

# ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ

П.Г. Сидорова, В.А. Сизов

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**Обоснование.** Известно, что регулирование зависимости скорости горения порохов от давления и температуры является важной задачей, так как чем ниже данные зависимости, тем устойчивее и стабильнее работает ракетный двигатель [1]. Для снижения зависимости скорости горения от давления используют соединения переходных металлов как в индивидуальном виде, так и в сочетании с сажей, которая способствует образованию углеродного каркаса на поверхности горения. Ранее в качестве катализаторов горения использовали соединения свинца [2]. В настоящее время штатными добавками наряду с соединениями свинца являются также органические соли никеля и меди [3], а в качестве углеродного материала можно использовать углеродные нанотрубки (УНТ) или графен, которые обладают более развитой поверхностью и большей теплопроводностью, чем сажа [3, 4]. УНТ возможно модифицировать с помощью оксидов металлов, так, например, в работах [5, 6] изучено действие модифицированных УНТ на разложение различных энергонасыщенных материалов, в отечественной литературе модифицированные углеродные материалы применяются в основном в качестве сорбентов и электродных материалов. Для баллистических порохов модифицирование УНТ может снизить общее содержание катализатора в составе пороха и привести к уменьшению отрицательного влияния на энергетические характеристики.

**Цель** — изучить влияние модифицированных углеродных нанотрубок на параметры горения баллистического пороха.

**Методы.** Исследования проводили на высококалорийном баллистическом порохе с соотношением НЦ : НГЦ = 1 : 1 ( $Q_{ж} = 5218$  кДж/кг). Для модификации использовали углеродные нанотрубки «Таунит-МД» (Т-МД) (производство — Тамбов) и сажу, для сравнения.

Скорость горения определяли на бронированных образцах диаметром 7 мм и высотой ~15 мм в приборе постоянного давления в атмосфере азота. Точность определения скорости горения  $\pm 2\%$ . Эффективность действия добавок оценивали величиной  $Z = U_{доб} / U_0$ , где  $U_{доб}$  и  $U_0$  — скорость горения пороха с добавками и без них соответственно.

**Результаты.** Влияние 1,5 % углеродных добавок на скорость горения пороха представлено на рисунке и в таблице.

Таблица. Влияние 1,5 % углеродных добавок

Добавки	Порох ( $v = 0,68$ )		
	$v$	$Z_2$	$Z_{10}$
Сажа	0,70	1,1	1,1
УНТ	0,58	1,7	1,4
УНТ/MnCu	0,64	1,0	1,0
УНТ/Mn	0,63	1,3	1,2
Графен/ $Fe_3O_4$	0,76	1,0	1,2

Наилучшим каталитическим эффектом среди модифицированных УНТ обладают нанотрубки, модифицированные оксидом марганца, — скорость горения увеличивается в 1,3 раза при 2 МПа, значение  $v$  в законе горения  $U = Vr^v$  снижается от 0,68 до 0,63. При этом они уступают не модифицированным УНТ — скорость горения возрастает в 1,7 раза при 2 МПа, а показатель  $v$  снижается от 0,68 до 0,58. Сажа и УНТ/MnCu в индивидуальном виде практически не оказывают влияния на параметры горения.

**Выводы.** Регулирование скорости горения возможно в том случае, когда на поверхности образуется углеродный каркас, в высококалорийном порохе, в котором отсутствуют дополнительные пластификаторы, возможность образования каркаса ограничена, поэтому ввод углеродных материалов для регулирования

