

собом увеличивается для графитов в 3 раза, для электродного угля — почти в 2 раза, для угля марки АШ — на 20—30%. Из сравнения для разных температур отношений скоростей окисления порошков графита, диспергированного различными способами, следует, что энергия активации у них имеет одинаковое значение: $E = 138 \pm 4$ кДж/моль.

Сопоставление данных, полученных по методу ЭПР, с результатами опытов по низкотемпературному окислению и кинетике воспламенения и горения угольных частиц, обнаруживает достаточно четкую пропорциональность между концентрацией активных центров и скоростью их химического реагирования. Влияние характера диспергирования проявляется тем больше, чем выше степень графитизации угольного вещества, т. е. чем четче кристаллическая структура углерода вещества.

Увеличение скорости реагирования в процессах воспламенения и горения угольных частиц связано с повышением концентрации активных центров, образующихся в местах дефектов поверхности в результате диспергирования при большой величине разрушающего импульса. Поверхность частиц при струйном диспергировании имеет большую концентрацию локализованных в местах дефектов атомов с разорванными связями, вступающих в реакцию при минимальном значении энергии активации и являющихся активными центрами в реакции окисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Яворский. Горение твердого топлива. Т. 1. Новосибирск: Наука, 1974.
2. А. А. Сидоров.— В кн.: Кинетика горения ископаемых топлив. Новосибирск: Наука, 1972.
3. А. А. Сидоров, И. А. Яворский.— В кн.: Кинетика горения ископаемых топлив. Новосибирск: Наука, 1972.
4. А. С. Предводителев, Л. Н. Хитрий, О. А. Цуханова и др. Горение углерода. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1949.

УДК 536.46 : 621.436

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ФРОНТА ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ В ДИЗЕЛЕ

В. З. Махов, С. В. Гусаков

(Москва)

При анализе характера изменения скорости тепловыделения в дизеле обычно весь процесс сгорания разделяют на два основных периода: сгорание образовавшейся за период задержки воспламенения топливно-воздушной смеси и диффузионное сгорание. В первом из них, длящимся 2—5 мс, выгорает до 20—40% топлива; он играет определяющую роль в экономичности цикла в процессе образования окиси азота в дизеле. Однако мнения различных исследователей о механизме сгорания в этот период противоречивы [1, 2].

Для выявления характера протекания процесса сгорания при впрыскивании топлива проведено экспериментальное исследование на установке адиабатического сжатия с диаметром цилиндра $D_n = 102$ мм, позволяющей моделировать характер температурного поля в камере сгорания (КС) дизеля при отсутствии изменения объема и источников принудительной турбулизации в процессе воспламенения и сгорания. Установка была оборудована системами впрыскивания топлива, одноструйной форсункой, индицирования, скоростной кинорегистрации и синхронизации. Собственное свечение пламени фотографировалось с частотой $14\,000\text{ с}^{-1}$ камерой АЕГ с параллельно установленными фокусирующими системами и дисковым целевым затвором. Кинорегистрация развития негорящей топливной струи проводилась при впрыскивании топлива в холодный воздушный заряд с плотностью, равной плотности поджатого заряда,

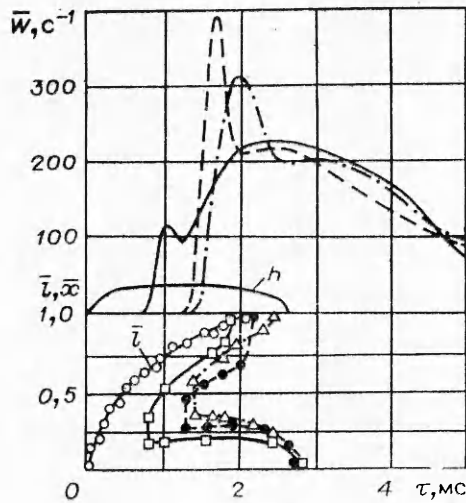


Рис. 1. Изменение относительной скорости тепловыделения (\bar{W} , с^{-1}) и характер охвата факела пламенем при различных τ_i ($l = l/D_{\text{ц}}$ — безразмерная текущая длина топливной струи, $x = x/D_{\text{ц}}$ — границы зоны свечения, h — ход иглы форсунки).

с подсветкой от постороннего блока импульсных ламп.

Опыты велись при начальных давлениях 0,075—0,3 МПа, температурах 375—453 К и подачах $G = 25 \div 150$ мг. После сжатия достигались давления $p_0 = 1,6 \div 6,6$ МПа, температуры $T_0 = 860 \div 1070$ К и задержки воспламенения (τ_i) в пределах 4,2—0,8 мс. При двойном впрыскивании топлива получены значения τ_i до 0,47 мс для второй порции топлива.

