

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ НА ТЕПЛОТУ ВЗРЫВА И МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*М. Н. Махов*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), Москва, Россия

Энергетические добавки широко используются для повышения мощности взрывчатых материалов. Наиболее распространенной добавкой такого рода является порошкообразный алюминий (Al). К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных изучению параметров смесей взрывчатых веществ (ВВ) с Al. При проведении исследований таких систем в Институте химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) определялись, в частности, метательная способность (МС) и теплота взрыва (ТВ).

МС характеризует эффективность ВВ при совершении одного из важнейших видов действия. Существует множество способов определения МС. Методика исследования торцевого метания, известная как М-40 (аналоги – М-60 и М-20), в нашей стране принята в качестве базовой [1]. В методе М-40 рассматривается процесс ускорения стальной пластины толщиной 4 мм, метаемой с торца заряда высотой и диаметром 40 мм в канале толстостенной стальной оболочки. Мерой МС обычно служит скорость или кинетическая энергия пластины на расстоянии 40 мм от торца заряда.

ТВ также является важной характеристикой взрывчатого материала. ТВ отражает потенциальные возможности продуктов взрыва (ПВ) совершать работу при расширении. Измерения ТВ осуществляются методом детонационной калориметрии с использованием специальных установок с бомбами, во внутренней полости которых подрывается заряд исследуемого ВВ. Описание методики определения ТВ, используемой в ИХФ РАН, приведено в [2–4]. Особенности измерения ТВ композиций с энергетической добавкой рассмотрены в [4].

В работе [5] представлены результаты исследований МС (методика М-40) и ТВ алюминизированных смесей, содержащих ВВ с различным элементным составом. Основной объем данных получен для ВВ: циклотетраметилентетранитрамин (октоген) с кислородным балансом (КБ), равным  $-21,6\%$ , и бис(тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН, КБ =  $+16,5\%$ ). В композициях использовались порошки Al, отличающиеся размером частиц. Порошок наноалюминия (nAl) с размером частиц 0,1 мкм и активностью (содержанием несвязанного металла) 86% был получен конденсационным методом Гена-Миллера в Институте энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Российской академии наук (ИНЭПХФ РАН) [6]. Составы готовились длительным перемешиванием компонентов под слоем инертной жидкости. Результаты показали, что для рассматриваемых ВВ механические смеси с Al(0,1) (здесь и далее в скобках указан размер частиц в микронах) не обладают преимуществом по МС и ТВ перед композициями, содержащими Al с размером частиц порядка нескольких микрон. Анализ данных, полученных из других источников, в частности, из зарубежных публикаций, подтвердил эти выводы [7].

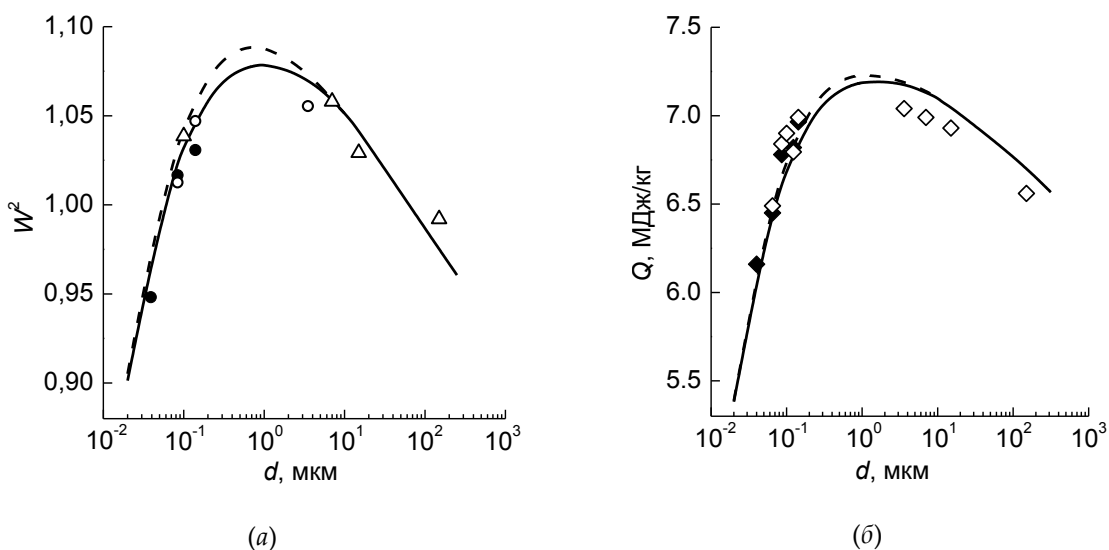
В отличие от механических смесей алюминизированные наноккомпозиты представляют собой системы с равномерным распределением частиц nAl в матрице ВВ. Результаты комплексного исследования параметров механических смесей и наноккомпозитов, содержащих октоген и Al в пропорции 85/15 по массе, представлены в [8]. Порошки nAl получены в ИНЭПХФ РАН и отличались размером частиц и типом покрытия, а также активностью. Средний размер частиц порошков nAl менялся в пределах 38–143 нм при изменении активности в диапазоне 60–86%. Исследовались также смеси, содержащие Al с размером частиц 3,6 мкм и активностью 96%. Наноккомпозиты были получены методом распылительной сушки суспензии nAl в растворе октогена. Данный метод разработан в ИНЭПХФ РАН [8]. МС измерялась с использованием методики М-20. Вопреки ожиданиям, оказалось, что для рассматриваемой системы

