

С.М. Фролов, В.С. Посвянский, В.Я. Басевич, А.А. Беляев  
(Россия, Москва, ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН),  
O. ESMILAIRE, C. JABLON, P. SCHMELZLE (France, Paris, TotalFinaElf Co.)

## ГОРЕНИЕ ЧИСТОГО И ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА

*Введение.* Использование водных эмульсий моторных топлив давно рассматривают как один из перспективных путей снижения выхода вредных веществ с отработавшими газами [1]. Считается, что добавление воды в топливо снижает максимальную температуру цикла и, следовательно, концентрацию окислов азота в продуктах сгорания. Присутствие воды в топливе может привести к изменению нормальной скорости распространения пламени [2], способствует превращению CO в CO<sub>2</sub> [3] и снижению сажеобразования [4] в дизелях. Известно [5], что добавление воды или низших спиртов в топливо приводит к взрывному испарению и горению жидких капель («микровзрыв») и вторичному дроблению топливных струй, т.е. к интенсификации процессов смешения топлива с воздухом. Кроме позитивного влияния, добавление воды в топливо сопряжено и с негативными эффектами: увеличением задержки воспламенения и усилением цикловой нестабильности рабочего процесса.

Несмотря на длительные и детальные исследования, до сих пор остается невыясненным вопрос о механизме влияния воды на горение водотопливных эмульсий. Это связано с необычайной сложностью физико-химических процессов, сопровождающих впрыск струи водотопливной эмульсии в камеру сгорания, дробление струи, испарение, воспламенение и горение двухфазной парогазокапельной смеси в условиях переменного давления и т.д. В настоящее время отсутствуют даже модели испарения, воспламенения и горения одиночной капли эмульгированного топлива. Существует лишь качественная теория, объясняющая явление «микровзрыва» капли эмульсии, состоящей из тяжелого углеводородного топлива и летучей жидкости (вода, низшие спирты).

Цель данной работы – сравнительное исследование горения капли чистого топлива и водотопливной эмульсии. В работе предложена математическая модель горения капли, учитывающая возможность образования паровых пузырьков в жидкости вследствие вскипания микрокапель воды.

*Математическая модель.* В основу математической модели положена следующая феноменология процесса. Рассматривается сферическая капля углеводородного топлива, по всему объему которой равномерно распреде-

© Фролов С.М., Посвянский В.С., Басевич В.Я., Беляев А.А.,  
Esmilaire O., Jablon C., Schmelzle P., 2001

лени микрокапли воды (эмульсия). Капля помещена в безграничный объем воздуха. Определенным образом создаются условия для испарения вещества и зажигания паров горючего в газовой фазе. На некотором расстоянии от капли появляется сферически симметричная область с высокой температурой (пламя). Тепловой поток, поступающий в каплю, разогревает ее внутренние слои. Температура кипения воды значительно (на 150...200 °С) ниже температуры кипения топлива, поэтому в процессе нагрева внутренних слоев начинается парообразование на микрокаплях воды – появляются пузырьки водяного пара. Волна парообразования воды распространяется внутрь капли эмульсии. Вследствие расширения пузырьков увеличивается объем жидкости. Одновременно происходит испарение горючего с внешней поверхности капли. В первом приближении указанный процесс считается непрерывным, т.е. без нарушения устойчивости границ раздела между паровыми пузырьками и топливом, внезапного взрыва капли и выброса водяного пара наружу. Внутренние конвективные течения в капле и коагуляция паровых пузырьков не учитываются. В газовой фазе протекают реакции окисления топлива в воздухе с образованием сажи, CO, NO и т.д. Процесс заканчивается при полном сгорании топлива.

Основные уравнения модели включают нестационарные уравнения энергии для трехфазной среды внутри капли эмульсии, полные уравнения неразрывности, теплопроводности и диффузии в газовой фазе, а также граничные и начальные условия. На поверхности капли ставятся условия сопряжения решений в газовой фазе и в капле и условия для концентраций компонентов. В центре капли ставится условие симметрии температурного поля, а на внешней границе газовой фазы – условие отсутствия градиентов. Все теплофизические свойства считаются функциями давления и температуры. Используется эмпирический механизм окисления горючего в газовой фазе [6,7], включающий 10 компонентов: горючее ( $C_{14}H_{30}$ ),  $O_2$ ,  $N_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ , NO, сажа и обобщенный радикал R.

Зажигание капли моделировали, изменяя во времени энергию активации в выражении для скорости реакции разложения топлива: от весьма низкого значения (около 10 ккал/моль) до истинного значения (50 ккал/моль). Характерное время зажигания (100 мкс), как правило, более чем на порядок отличалось от времени жизни капли.

