

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ В ВОЗДУХЕ

**А. А. Борисов, И. В. Колбанёв, А. Н. Стрелецкий,
К. Я. Трошин, С. М. Фролов, Ф. С. Фролов**

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

В последние годы в ИХФ РАН активно развивается метод механической активации смесей энергоёмких материалов и создания механоактивированных энергетических композитов (МАЭК) [2, 1]. Это направление является новым, и его возможности реализованы далеко не полностью.

Цель данной работы — исследование самовоспламенения нового суспензионного горючего с добавками механоактивированных нанокompозитных порошков энергоёмких материалов. Во всех исследованных суспензионных горючих в качестве жидкого топлива использовали *n*-гептан, а в качестве диспергированной твердофазной добавки — смеси активированных нанодисперсных порошков трех видов: (1) Mg–MoO₃, (2) Al–MoO₃ и (3) тефлон–MoO₃. Эксперименты по измерению задержек самовоспламенения суспензионных горючих в смесях с воздухом проводили в статической установке перепускного типа с внутренним диаметром реактора 120 мм в диапазоне температур от 560 до 660 К при давлении 1,4–1,5 ата.

Навеску исследуемого суспензионного горючего помещали в U-образную трубку, один конец которой выходил в реактор, а другой соединялся с камерой высокого давления через электромагнитный клапан. Навеска суспензионного горючего, подаваемого через U-образную трубку в реактор, соответствовала массе, необходимой для создания в реакторе стехиометрической (в среднем) воздушной смеси. После открытия клапана диспергированное в потоке холодного воздуха горючее вносилось в нагретый до заданной температуры реактор и смешивалось с горячим воздухом. Время открытия клапана составляло 0,2 с. Температурные измерения, проведенные

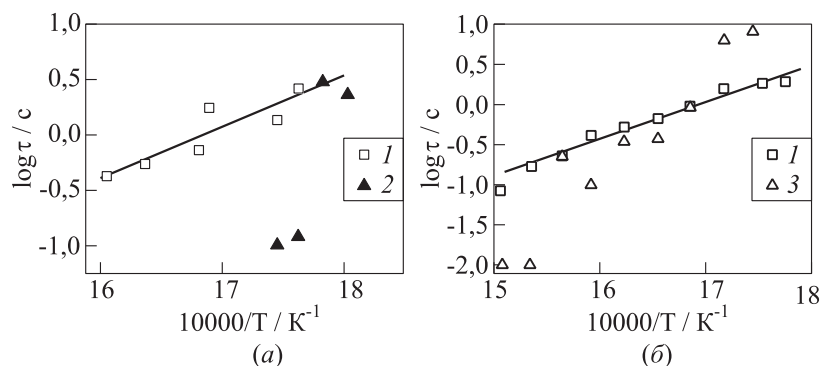


Рис. 1 Измеренные зависимости задержек воспламенения от температуры: 1 — н-гептан; 2 — суспензионное горючее н-С₇H₁₆ + 2,5% (2Mg + MoO₃); 3 — суспензионное горючее н-С₇H₁₆ + 2,5% (Al + MoO₃). Результаты получены по записям свечения (а) и давления (б)

ранее, показали, что за это время происходит прогрев выпускаемого в реактор компонента до заданной температуры, а также образование топливно-воздушной смеси.

Время задержки самовоспламенения определяли как промежуток времени от момента окончания перепуска горючего в реактор до момента взрыва смеси. Для визуализации процесса самовоспламенения проводили скоростную видеосъемку. Для этого из реактора удаляли полусферическую вставку, а плоский фланец реактора заменяли на оптическое окно диаметром 120 мм и толщиной 20 мм. Окно было изготовлено из кварцевого стекла марки КУ-1. Съемку проводили цифровой скоростной камерой Casio с частотой 600 кадров/с.

На рис. 1 в аррениусовских координатах представлены измеренные задержки самовоспламенения суспензионных горючих в сравнении с задержками самовоспламенения н-гептана. Важнейшая особенность воспламенения суспензионных горючих, содержащих механоактивированные нанодисперсные порошки Mg-MoO₃ и Al-MoO₃, — наличие некоторого порогового значения температуры реактора, при котором изменяется характер воспламенения. При температурах ниже порогового значения задержки воспламенения

суспензионных горючих совпадают (в пределах ошибки измерения) с задержками воспламенения *n*-гептана. При температурах выше порогового значения задержки воспламенения резко уменьшаются до уровня десятков миллисекунд. Отметим, что более точное определение таких коротких задержек воспламенения в рамках используемой методики невозможно. Из осциллограмм давления, полученных при самовоспламенении смеси на стадии перепуска, следует, что резкое повышение давления, соответствующее взрыву смеси, начинается спустя очень короткое время (50–60 мс) после начала истечения в реактор воздушной струи, содержащей диспергированное суспензионное горючее.

На рис. 2 представлены результаты скоростной видеосъемки процесса самовоспламенения суспензионного горючего. При поступлении холодной струи воздуха в реактор отдельные порции горючего попадают на горячие стенки реактора и воспламеняются (см. кадры 001–022). Однако воспламенение этих порций не вызывает зажигания всей смеси в целом, поскольку к соответствующему моменту времени топливно-воздушная смесь еще не образовалась. Зажигание смеси происходит позже (см. кадр 023), а его дальнейшее распространение происходит очень быстро. По оценкам, скорость распространения пламени на рис. 2 составляет 30–50 м/с, что, по видимому, соответствует режиму индукционного (спонтанного) горения.