При анализе использовались также результаты совместных опытов на одноцилиндровой модельной дизельной установке с зеркальным поршнем [3]. Киносъемка с частотой 25 000 с^{-1} проводилась камерой с призматической компенсацией движения пленки. Применена импульсная подсветка, позволяющая наблюдать развитие невоспламенившейся части топливной струи [4].

На кривых относительной скорости активного тепловыделения, рассчитанной по диаграммам давления для трех режимов с $G = \text{const}$ и $\tau_i = \text{var}$ (рис. 1), основное различие проявляется в величинах и положении четко выраженных первых пиков скорости тепловыделения. Сопоставление их с кинограммами показывает, что конец резкого падения скорости сгорания после первого максимума соответствует завершению в основном охвата струи пламенем, т. е. формированию фронта диффузионного пламени вокруг струи. Далее скорости тепловыделения в пределах точности эксперимента и неидентичности смещения при изменении начальных условий близки друг к другу и определяются в стадии диффузионного сгорания скоростью смешения. При регистрации процесса сгорания на одноцилиндровой установке [3] с КС, ограниченной плоскостями поршня и головки цилиндра, при положении поршня вблизи верхней мертвой точки горящий факел может наблюдаться как бы в плоском сечении (рис. 2, а). Видно, что пламя охватывает ограниченный объем на периферии струи, не захватывая ее сердцевину.

При изменении условий воспламенения, проявляющихся прежде всего в изменении τ_i , меняется характер процесса охвата топливной струи пламенем. При минимальных значениях τ_i , полученных на уста-

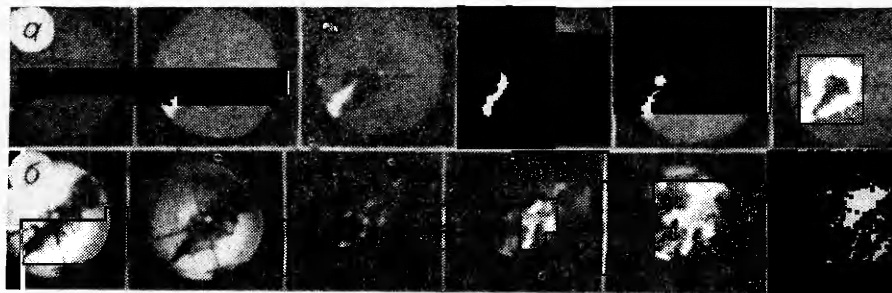


Рис. 2. Развитие процесса сгорания при впрыске топлива на моторной установке [3] (выборочные кадры через 0,17 мс).

а) $\tau_i = 0,4$ мс; б) $\tau_i = 1,8$ мс.

