

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ В ОБЛАКЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

**В. Я. Басевич, А. А. Борисов, В. А. Сметанюк,
С. М. Фролов, Ф. С. Фролов**

Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова
Российская академия наук
г. Москва

Известно, что в момент подачи струи жидкого топлива воздух в цилиндре дизеля имеет высокое давление (20–80 атм) и температуру (800–900 К). Капли топлива испаряются, образуя неоднородную капельно-паровоздушную смесь, способную к самовоспламенению. Именно самовоспламенение отдельных объемов смеси и последующее горение распыленного топлива в камере сгорания дизеля составляют важнейшую стадию рабочего процесса. Основные характеристики двигателя, включая содержание вредных веществ в выхлопных газах, зависят от скорости и режима сгорания топлива. Глубокое понимание физико-химических закономерностей самовоспламенения и горения распыленного топлива в условиях дизеля даст возможность правильно организовать рабочий процесс с ультранизким выходом вредных веществ, не прибегая к использованию каталитических дожигателей.

Цель данной работы — построить физико-математическую модель самовоспламенения и горения облака капель жидкого топлива, которая бы учитывала конечные скорости диффузии и химических превращений, а также экранирующие эффекты соседних частиц в облаке. Поскольку такая модель предназначена для применения в многомерных расчетах на оптимизацию рабочего процесса дизеля, основное требование к ней — адекватность и простота. В основу такой модели были положены результаты наших предыдущих исследований испарения и самовоспламенения капель, основанные на

численном решении полной сопряженной задачи с многокомпонентной диффузией и реакцией в газовой фазе [1].

На первом этапе было проведено параметрическое исследование закономерностей самовоспламенения капельных газовзвесей *n*-декана и *n*-тетрадекана в условиях дизеля с использованием полной модели [1]. Для этой цели все определяющие параметры варьировали в широком диапазоне значений: начальный диаметр капель d_0 — от 5 до 150 мкм, коэффициент избытка горючего в капельном облаке Φ — от 0,1 до 2,0, давление p_0 — от 20 до 80 атм, температуру воздуха T_0 — от 800 до 900 К. Кинетику химических превращений описывали с помощью проверенного глобального механизма с 6 компонентами и 5 реакциями. Оказалось, что в расчетах самовоспламенение происходило на некотором приведенном расстоянии от центра капли $\delta_* = d_*/d_0$ при некоторой приведенной температуре $\theta_* = T_*/T_0$, причем значения δ_* и θ_* слабо зависели от определяющих параметров задачи. Этот эффект связан с относительно слабым влиянием определяющих параметров задачи на процессы переноса в газе и сильным их влиянием на скорость химических превращений: самовоспламенение происходило на таком расстоянии от капли, где образовывалась смесь, близкая к стехиометрической, при температуре, обеспечивающей прогрессирующее самоускорение реакции (в соответствии с теорией Н. Н. Семёнова). Средние значения δ_* и θ_* по всем проведенным расчетам для двух топлив оказались равными 3,7 и 0,91 соответственно, причем максимальные отклонения по θ_* не превышали 10%. Этот замечательный результат явился важной предпосылкой для разработки простой модели самовоспламенения и горения капель в облаке. Из него следует, что самовоспламенение паровоздушной смеси в окрестности капли происходит тогда, когда приведенная температура газа $\theta = T/T_0$ на расстоянии δ_* достигает значения θ_* . Если считать, что скорость химических превращений на предвзрывном разогреве относительно мала, задержку самовоспламенения капли τ_i можно определить, используя модель испарения капли. Действительно, выполненные нами расчеты испарения капельных газовзвесей *n*-декана и *n*-тетрадекана в условиях дизеля подтвердили справедливость этой гипотезы.

