

А. А. Скрипник¹, С. М. Фролов², Р. З. Кавтарадзе¹
(Россия, ¹Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ²ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ТОПЛИВНОЙ СТРУЕ

Рассмотрим плоскую струю топлива, подаваемую со скоростью u_1 в камеру, заполненную покоящимся воздухом плотностью ρ_2 , при давлении p_2 и температуре T_2 . После распада струи на капли на её границе возникает слой турбулентного смешения, в котором плотность струи ρ изменяется от значения в ядре струи ρ_1 до плотности воздуха ρ_2 (рис. 1). Примем следующие упрощающие допущения:

- (1) продолжительность стадии распада струи пренебрежимо мала;
- (2) струя топлива состоит из очень мелких капель и её поведение подобно поведению плотного газа с эквивалентной плотностью в ядре струи ρ_1 ;
- (3) турбулентное смешение топливной струи с воздухом – изотермическое, т.е. охлаждением газа вследствие испарения капель пренебрегаем;
- (4) рассматривается участок струи до смыкания слоя смешения на плоскости симметрии, т.е. участок АВ на рис. 1.

Принимая систему координат как на рис. 1 и, учитывая допущения (1) - (3), запишем дифференциальные уравнения неразрывности и количества движения, связывающие плотность ρ с продольной и поперечной скоростями течения u и v в слое смешения с учетом турбулентной вязкости:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0;$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \frac{\partial u}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2},$$

где $l = \sqrt{2c\chi}$ – длина перемешивания по Толлмину, c – константа.

Тот факт, что величины ρ , u и v остаются постоянными на границах, позволяет предположить, что суще-

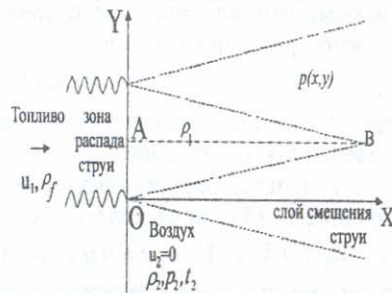


Рис. 1 Схема течения при подаче струи жидкого топлива в камеру сгорания

© Скрипник А.А., Фролов С.М.,
Кавтарадзе Р.З., 2003

стует подобие распределений плотности и скорости в различных сечениях потока. Кроме того, система (1) имеет автомодельное решение.

В результате решения были получены значения скоростей топливо-воздушной смеси в слое смешения и концентрации смеси.

Для определения места воспламенения введем в систему уравнений (1) дополнительный член, описывающий изменение концентрации дизельного топлива вследствие протекания химических реакций. При этом система (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0; \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \frac{\partial u}{\partial y} \right]; \\ u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} &= l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + S; \end{aligned} \quad (2)$$

где S – химический источник $S = -k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$.

Чтобы определить область, где возможно воспламенение, решали систему уравнений (2) и сравнивали полученное решение с решением системы (1) без источника. За критерий начала воспламенения принимали отличие плотностей в задаче без источника и с источником более чем на некоторую величину ε_0 , исходя из соотношения для предвзрывного разогрева: $\varepsilon_0 = \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{RT_0}{E}$.

Ввиду того, что на предвзрывном разогреве протекание химической реакции незначительно искажает поле плотности и концентрации, предположим, что влияние предпламенных процессов на поле концентрации можно представить в виде:

$$\alpha'(x, y) \approx \alpha(x, y)[1 - \varepsilon(x, y)], \quad (3)$$

где α' – концентрация топлива в реагирующей смеси, α – концентрация, определенная из системы (1), ε – малая поправка.

Результат совместного численного решения систем (1) и (2) с использованием (3) представлен на рис. 2 в виде полосы, в которой $\varepsilon = \varepsilon_0 \pm 0.1\%$. При $x \approx 9 \text{ мм}$ условие $\varepsilon = \varepsilon_0$ выполняется практически во всем сечении слоя смешения. Следовательно, в соответствии с принятым критерием воспламенение вещества происходит именно в этом сечении слоя смешения.

Чтобы более точно найти местоположение очага воспламенения, рассчитывали траектории частиц.

Из всех выбранных частиц находили единственную, время движения которой до линии воспламенения в точности равно задержке воспламенения, найденной по эмпирической зависимости. Найденное место воспламенения показано на рис. 2 звездочкой. Видно, что воспламенение происходит на периферии исходной топливной струи в глубине слоя смешения. Расчетное расстояние от среза соплового отверстия ($x=0, y=0$) до места воспламенения (≈ 9 мм) вполне согласуется с экспериментальными наблюдениями по воспламенению осесимметричных дизельных струй. Широкая полоса — область наиболее вероятного воспламенения ($\varepsilon = \varepsilon_0 \pm 0.1\%$).

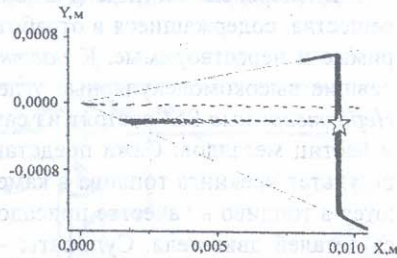


Рис. 2. Расчетное местоположение очага воспламенения в слое смешения топливной струи: ★ - место воспламенения; штриховые линии соответствуют траекториям некоторых выбранных частиц; сплошные линии — границы слоя смешения

Предложена математическая модель смешения плоской топливной струи с воздухом в условиях дизельного двигателя. Модель удовлетворительно описывает профили скорости и концентрации топлива в слое смешения. Дополнение модели уравнением изотермической химической реакции позволило определить местоположение очага самовоспламенения, которое согласуется с экспериментальными наблюдениями.

А.Р. Кульчицкий (Россия, Владимир, ОАО ВТЗ)

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДВС

С 01.07.2000 г. в России введен в действие ряд международных нормативных документов, регламентирующих содержание вредных веществ в отработавших газах (ОГ) дизелей, а также автотранспортных средств с дизелями, в качестве ГОСТ Р. Отличительной особенностью этих стандартов является расширение перечня нормируемых веществ. К оксидам азота NO_x , оксиду углерода CO и суммарным углеводородам C_nH_m добавлены дис-

© Кульчицкий А.Р., 2003