

МЕХАНИЗМ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАПЕЛЬ
СУСПЕНЗИОННЫХ ГОРЮЧИХ**Ф. С. Фролов, С. М. Фролов**ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Один из перспективных способов повышения эффективности рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания, включая поршневые двигатели, а также жидкостные ракетные и прямоточные воздушно-реактивные двигатели, — использование суспензионных горючих с добавками ультрадисперсных частиц механоактивированных нанокompозитных порошков энергоемких материалов, содержащих металлическое горючее (например, Mg или Al) и твердый окислитель (например, MoO₃ или фторопласт). Реакционная способность таких порошков характеризуется исключительно высокой температурной чувствительностью, обусловленной химическим взаимодействием между активированными компонентами.

Экспериментальные исследования самовоспламенения суспензионных горючих с добавками частиц энергоемких нанокompозитов в статической установке перепускного типа показали [1], что, начиная с некоторых «пороговых» значений температуры реактора, частицы механоактивированных нанокompозитов значительно (более чем на порядок) сокращают задержки самовоспламенения смесей суспензионных горючих с воздухом по сравнению с воздушной смесью чистого жидкого горючего. При использовании n-гептана в качестве горючей жидкости наиболее активной добавкой (2,5 % (вес.)), приводящей к наименьшему «пороговому» значению температуры (около 567 К), оказался механоактивированный нанокompозит Mg–MoO₃.

Испытания, выполненные нами совместно с Владимирским государственным университетом на четырехцилиндровом дизеле воздушного охлаждения типа 4Ч10,5/12 с рабочим объемом 4,16 л производства Владимирского тракторного завода, показали, что применение дизельного топлива с добавками механоактивирован-

ного нанокompозита Mg–MoO₃ (1, 2, 3, 4 и 5 % (вес.)) приводило к таким положительным эффектам как (1) снижение максимальной скорости нарастания давления газов в цилиндре; (2) снижение максимального давления газов; (3) увеличение полноты сгорания дизельного топлива. При работе на суспензионном горючем индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) дизеля возрастал на 10%–12%, что в идеале означало уменьшение расхода дизельного топлива до 10%–12%.

Чтобы объяснить описанные выше экспериментальные данные, необходимо детальное исследование поведения капель такого горючего в камере сгорания. Одно из возможных объяснений наблюдаемым эффектам — «микровзрыв» капель суспензионного горючего вследствие быстрой экзотермической реакции между активированными компонентами в частицах нанокompозита при их прогреве внутри капли. Как известно, «микровзрывы» капель приводят к гомогенизации топливно-воздушной смеси и повышению полноты сгорания [2]. Цель данной работы — на основе теоретического анализа прогрева капель дизельного топлива при их испарении, самовоспламенении и горении выяснить, достигаются ли внутри капли условия для ее «микровзрыва».

Для определенности рассматривали капли n-тетрадекана (индивидуальный углеводород, часто используемый для моделирования дизельного топлива) и n-гептана с малыми добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃. В качестве условия «микровзрыва» приняли прогрев жидкости в капле до «пороговой» температуры $T_{th} = 567$ К, обнаруженной экспериментально в [1]. Прогрев капли рассчитывали, используя вычислительную программу [3], позволяющую проследить за эволюцией пространственных распределений скорости, плотности, температуры и концентраций компонентов в капле и в газе на основе решения системы сопряженных нестационарных дифференциальных уравнений неразрывности, многокомпонентной диффузии и теплопроводности, записанных в сферической системе координат, при переменных теплофизических свойствах веществ и постоянном давлении. Влиянием частиц нанокompозита на прогрев и испарение капли пренебрегали.

На рис. 1 показаны результаты расчета динамики прогрева испаряющейся капли n-тетрадекана начального диаметра $d_0 = 30$ мкм

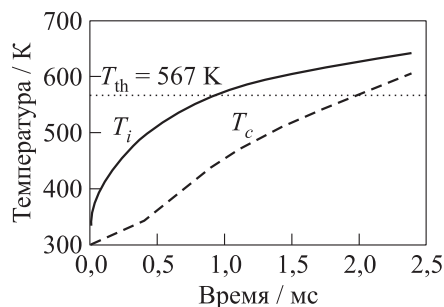


Рис. 1 Расчетные зависимости температуры поверхности T_i (сплошная кривая) и температуры центра T_c (штриховая кривая) капли н-тетрадекана начального диаметра 30 мкм в воздухе с температурой 1000 К при давлении 50 атм. Начальная температура капли 300 К. Пунктирная горизонтальная линия соответствует «пороговому» значению температуры $T_{th} = 567$ К, при которой наступает «микровзрыв» капли. Критическая температура н-тетрадекана $T_* = 694$ К