Задачу решали численно методом прогонки с использованием неконсервативной конечно-разностной схемы первого порядка аппроксимации на неравномерной подвижной расчетной сетке. Точность расчетов контролировали с помощью элементного баланса атомов C и H (как правило, не ниже 0,1...0,3 %).

*Результаты расчетов.* Расчеты проводили для капель нормального тетрадекана и его водных эмульсий с массовой долей воды от 1 до 30 %. Расчеты показали, что для капли эмульсии известный квазистатистический закон газификации капли  $d^2$  не реализуется. Приблизительно в течение по-

ловины времени жизни капли ее начальный размер увеличивается вследствие расширения паровых пузырьков. Константа горения  $K_c$ , определенная по времени жизни капли, хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [8]. На последних стадиях горения капли истинная константа газификации существенно (в 3...4 раза) превышает  $K_c$ . Эту стадию эволюции капли можно условно назвать стадией «микровзрыва».

На рис. 1,а и 1,б показана эволюция температуры для капли чистого топлива и капли эмульсии соответственно. Можно выделить три стадии процесса: 1) зажигание, 2) расширение пламени и 3) «схлопывание» пламени. После зажигания в жидкости имеются значительные градиенты температуры (до 100...150 К). Пламя (см. максимум температуры) сначала отходит от капли, а затем начинает движение назад к капле («схлопывается»).

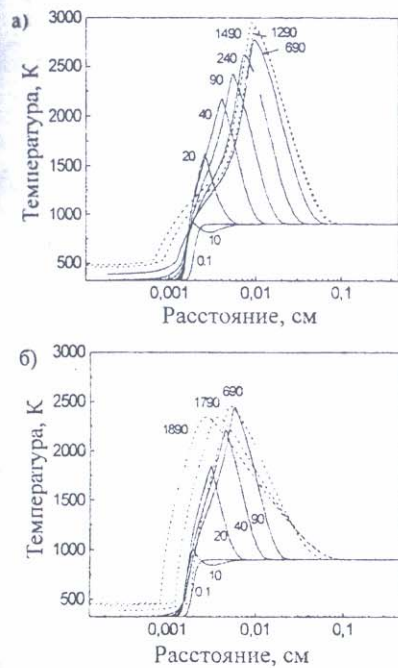


Рис. 1. Расчетные профили температуры при горении капли начального диаметра 30 мкм при давлении 5 атм: а – капля n-тетрадекана; б – капля эмульсии 90 % n-тетрадекан + 10 % вода. Штриховые линии соответствуют профилям температуры на стадии схлопывания пламени; числа обозначают время, мкс

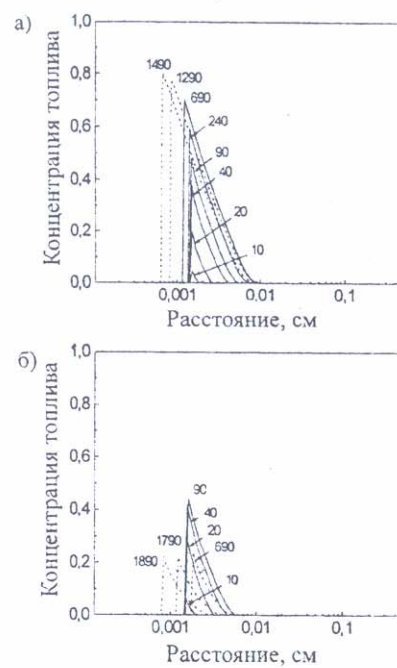


Рис. 2. Расчетные профили концентрации топлива при горении капли начального диаметра 30 мкм при давлении 5 атм: а – капля n-тетрадекана; б – капля эмульсии 90 % n-тетрадекан + 10 % вода. Штриховые линии соответствуют профилям температуры на стадии схлопывания пламени; числа обозначают время, мкс



Именно на стадии «схлопывания» пламени размер капли стремительно уменьшается. В случае капли эмульсии пламя имеет меньшую температуру (вследствие влияния воды) и расположено ближе к поверхности капли. Последнее связано с меньшим парциальным давлением паров топлива на поверхности капли и, следовательно, с меньшим количеством пара горючего, аккумулированного между каплей и пламенем. Этот факт иллюстрируется на рис. 2,а и 2,б, где приведены расчетные профили концентраций топлива для двух рассматриваемых случаев.

Вследствие более близкого расположения пламени к капле эмульсии и более ярко выраженной стадии «схлопывания» количество сажи, образующей при горении эмульсии, значительно меньше, чем при горении чистого топлива (рис. 3,а и 3,б). Из рис. 3 видно, что горение капли сопровождается образованием сферической сажевой оболочки между пламенем и поверхностью капли – в зоне, обогащенной горючим.