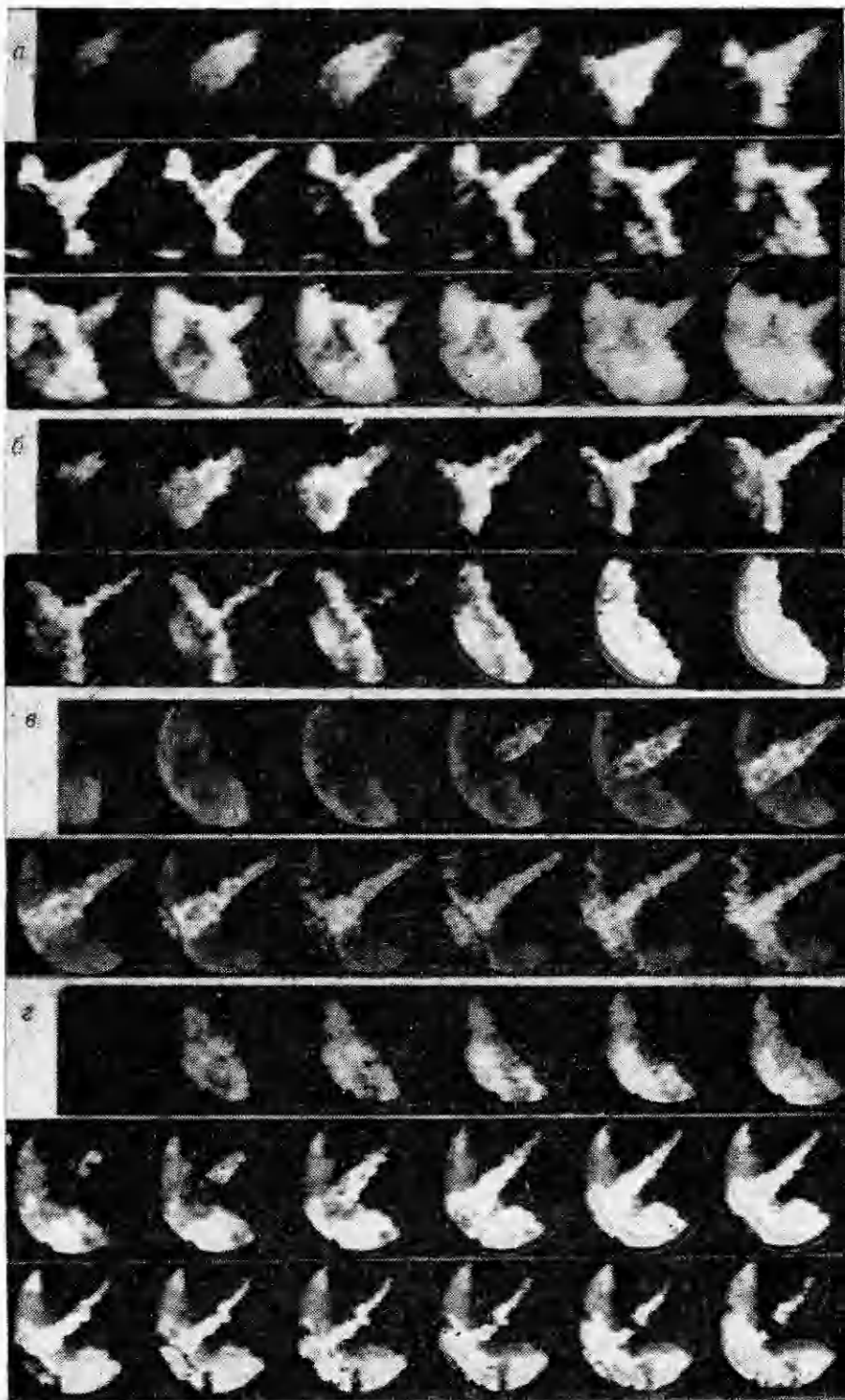


Рис. 3. Развитие процесса сгорания при впрыске топлива на установке адиабатического сжатия (выборочные кадры через 0,34 мс).
 а) $\tau_i = 0,8$ мс (с турбулизирующей решеткой); б) $\tau_i = 1,4$ мс; в) двойной впрыск, $\tau_{i1} = 4$ мс, $\tau_{i2} = 0,69$ мс; г) двойной впрыск, $\tau_{i1} = 3,66$ мс, $\tau_{i2} = 0,25$ мс.

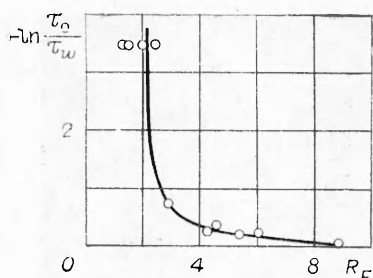


Рис. 4. Зависимость относительной продолжительности наблюдаемого распространения пламени τ_p/τ_w от критерия R_F .

повке адиабатического сжатия для второй порции топлива при двойном впрыске, возникает отдельный очаг, от которого пламя последовательно охватывает топливную струю (рис. 3, в, г). С увеличением τ_i видимое распространение пламени от начального очага сопровождается возникновением новых очагов и заканчивается одновременным появлением свечения в значительном объеме. При дальнейшем росте τ_i видимое свечение возникает по всей периферии струи практически одновременно (квазизобъемное воспламенение, рис. 3, г, первая порция топлива). Аналогичное изменение с ростом τ_i характера формирования фронта диффузионного пламени получено и на установке [3] (см. рис. 2). Повышенные значения τ_i здесь получены при использовании в качестве топлива бензина А-76.

Сама организация рабочего процесса в дизеле обуславливает развитие с начала топливоподачи химических реакций по всей периферии топливной струи. Поэтому фаза формирования фронта диффузионного пламени в дизеле является характерным примером рассмотренного в [5] случая, когда скорость перемещения фронта пламени определяется начальным распределением температур по объему с реагирующей смесью. Степень различия начальных условий воспламенения зон топливной струи может быть в первом приближении оценена величиной $R_F = -(\tau_{впр} + \tau_{см})/\tau_i$. Рост продолжительности впрыскивания топлива ($\tau_{впр}$) и времени выравнивания температуры по периферии факела, оцениваемого в данном случае характерным временем смешения ($\tau_{см} = W_{см(max)} / \int_0^\infty W_{см} u \tau$), приводит к усилению различия температур отдельных зон