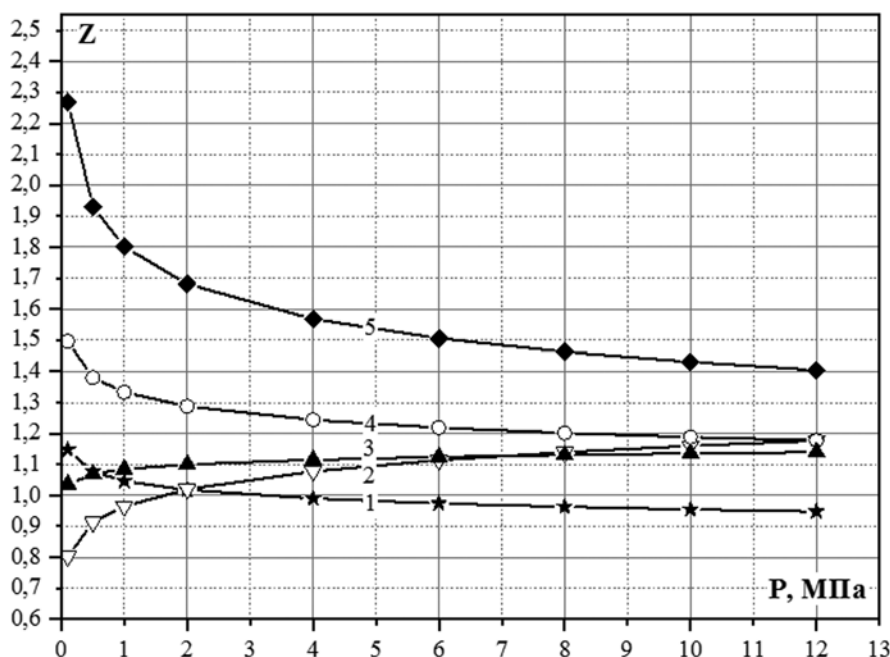


Рис. Зависимость эффективности действия углеродных добавок на скорость горения высококалорийного пороха от давления: 1 — УНТ/MnCu; 2 — Графен/Fe3O4; 3 — Сажа; 4 — УНТ/Mn; 5 — УНТ

скорости горения необходим. Углеродные нанотрубки в индивидуальном виде увеличивают скорость горения за счет своей высокой теплопроводности, значительно превосходящие теплопроводности газовой зоны и сажи. Модифицирование углеродных материалов не привело к увеличению их эффективности, вероятно, из-за неоптимального соотношения между УНТ и катализатором. Работы в данном направлении продолжаются.

**Ключевые слова:** катализ горения; модифицированные углеродные нанотрубки; углеродные наноматериалы; скорость горения; эффективность действия катализаторов.

### Список литературы

1. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. Москва: Оборонгиз, 1960. 595 с.
2. Андросов А.С., Денисюк А.П., Токарев Н.П. О механизме влияния комбинированных свинцово-медных катализаторов на горение порохов // Физика горения и взрыва. 1978. № 14. С. 63–66.
3. Киричко В.А., Сизов В.А., Денисюк А.П. Влияние углеродных нанотрубок на эффективность действия катализаторов горения низкокалорийного пороха // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. № 8. С. 16–20.
4. Денисюк А.П., Милехин Ю.М., Демидова Л.А., Сизов В.А. Влияние углеродных нанотрубок на закономерности катализа горения пороха // Доклады Академии наук. 2018. Т. 483, № 6. С. 632–634.
5. Ren H., Liu Y.-Y., Jiao Q.-J., et al. Preparation of nanocomposite PbO-CuO/CNTs via microemulsion process and its catalysis on thermal decomposition of RDX // J Phys Chem Solids. 2010. Vol. 71, No. 2. P. 149–152. DOI: 10.1016/j.jpcs.2009.10.006
6. Ling Q., Chen L.-Y., Wang A.-J., et al. Preparation and Characterization of Rice-Shaped MnO2/CNTs Composite and Superior Catalytic Activity on Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate // Fuller Nanotub Carbon Nanostruct. 2016. Vol. 25, No. 1. P. 8–23. DOI: 10.1080/1536383X.2016.1247349

Сведения об авторах:

**Полина Геннадьевна Сидорова** — лаборант кафедры химии технологии высокомолекулярных соединений. E-mail: sidorova.p.g@muctr.ru

**Владимир Александрович Сизов** — научный руководитель, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений. E-mail: sizov.v.a@muctr.ru