октоген/Al, 85/15, нанокompозиты с nAl не превосходят по МС и ТВ механические смеси, содержащие как nAl, так и Al(3,6).

Предлагаемая работа посвящена оценке перспектив повышения ТВ и МС ВВ с различным КБ за счет создания нанокompозитов. На первом этапе анализировались данные по исследованию составов на основе октогена. При этом рассматривались как новые, так и полученные ранее результаты. На нижеприведенных рисунках светлые символы отражают экспериментальные данные для механических смесей, темные – для нанокompозитов. Кривые получены расчетом.

На рисунке 1а представлены данные, характеризующие влияние размера частиц Al на относительную МС механических смесей и нанокompозитов: октоген/Al, 85/15. В качестве МС рассматривается кинетическая энергия пластины (квадрат скорости). Оценка МС осуществлялась способом, разработанным ранее для методики М-40 [9]. В качестве эталона выбран заряд октогена той же пористости, что и исследуемый образец. При расчете кривых толщина окисной пленки, покрывающей частицы Al, принималась равной 3 нм [10]. Экспериментальные значения МС получены с использованием родственных методик: М-40 и М-20 [5, 8].

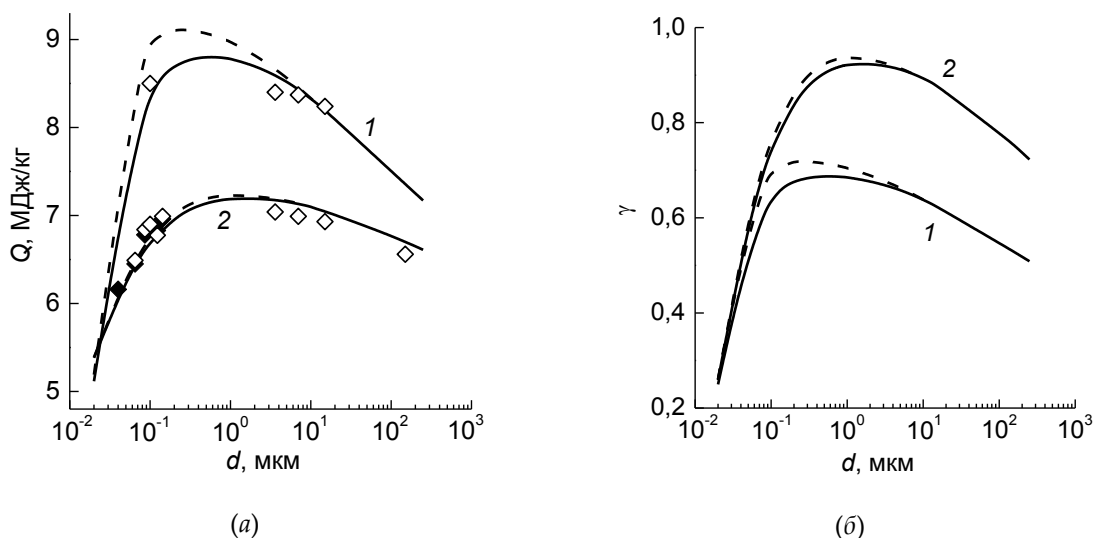
Как следует из рисунка 1а, МС композиций понижается с уменьшением размера частиц nAl. В противоположность этому, в области микроразмерного Al МС снижается с увеличением размера частиц Al. Кривые проходят через максимум. Из расчета следует, что МС нанокompозитов на основе октогена, содержащих 15% nAl, не должна заметно превышать МС механических смесей. Экспериментальные точки лежат вблизи кривых, что подтверждает выводы, сформулированные на основе расчетных результатов.



