания. Фронт пламени, ламинарно распространяющийся по объему форкамеры, действуя подобно поршню, вы-

состав вспомогательной и рабочей смесей, время между началом и окончанием вытеснения, можно оценить изменение суммарной концентрации метана в основной камере. Однако предварительно необходимо учесть поправку, вносимую в значения скоростей, изображенных на рис. 3, от увеличения сопротивления вытесняемому газу за счет повышения плотности при переходе от водорода к рабочим метановоздушным смесям. Эта поправка определялась по измерениям скоростей вытеснения при постепенном разбавлении водорода воздухом и увеличением его плотности до уровня рабочей смеси.

Для используемой визуализирующей диафрагмы в виде непрозрачного диска диаметром 1,59 мм было установлено предельное значение, при котором вытесняемый газ отчетливо регистрируется в виде неоднородности: $\rho_{осн}/\rho_{\phi} = 0,6$, где $\rho_{осн}$ и ρ_{ϕ} — плотности газовоздушных смесей соответственно в основной камере и форкамере. Использование этого значения в качестве верхней границы показало, что в диапазоне $\rho_{осн}/\rho_{\phi} = 0,07 \div 0,6$ скорость вытеснения в пределах погрешности остается постоянной. Учитывая оценочный характер расчета, принимаем постоянство скорости до $\rho_{осн}/\rho_{\phi} = 1,0$, что соответствует плотности метановоздушных смесей с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\phi} = 0,75$ и $\alpha_{осн} = 2,5$.

С учетом сказанного количество метана, вытесняемого из форкамеры:

$$V = \rho_{\phi} S \Delta t u \frac{A}{100},$$

где S — площадь поперечного сечения канала; u — средняя скорость вытеснения; Δt — время вытеснения; A — содержание метана во вспомогательной смеси, %.

Теперь сопоставим величину V с количеством метана ΔV , требующимся для обогащения запредельной, например, 4 %-ной ($\alpha_{осн} = 2,5$) метановоздушной смеси, до значения нижнего концентрационного предела воспламенения, принимаемого как 5,3 % метана в воздухе. Сопоставление показывает, что V составляет 0,21 % от ΔV и вытесняемого газа недостаточно для заметного обогащения всего объема рабочей смеси, однако, как видно из рис. 2, вытесняемый метан успевает распространиться не на весь объем основной камеры, а лишь на локальную зону вблизи от соединительного канала, в которой вполне возможно существенное перераспределение концентраций и создание оптимальных условий для воспламенения.

Выход продуктов сгорания в основную камеру и период задержки воспламенения. Вытеснение завершается в тот момент, когда сечение соединительного канала перекрывается выходящими в основную камеру продуктами сгорания. Скорость последующего истечения этих продуктов имеет максимальное значение на начальном участке, а затем уменьшается по мере собственного расширения струи и падения давления в форкамере.

Из теплерограмм на рис. 1 видно, что продукты сгорания воспламеняют рабочую смесь не сразу, а после некоторого периода задержки, в течение которого энергия накапливается до уровня, достаточного для протекания экзотермической реакции в объеме основной камеры. Численное значение периода задержки τ определялось как интервал между моментом, когда осевая поступательная скорость продуктов сгорания в основной камере уменьшалась до нуля, и моментом, когда в непосредственной близости от соединительного канала возникла зона повышенной освещенности (см. рис. 1), появление которой можно объяснить лишь резким повышением температуры. Столь быстрый рост температурного

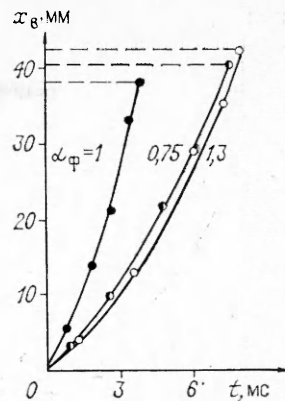


Рис. 3.

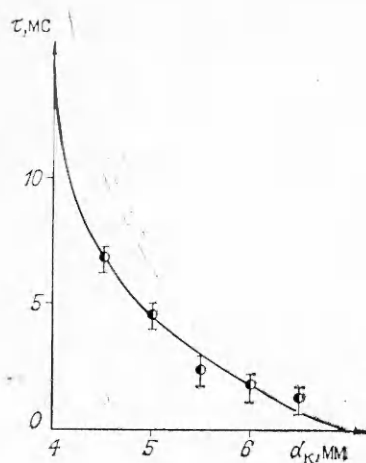


Рис. 4.