топливной струи. Наоборот, увеличение располагаемого до воспламенения времени (τ_i) уменьшает эти различия. На рис. 4 по результатам опытов на установке адиабатического сжатия приведена зависимость отрицательного логарифма отношения продолжительности видимого распространения пламени (τ_p) к общей продолжительности фазы формирования фронта диффузионного пламени (τ_w) от величины R_F . При $R_F > 9$ наблюдается только распространение пламени по реагирующему заряду. Значение $R_F = 2$ соответствует предельному по частоте регистрации ($-\ln(\tau'/\tau_w) = 3,44$) случаю, когда воспламенение регистрируется как объемное. Рост видимых скоростей распространения пламени при уменьшении температуры может иметь место при спонтанном распространении пламени, так как снижение T_0 приводит к росту τ_i и выравниванию исходного распределения температур. При повышенной частоте регистрации перед фронтом пламени различаются очаги воспламенения, которые можно считать вырожденным случаем спонтанного распространения пламени при наличии крупномасштабной турбулентности (см. рис. 2, а, кадры 4 и 5).

При продолжающейся подаче топлива после воспламенения струи наблюдается задержка распространения пламени на начальный участок топливной струи и передний ее фронт до окончания подачи (см. рис. 1, рис. 3, а, б). При достижении струей стенки КС возникает расширяющаяся область гашения пламени, в которой возможно либо последующее воспламенение (см. рис. 3, б-г), либо распространение пламени от периферии горячей струи (см. рис. 3, а). При малых задержках воспламенения в области гашения последняя наблюдается некоторое время в виде движущегося от стенки КС узкого «фронта гашения». В зависимости от закона впрыскивания топлива возможно последовательное появление нескольких таких «фронтов», например, два на рис. 3, г.

Таким образом, в фазе формирования фронта диффузионного пламени нестационарной топливной струи, характерной для дизеля, зарегистрировано распространение пламени по ограниченному объему реагирующей смеси с ростом τ , переходящее в спонтанное распространение пламени и квазиобъемное воспламенение, а также явления задержки распространения и гашения пламени, предсказанные в [5, 6]. Особенности этих процессов в дизеле связана с наличием влияния нестационарного тепло- и массообмена между топливной струей и воздушным зарядом на температурное поле реагирующей смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Басевич, А. С. Соколик. ЖФХ, 1956, 4, 729.
2. В. П. Алексеев, Д. Н. Вырубов. Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых ДВС. М.: изд. МВТУ, 1977.
3. Л. С. Ронинсон, В. А. Терентьев. Двигателестроение, 1982, 2, 20.
4. В. З. Махов, В. А. Терентьев. Токсичность ДВС. Межвузовский сб. научн. трудов/Под ред. А. М. Обельницкого. М., 1977.
5. Я. Б. Зельдович. Классификация режимов экзотермической реакции в зависимости от начальных условий. Препринт ОИХФ АН СССР, 1978.
6. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, XIX, 10.

УДК 536.46 : 541.6

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ НА ПРЕДЕЛЫ И СТРУКТУРУ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ГОРЕНИИ ПОЛИМЕРОВ

А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин
(Москва)

На примере горения полимеров в окислительной атмосфере рассмотрена задача о пределах и структуре диффузионного пламени при наличии теплопотерь из прогретого слоя конденсированной фазы в термостатируемую подложку в случае аррениусовской зависимости скорости реакции от температуры в газовой фазе. Показано, что при диффузионном горении полимеров существует два предела. Первый из них представляет собой внутреннее свойство диффузионного пламени и существует всегда, даже в отсутствие потерь тепла [1, 2]. Второй предел, как это имеет место и при диффузионном горении газов [1—3], появляется только при наличии потерь тепла из зоны горения [4]. Полному гашению отвечают условия совпадения обоих пределов.

Рассматривается задача о пределах и структуре диффузионного пламени, образованного при горении пластины полимера толщиной δ в атмосфере окислителя, лежащей на термостатированной подложке. Система уравнений, определяющая распределение температуры и концентраций в приближении приведенной пленки, при диффузионном горении имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2(\tau T)}{dx^2} - \frac{u}{\kappa} \frac{d(\tau T)}{dx} &= -F, \\ \frac{d^2(\alpha_i a_i)}{dx^2} - \frac{u}{D} \frac{d(\alpha_i a_i)}{dx} &= F, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_i — массовые концентрации реагентов; $F = z a_1 a_2 \exp(-E/RT)$ — аррениусовская функция тепловыделения; z — предэкспонент; E — эффективная энергия активации реакции горения; T — температура; R — универсальная газовая постоянная; D и κ — коэффициенты диффузии и температуропроводности; α_i и τ — коэффициенты, устанавливающие соотношение между потреблением исходных реагентов в зоне реакции и