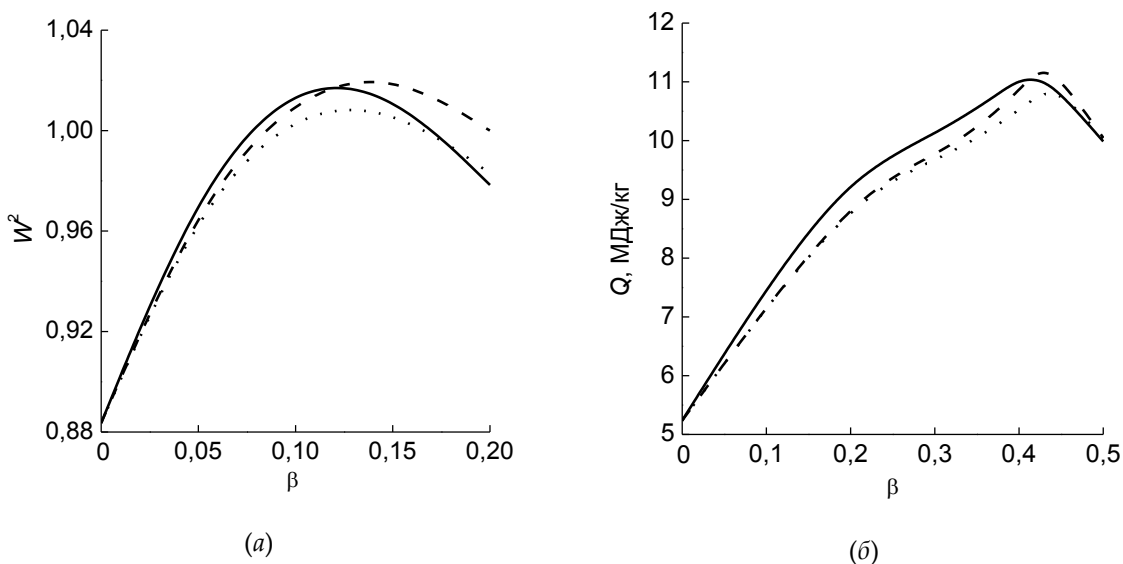
**Рисунок 1.** (а) – МС, (б) – ТВ для композиций на основе октогена в зависимости от размера частиц Al при содержании Al 15%. Сплошные линии – механические смеси, штриховые линии – нанокompозиты; кружки – М-20, треугольники – М-40, ромбы – ТВ

На рисунке 1б представлены расчетные кривые и экспериментальные данные по ТВ для той же системы октоген/Al, 85/15. Расчет ТВ выполнен с использованием разработанного ранее метода [11]. Экспериментальные результаты приведены в работах [5, 8]. Как и на рисунке 1а, экспериментальные точки лежат вблизи расчетных линий. Кривые на рис. 1а и 1б близки по форме. При этом области оптимальных по ТВ и МС размеров частиц Al совпадают. Однако даже вблизи максимальных значений ТВ кривые для механических смесей и нанокompозитов практически сливаются. Понижение МС и ТВ при снижении размера частиц nAl обусловлено резким повышением начальной доли окисной пленки и, соответственно, уменьшением содержания активного Al в добавке.

На рисунке 2а представлены расчетные зависимости и экспериментальные данные по ТВ для композиций на основе октогена, содержащих 15 и 40% добавки Al с различным размером частиц. Как следует из рисунка 2а, в рассматриваемом диапазоне размеров частиц Al значения ТВ выше при 40% добавки, чем при 15%. На рисунке 2б приведены расчетные кривые для степени окисления добавки, соответствующие зависимостям на рисунке 2а. Линии на рисунке 2б сливаются при низком размере частиц nAl, что соответствует практически полному окислению несвязанного металла добавки. В основном же диапазоне размеров частиц степень окисления добавки ниже при более высоком ее содержании. Наличие резерва в виде металла, не вступившего в реакцию, усиливает влияние структуры смеси на полноту окисления Al, и, как следует из рисунков 2а и 2б, при повышенном содержании Al в композиции с октогеном (в данном случае 40%) может быть получен выигрыш в ТВ за счет создания нанокompозита.