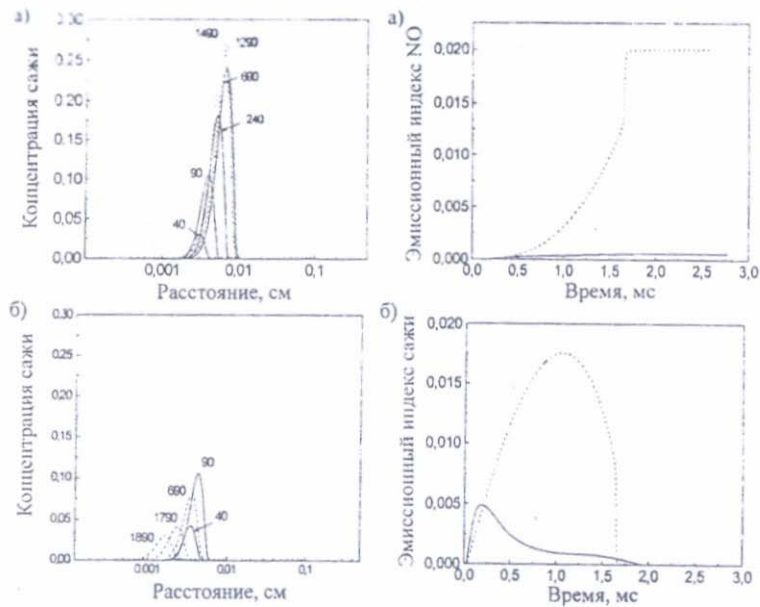


Рис. 3. Расчетные профили сажи при горении капли начального диаметра 30 мкм при давлении 5 атм: а – капля н-тетрадекана; б – капля эмульсии 90 % н-тетрадекан + 10 % вода. Штриховые линии соответствуют профилям температуры на стадии схлопывания пламени; числа обозначают время, мкс

Рис. 4. Расчетные эмиссионные индексы при горении капли н-тетрадекана (штриховые линии) и эмульсии 90 % н-тетрадекан + 10 % вода (сплошные линии) с начальным диаметром 30 мкм при давлении 5 атм: а – NO; б – сажа

Сажевая оболочка сначала формируется вблизи поверхности капли, а затем, перемещаясь вслед за пламенем, достигает приблизительно постоянной толщины. Массовая концентрация сажи в оболочке увеличивается вплоть до стадии «схлопывания» пламени. На стадии «схлопывания» в силу кинетических различий реакций горения и сажеобразования сажевая оболочка попадает в высокотемпературную область пламени. Здесь сажа сгорает, окисляясь до CO и CO<sub>2</sub>. Та часть сажи, которая не успевает сгореть в «схлопывающемся» пламени, фактически остается непрореагировавшей. Аналогичный механизм сажеобразования присущ и горению капли чистого топлива.

Определим эмиссионный индекс  $j$ -го вещества как отношение полной массы этого вещества в газовой фазе  $m_j$  к начальной массе капли  $m_{d0}$ , т.е.

$$\eta_j(t) = \frac{m_j(t)}{m_{d0}} = \frac{4\pi \int_0^{\infty} \rho_j r^2 dr}{m_{d0}},$$

где  $r_s$  – радиус капли в момент времени  $t$ ,  $r$  – радиальная координата,  $\rho_j$  – парциальная плотность  $j$ -го вещества в газовой фазе. На рис. 4,а и 4,б показаны рассчитанные эмиссионные индексы NO и сажи. Видно, что в процессе горения капли эмульсии образуется значительно меньше NO и сажи.

Проведен параметрический анализ влияния количества воды в эмульсии, начальных давления и температуры, а также размеров капли и микрокапель воды на время жизни капли эмульсии и константы газификации.

**Заключение.** Предложена математическая модель горения капли тяжелого углеводородного топлива и капли водо-топливной эмульсии. Показано, что добавление воды в топливо со сравнительно низкой летучестью паров позволяет управлять характеристиками горения капель и уровнем эмиссии вредных веществ (NO, сажа, углеводороды).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.М. Топливные эмульсии. – М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Лернер М.О. Химические регуляторы горения моторных топлив. – М.: Химия, 1979.
3. Yuanji M., Chongji Z., et al. SAE Paper No. 865017.
4. Mollenhauer K., Zelenka P. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 1988, 47,1.
5. Lasheras J.-C., Fernandez-Pello, Dryer F.L. Proc. 18th Symposium (Intern.) on Combustion, Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1981, p.293.
6. Басевич В.Я., Беляев А.А., Фролов С.М. // Химическая физика. – 1998. – № 9. – С. 112.
7. Басевич В.Я., Беляев А.А., Фролов С.М. // Химическая физика. – 1998. – № 10. – С. 71.
8. Wang C.H., Liu X.Q., Law C.K. Combustion and Flame, 1984, Vol.56, p. 175.