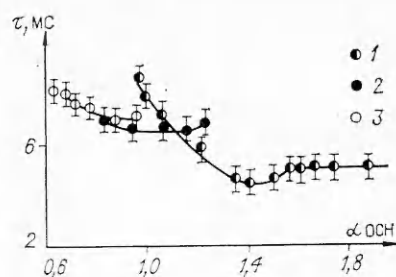


Рис. 5.

уровня и дальнейшее интенсивное развитие реакции в основной камере однозначно соответствуют моменту воспламенения и горения рабочей смеси.

Определенная таким образом величина τ не зависит от скорости горения смеси в форкамере и скорости истечения струи, а характеризует непосредственное взаимодействие продуктов сгорания с рабочей смесью. Значение τ удобно использовать в качестве меры воспламеняющей способности: чем меньше интервал времени между моментом окончания выхода продуктов сгорания в основную камеру и моментом возникновения вблизи от соединительного канала зоны повышенной освещенности, тем выше воспламеняющая способность продуктов сгорания.

На рис. 4 приведена кривая изменения периода задержки в зависимости от диаметра соединительного канала, полученная при $\alpha_{\phi} = 0,75$ и $\alpha_{окн} = 1,4$. При значениях диаметра канала $d_k = 4$ мм рабочая смесь не воспламеняется. Если же $d_k > 7$ мм, $\tau = 0$, т. е. фронт пламени проходит без задержки, воспламеняет близлежащие слои рабочего заряда смеси и в дальнейшем ламинарно распространяется по объему основной камеры. Условие $\tau = 0$ в действительности характеризует максимальную воспламеняющую способность (фронта, но не продуктов сгорания), поскольку в данном случае необходимо лишь требование, чтобы концентрационный состав находился в пределах воспламенения.

Иная картина наблюдается при $\tau \neq 0$. Здесь заметное влияние на воспламеняющую способность начинает оказывать сочетаемость составов вспомогательной и рабочей смеси. На рис. 5 для $\alpha_{\phi} = 0,75$ (1), 1,0 (2), 1,3 (3) изображены значения периода задержки τ . Видно, что наибольшей воспламеняющей способностью обладают продукты сгорания, соответствующие $\alpha_{\phi} = 0,75$. При $\alpha_{\phi} \geq 1$ происходит значительное сокращение диапазона, смещение его в область богатых рабочих смесей и увеличение периода задержки.

Горение в основной камере. Окончанию периода задержки соответствует момент образования в непосредственной близости от соединительного канала зоны объемного воспламенения. Эта зона быстро развивается в основной камере, вовлекая в процесс горения все новые порции рабочей смеси. При этом скорость горения не является величиной постоянной. На начальном участке она слабо зависит от $\alpha_{окн}$ и определяется интенсивностью смешения, т. е. в конечном счете — составом вспомогательной смеси. Так, например, если средние скорости распространения волны горения в определенном сечении начального участка для смесей с $\alpha_{\phi} = 0,8$, $\alpha_{окн} = 1,0$ и для смесей с $\alpha_{\phi} = 0,8$, $\alpha_{окн} = 1,2$ отличаются на 1,5 м/с (соответственно 15,7 и 14,2 м/с), то в том же сечении для $\alpha_{\phi} = 1,0$, $\alpha_{окн} = 1,2$ и для $\alpha_{\phi} = 0,8$, $\alpha_{окн} = 1,2$ различие составляет уже 6,3 м/с (соответственно 21,5 и 14,2 м/с). Кроме того, различие в составах рабочей смеси компенсируется и тем, что волна горения распространяется по среде уже нагретой и разбавленной продуктами сгорания.

По мере удаления от соединительного канала ослабевает уровень интенсивности перемешивания, снижается температурное и concentra-

ционное влияние продуктов сгорания. Это сопровождается уменьшением скорости распространения пламени до уровня ламинарного горения, которое в основном начинает зависеть от $\alpha_{осн}$ и на некотором расстоянии по оси основной камеры полностью определяется им.

Анализ всех рассмотренных выше стадий позволяет уточнить и дополнить основные положения относительно механизма форкамерного зажигания. Эти положения рассматривались в работах [2, 4, 5]. Здесь выделим три фактора, в равной степени объясняющих повышенную воспламеняющую способность продуктов сгорания богатой вспомогательной смеси по отношению к бедной рабочей.

1. В силу недостатка окислителя в продуктах сгорания богатой смеси содержится значительная доля непрореагировавших высоконагретых молекул газа (CH_4 , H_2 , CO). Эти молекулы, попадая в основную камеру, вступают во взаимодействие с кислородом, в избытке содержащимся в обедненной рабочей смеси. Результат такого взаимодействия можно наблюдать при визуализации выхода продуктов сгорания в основную камеру, заполненную воздухом, когда начавшееся было развитие реакции быстро прекращается в силу выгорания имеющихся в струе горючих компонентов.