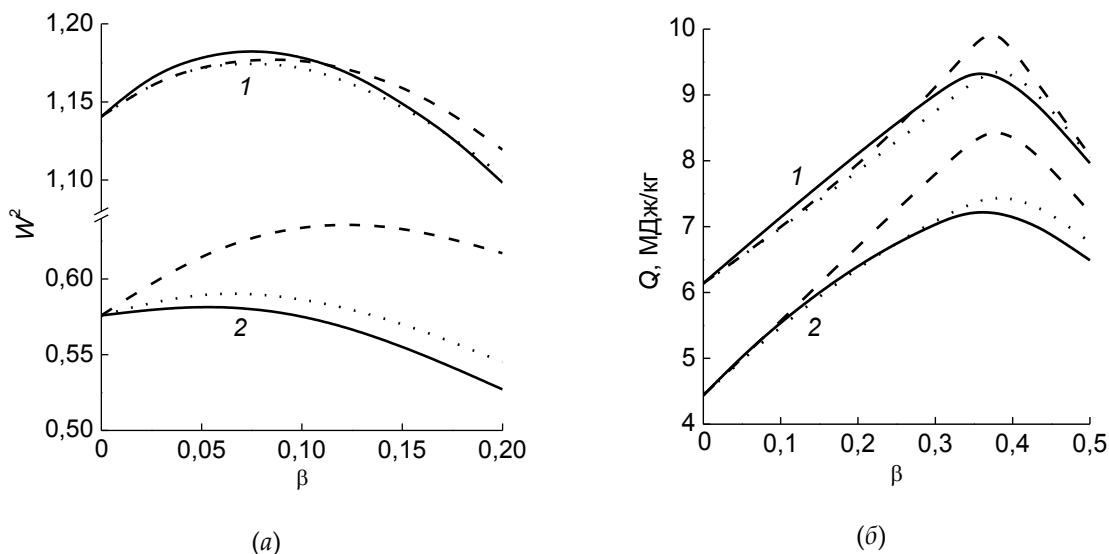


**Рисунок 2.** (а) – ТВ, (б) – степень окисления добавки Al для композиций на основе октогена в зависимости от размера частиц Al при содержании Al 40% (1) и 15% (2). Линии и символы обозначают то же, что и на рисунке 1



**Рисунок 3.** (а) – МС, (б) – ТВ в зависимости от содержания Al в композиции на основе БТНЭН. Сплошные и точечные линии – механические смеси с Al(7) и Al(0,1) соответственно, штриховые линии – нанокompозиты с Al(0,1)

На рисунках 3 и 4 приведены расчетные кривые, характеризующие МС и ТВ систем на основе трех ВВ с КБ, отличным от КБ октогена. Это: БТНЭН с положительным КБ (см. выше), СI-20 (гексанитрогексаазаизовюрцитан) с отрицательным, но небольшим по абсолютной величине КБ (–11%) и ТНТ (тринитротолуол) с резко отрицательным КБ (–74%). Наибольшая ТВ композиций соответствует БТНЭН, то есть ВВ с избытком кислорода в молекуле. Добавление Al к БТНЭН заметно увеличивает МС. Однако в связи с относительно невысокой МС самого БТНЭН смесь этого ВВ с Al по МС лишь незначительно превосходит октоген. Создание нанокompозита на основе БТНЭН не приведет к выигрышу ни в МС, ни в ТВ. Этот результат объясняется тем, что в случае БТНЭН независимо от того, механическая смесь или нанокompозит исследуются, Al испытывает глубокое окисление при измерениях как МС (М-40), так и ТВ. Наиболее высокой МС обладают СI-20 и смеси этого ВВ с Al. При этом создание нанокompозита не приведет к дополнительному увеличению МС, но обеспечит выигрыш в ТВ при повышенном содержании Al (см. рисунок 4).



**Рисунок 4.** (а) – МС, (б) – ТВ в зависимости от содержания Al в композициях на основе ВВ: 1 – СI-20, 2 – ТНТ. Линии обозначают то же, что и на рисунке 3

Наименьшие значения МС и ТВ соответствуют составам на основе ТНТ – ВВ с низким содержанием кислорода. При этом нанокompозиты на основе ТНТ должны превосходить механические смеси как по МС, так и по ТВ. Это преимущество должно быть более существенным, чем в случае других рассматриваемых ВВ. Результаты, полученные для ТНТ, можно объяснить усилением влияния структуры смеси на МС и ТВ при снижении степени окисления Al в связи с понижением КБ взрывчатой основы.