На втором этапе, используя полученный результат, была разработана простая модель самовоспламенения и горения капель в условиях дизеля. В основу модели была положена расширенная

модель испарения капель в капельной газозвеси [2], дополняющая модель [3]. В отличие от модели [3], разработанной для одиночной капли, в расширенной модели рассматривается мгновенное распределение температуры в окрестности капли, описываемое параболической кривой с максимумом температуры T_{\max} в пространстве между соседними частицами в газозвеси. В моделях [2, 3] динамика испарения капли описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями баланса массы и энергии. Кроме того, в этих моделях учитывается нестационарный характер теплообмена газа и капли: коэффициент теплоотдачи зависит от времени. Следуя критерию самовоспламенения, предложенному выше, самовоспламенение капли происходит, когда на параболическом профиле температуры $\theta(\delta_*) = \theta_*$. Сразу после истечения задержки самовоспламенения вокруг капли устанавливается фронт пламени: начинается стадия диффузионного горения. На этой стадии тепловой поток на поверхность капли определяется уже не максимальной температурой газа T_{\max} , а температурой пламени T_f . Одновременно с диффузионным пламенем, окружающим каплю, в топливно-воздушной смеси между каплями также могут протекать химические реакции, приводящие к объемному самовоспламенению и распространению пламени. В данной работе газофазное горение в пространстве между каплями описывалось моделью Сполдинга со скоростью горения, обратно пропорциональной локальной частоте турбулентных пульсаций.

На рис. 1 показаны последовательные расчетные распределения температуры в облаке капель *n*-декана с начальным диаметром 60 мкм в воздухе при $T_0 = 900$ К и $p_0 = 20$ атм. Размер расчетной области 1×1 см. Расчет проведен с помощью вычислительной программы для вязких сжимаемых многофазных турбулентных течений с учетом межфазного обмена массой, количеством движения и энергией с новой моделью самовоспламенения и горения капель. Видно, что самовоспламенение в газовой фазе происходит на периферии облака, где минимальны эффекты охлаждения газа за счет испарения частиц. В дальнейшем фронты горения распространяются вглубь облака. Примечательно, что в расчете одновременно наблюдаются акты самовоспламенения капель, диффузионные пламена вокруг одиночных капель и групп капель, акты погасания капель ввиду отсутствия кислорода и повторного зажи-

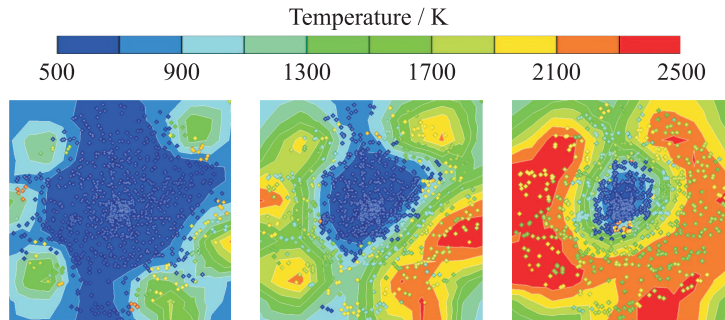


Рис. 1 Расчетные распределения температуры в облаке капель н-декана при $d_0 = 60$ мкм, $T_0 = 900$ К и $p_0 = 20$ атм. Слева направо: $t = 4$; 4,5 и 5 мс

гания при конвективно-диффузионном притоке кислорода, испаряющиеся капли, а также газофазное горение паров топлива в пространстве между каплями. Вследствие динамической инерционности капель в расчете наблюдаются и элементы конвективного механизма горения газозвеси: частицы зажигаются в конвективных потоках горячих газов. В дальнейшем планируется проверить прогнозирующую силу модели путем сравнения с известными экспериментальными результатами.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 05-08-50115, 07-08-00558 и 08-08-00068).

Литература

1. Frolov, S.M., V.Ya. Basevich, A.A. Belyaev, V.S. Posvyanskii, and V.A. Smetanyuk. 2005. Modeling of drop evaporation and combustion with regard for spray effects. In: *Combustion and pollution: Environmental effect*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and A. M. Starik. Moscow: TORUS PRESS. 117–32.
2. Фролов Ф. С., Сметанюк В. А., Фролов С. М. Модель испарения капель в газозвеси // В сб. трудов XXXI Академических чтений по космонавтике. Москва: Комиссия РАН, 2007. С. 157–158.
3. Frolov, S. M., F. S. Frolov, and B. Basara. 2006. Simple model of transient drop vaporization. *J. Russian Laser Research* 27(6):562–74.