в воздухе с температурой $T = 1000$ К при давлении $p = 50$ атм. Динамика прогрева иллюстрируется расчетными зависимостями температуры поверхности капли T_i и температуры в центре капли T_c от времени. Пунктирная горизонтальная линия соответствует «пороговому» значению температуры $T_{th} = 567$ К, при которой наступает «микровзрыв» капли. Видно, что для капли диаметром 30 мкм условие «микровзрыва» выполняется при времени $t \geq 1$ мс. Параметрические расчеты для капель начальным диаметром $d_0 = 10$ и 20 мкм показали, что для таких капель условие микровзрыва выполняется еще раньше, при $t \geq 0,2-0,5$ мс, причем давление не оказывает существенного влияния на результат (при изменении p в пределах от 20 до 60 атм). Снижение температуры воздуха до 800 К приводит к тому, что для капли диаметром 30 мкм условие «микровзрыва» выполняется при $t \geq 1,5$ мс.

Отметим, что в условиях дизеля задержка воспламенения всегда $t_{ign} \geq 0,7-1,0$ мс [3]. Это связано с конечной скоростью химических превращений, диффузионным торможением реакции, а также с конечным временем распада топливной струи. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что в условиях такта сжатия

дизеля ($p = 30\text{--}60$ атм, $T = 800\text{--}1000$ К, $d_0 = 10\text{--}30$ мкм) характерное время «микровзрыва» капли суспензионного горючего с малыми добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃ сопоставимо с задержкой самовоспламенения углеводородного горючего. Поэтому повышение индикаторного КПД дизеля в экспериментах, описанных выше, можно, по-видимому, объяснить «микровзрывом» капель и гомогенизацией заряда топливно-воздушной смеси.

Обратимся теперь к экспериментам [1] с суспензионным горючим на основе *n*-гептана. Прежде всего, отметим, что критическая температура *n*-гептана равна $T_* = 540,2$ К. Поскольку «пороговое» значение температуры $T_{th} = 567$ К $> T_*$, при испарении капель *n*-гептана с добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃ условие «микровзрыва» не выполняется. Поэтому для явлений, наблюдаемых в экспериментах [1], следует искать другие объяснения, не связанные с «микровзрывом» капель. В частности, как одно из объяснений резкого снижения задержки самовоспламенения при $T > T_{th}$ можно рассматривать реакцию наноразмерного магния с кислородом воздуха или с MoO₃ внутри «сухой» частицы нанокompозита.

Таким образом, в работе проведен анализ возможных механизмов самовоспламенения капель *n*-тетрадекана и *n*-гептана с добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃. Показано, что в условиях такта сжатия дизеля характерное время «микровзрыва» капли суспензионного горючего, вызванного химическим взаимодействием между активированными компонентами внутри капли, сопоставимо с задержкой самовоспламенения *n*-тетрадекана. Следовательно, в этих условиях возможны «микровзрывы» капель, приводящие к гомогенизации заряда топливно-воздушной смеси и повышению эффективности сжигания топлива. В отличие от капель *n*-тетрадекана для капель *n*-гептана с добавками ультрадисперсных частиц механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃ условие «микровзрыва» не выполняется. Наблюдаемое в опытах снижение задержки самовоспламенения при температурах выше «порогового» значения можно объяснить, например, реакцией наноразмерного магния с кислородом воздуха или с MoO₃ внутри «сухой» частицы нанокompозита.

Работа выполнена по Государственному контракту № 019-600.2009 по Научно-технической программе Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» на 2009–2012 гг. («Нанотехнология-СГ»), Государственным контрактам № П502 и № П1085 по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., а также при частичной поддержке РФФИ (проекты 08-08-00068 и 07-08-00558).

Литература

1. Борисов А. А., Колбанёв И. В., Стрелецкий А. Н., Трошин К. Я., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Самовоспламенение суспензионных топлив в воздухе // Горение и взрыв / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. Вып. 3. С. 118–123.
2. Фролов С. М., Посвянский В. С., Басевич В. Я., Беляев А. А., Esmilaire O., Jablon S., Schmelzle P. Горение чистого и эмульгированного топлива // В сб. «Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС» / Под ред. В. В. Эфроса, А. Н. Гоца. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2001. С. 29–33.
3. Фролов С. М., Басевич В. Я., Фролов Ф. С., Борисов А. А., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Гоц А. Н. Корреляция между испарением и самовоспламенением капли // Химическая физика, 2009. Т. 28. № 5. С. 3–18.