2. В продуктах сгорания богатых вспомогательных смесей содержится повышенная концентрация химически активных атомов и радикалов, которые инициируют возникновение разветвленных цепных реакций в основной камере.

Значительная часть этих атомов и радикалов несет на себе электрический заряд, поэтому с целью выявления роли химической активности в воспламеняющей способности была проведена серия опытов, которая заключалась в воздействии на процесс форкамерного зажигания поперечного постоянного электрического поля. Для этого в стенки форкамерной системы были вмонтированы электроды, на которые подавалось электрическое поле, напряженностью $E \leq 10$ кВ/см. Размеры электродов обеспечивали однородность поля по всему сечению форкамерной системы.

На рис. 6 изображена зависимость $\tau(\alpha_{осн})$ при $E = 10$ кВ/см и диаметре соединительного канала $d_k = 5$ мм. Штриховые линии и обозначения точек аналогичны рис. 5. Видно, что электрическое поле практически не оказывает влияния на воспламеняющую способность продуктов сгорания вспомогательной смеси бедного и стехиометрического состава. В то же время период задержки при $\alpha_{осн} = 0,75$, когда в продуктах сгорания концентрация атомов и радикалов повышена, увеличивается весьма заметно. Такой рост соответствует ослаблению воспламеняющей способности, которое происходит, видимо, за счет более активной рекомбинации химических центров на стенках соединительного канала. В этом предположении эксперименты с электрическим полем подтверждают наличие химической активности у продуктов сгорания богатой вспомогательной смеси.

3. Этот фактор касается вытеснения газа из форкамеры и играет заметную роль, когда в форкамере используется богатая смесь, а в основной камере — бедная. В результате вытеснения образуется зона смешения с составом, близким к стехиометрическому, что способствует более активному развитию реакции воспламенения в непосредственной близости от соединительного канала.

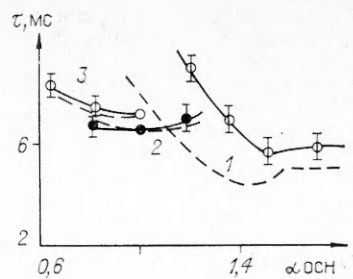


Рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионов В. Г., Шимановский О. В. Теплоэнергетика, 1987, 7, 33.
2. Гусак Л. А. Горение и взрыв: Материалы III Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— М.: Наука, 1972.

3. Семенов Е. С. Хим. физика, 1982, 1, 8, 1122.
4. Соколик А. С., Карпов В. П. Сгорание и смесеобразование в дизелях.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.
5. Самойлов И. Б. ФГВ, 1986, 22, 4, 62.

г. Москва

Поступила в редакцию 17/VIII 1988,
после доработки — 21/XI 1988

УДК 536.46

А. Г. Князева, И. Г. Дик

ЗАЖИГАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИНОЙ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА С ИНЕРТНЫМ ЭКРАНОМ МЕЖДУ НИМИ

Постановка задачи

В практике нередко возникают ситуации, когда поджигаемое конденсированное вещество не находится в прямом контакте с нагревателем. В частности, тепловое воздействие может экранироваться стенками сосудов, заполненных горючим веществом или специальными пламепреграждающими пластинами. Неидеальность теплового контакта может иметь место и в лабораторных исследованиях воспламеняемости конденсированных веществ, когда возникновение зазора между нагревателем и реагентом связано с шероховатостью поверхности или выделяющимися в ходе разогрева газами.

В связи с этим возникает задача оценки влияния характеристик экрана между нагревателем и реакционноспособным веществом на параметры зажигания и, прежде всего, на величину индукционного периода. Из возможных типов нагревателей ниже рассматривается накалившаяся пластина постоянной температуры.

Рассмотрим задачу в следующей постановке. Система из двух веществ — слоя инертного вещества 1 толщиной l и бесконечного слоя вещества 2, способного к экзотермическому химическому превращению, в момент времени $t = 0$ приводится в соприкосновение с горячей пластиной постоянной температуры T_n . Теплофизические характеристики веществ и кинетические характеристики E_2 , Q_2 , k_2 считаем независимыми от температуры. Требуется определить время зажигания вещества 2 t_i и его зависимость от характеристик инертного слоя. За t_i принимаем время от начала соприкосновения системы веществ с источником до возбуждения химической реакции. В такой постановке выгорание вещества 2 игнорируется [1].

Математически задача представляет собой сопряженную задачу теплопроводности:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Q_2 k_2 \rho_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right)$$

с начальными:

$$t = 0; T_1(0, x) = T_2(0, x) = T_0$$

и граничными условиями:

$$T_1(t, 0) = T_n, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=l} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=l},$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0.$$