Наиболее низкое пороговое значение температуры стенок реактора (~ 567 К) характерно для суспензионных горючих с добавками механоактивированных частиц Mg–MoO₃. Для суспензионных горючих с добавками частиц Al–MoO₃ пороговое значение температуры заметно выше и составляет ~ 640 К для состава *n*-C₇H₁₆ + (Al–MoO₃) и ~ 650 К для состава *n*-C₇H₁₆ + (2Al–MoO₃).

Эксперименты показали, что суспензионные горючие с энергетическими добавками на основе активированного тефлона не имеют такого порогового значения: их задержки воспламенения практически совпадают с задержками воспламенения *n*-гептана в изучаемом диапазоне температур и давлений.

Таким образом, в работе проведены экспериментальные исследования самовоспламенения суспензионных горючих на основе жидкого *n*-гептана с добавками частиц энергоемких нанокompозитов.

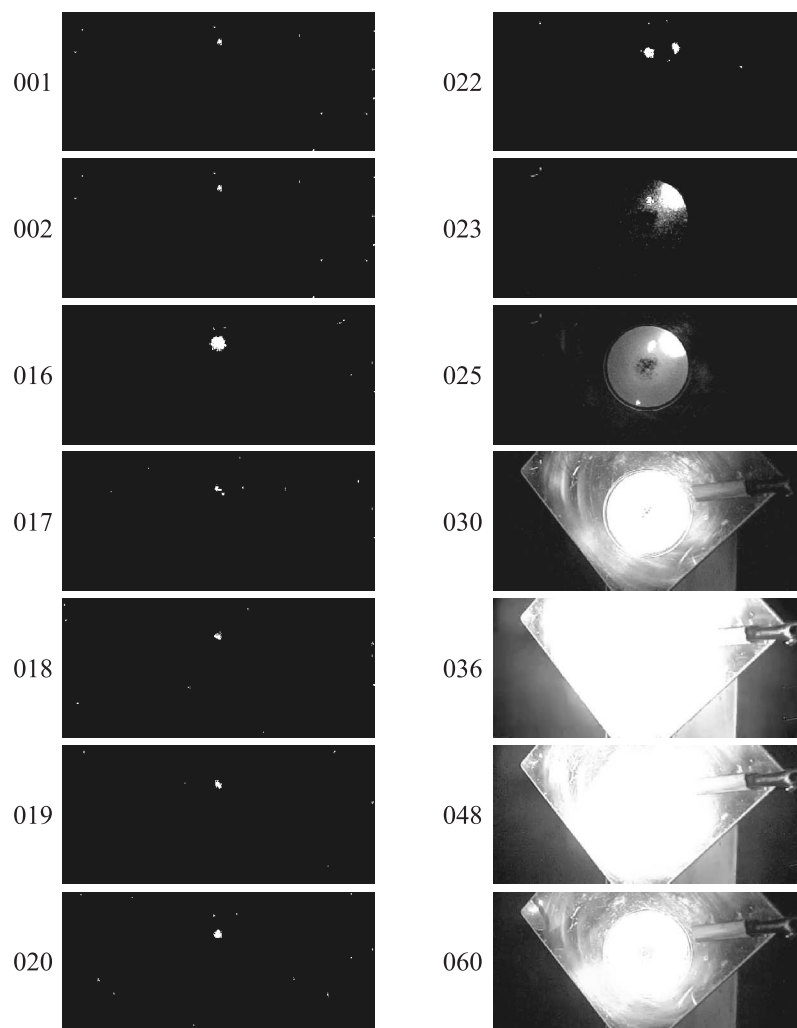


Рис. 2 Кадры скоростной видеосъемки, полученные при самовоспламенении суспензионного горючего $n\text{-C}_7\text{H}_{16} + 5\% (2\text{Mg} + \text{MoO}_3)$ на стадии перепуска в реактор. Температура реактора 616 К (353 °С)

Показано, что

- (1) начиная с некоторых пороговых значений температуры реактора, частицы механоактивированных нанокompозитов могут резко сокращать задержки самовоспламенения смесей суспензионных горючих с воздухом;
- (2) скорости горения воздушных смесей таких суспензионных горючих на 1,5–2 порядка превышают скорости нормального распространения пламени в воздушных смесях чистого углеводородного горючего;
- (3) кинетика самовоспламенения суспензионных топлив на основе н-гептана при температурах, превышающих пороговое значение, по-видимому, определяется кинетикой воспламенения металла в кислороде воздуха или в результате реакции с твердым окислителем внутри «сухой» частицы нанокompозита [3], временем смесеобразования и кинетикой окисления углеводородного горючего;
- (4) наиболее активным (с наименьшим зарегистрированным пороговым значением температуры) является суспензионное горючее с добавкой механоактивированного нанокompозита Mg–MoO₃;
- (5) для суспензионных горючих с добавками механоактивированного нанокompозита Al–MoO₃ пороговое значение температуры выше, чем для горючего с добавками частиц Mg–MoO₃;
- (6) для суспензионных горючих с добавками механоактивированного нанокompозита тефлон–MoO₃ порогового значения температуры не обнаружено. Для таких горючих задержки воспламенения оказались такими же, как для чистого н-гептана в рассмотренном диапазоне температур.

Работа выполнена в рамках Государственных контрактов № П502 и № П1085 по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и № 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»).

Литература

1. Долгобородов А. Ю., Махов М. Н., Колбанёв И. В., Стрелецкий А. Н. Состав пиротехнический механоактивированный. Патент от 27 августа 2004 года RU № 2235085.
2. Долгобородов А. Ю., Махов М. Н., Колбанёв И. В., Стрелецкий А. Н., Фортов В. Е. Детонация в смеси алюминий-фторопласт // Письма в ЖЭТФ, 2005. Т. 81. № 7. С. 395–398.
3. Фролов Ф. С., Фролов С. М. Механизм самовоспламенения капель суспензионных горючих // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. Вып. 3. С. 124–128.