Таким образом, из полученных данных следует, что создание нанокompозита на основе смеси ВВ с Al может обеспечить дополнительный прирост МС (М-40) в случае, когда базовое ВВ имеет резко отрицательный КБ, при этом выигрыш в ТВ возможен лишь при высокой концентрации Al и отрицательном КБ основного ВВ.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания, тема АААА-А18-118031490034-6 «Создание высокоэнергетических материалов нового поколения и исследование их характеристик».

### Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П.Орленко, 3-е изд., М.: Физматлит, 2002, том 1, 832с.
2. В.И.Пепекин, М.Н.Махов, А.Я.Апин. Реакции бора при взрыве // Физика горения и взрыва, 1972, том 8, № 1, с. 135-138.

3. M.N.Makhov. Determining the Energy Content of Individual HE // Chem. Phys. Reports, 2001, vol. 19, № 6, p. 1155–1160.
4. М.Н.Махов Определение теплоты взрыва алюминизированных ВВ // Горение и взрыв. Под общ. ред. С.М. Фролова, М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011, вып. 4. с. 307-312.
5. М.Н.Махов, М.Ф.Гогуля, А.Ю.Долгобородов, М.А.Бражников, В.И.Архипов, В.И.Пепекин. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных ВВ // Физика горения и взрыва, 2004, том 40, № 4, с. 96-105.
6. А.Н.Жигач, И.О.Лейпунский, М.Л.Кусков, Н.И.Стоенко, В.Б.Сторожев. Установка для получения и исследования физико-химических свойств наночастиц металлов // Приборы и техника эксперимента, 2000, том 43, № 6, с. 122–129.
7. М.Ф.Гогуля, М.А.Бражников, М.Н.Махов, А.Ю.Долгобородов, А.В.Любимов, И.Л.Соколова. Влияние алюминия на метательную способность смесевых составов на основе штатных ВВ // Хим. физика, 2012, том 31, № 11, с. 33–47.
8. М.Ф.Гогуля, М.Н.Махов, М.А.Бражников, А.Ю.Долгобородов, В.И.Архипов, А.Н.Жигач, И.О.Лейпунский, М.Л.Кусков. Взрывчатые характеристики алюминизированных нанокompозитов на основе октогена // Физика горения и взрыва, 2008, том 44, № 2, с. 85-100.
9. M.N.Makhov, V.I.Arhipov. Method for Estimating the Acceleration Ability of Aluminized High Explosives // Rus. J. Phys. Chem. B, 2008, vol. 2, № 4, p. 602–608.
10. J.J.Davis, P.J.Miller. Effect of Metal Particle Size on Blast Performance of RDX-based Explosives // AIP Conference Proceedings, 2002, vol. 620, p. 950–953.
11. М.Н.Махов. Метод оценки теплоты взрыва алюминизированных ВВ // Экстремальные состояния вещества, детонация, ударные волны. Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения», Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, с. 53–58.

## INFLUENCE OF ALUMINUM PARTICLE SIZE ON HEAT OF EXPLOSION AND ACCELERATION ABILITY OF ALUMINIZED HIGH EXPLOSIVES

*M. N. Makhov*

Semenov Federal Research Centre for Chemical Physics RAS (FRC CP RAS)  
Moscow, Russia

Energetic additives are widely used to increase the power of explosive materials. The most commonly used additive of this kind is the aluminum powder. To date, many reports on the study of mixtures of high explosives (HEs) with aluminum (Al) have been published. The researchers at Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (ICP RAS), took an active part in investigations of such systems. In particular, the acceleration ability (AA) and the heat of explosion (HoE), were studied.

AA characterizes one of the most important types of HE action. There are many methods to measure AA. In Russia, the end acceleration method, which is known as M-40 (counterpart of M-60 and M-20), has been adopted as a base technique [1]. In this method, a 4-mm-thick steel plate is accelerated from the end of a charge with a height and diameter of 40 mm in the channel of a thick-walled steel shell. A typical measure of AA is the velocity or the kinetic energy of the plate at a distance of 40 mm from the end of a charge.

HoE can also be considered as an important parameter of HEs. HoE characterizes the potential ability of the products of explosion to do work during their expansion. The HoE measurements are commonly performed by the method of the detonation calorimetry with the use of special bombs, in cavities of which the charges of HEs are initiated. The description of the technique used in ICP RAS is