

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ТЕПЛОТА ВЗРЫВА И МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН

© 2020 г. М. Н. Махов*

Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: MNM17@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2018;
после доработки 20.05.2019;
принята в печать 05.06.2019

Результаты исследований, выполненных методом детонационной калориметрии, показали, что композиции, содержащие октоген, политетрафторэтилен (ПТФЭ) и дисперсный алюминий, обладают высокими значениями теплоты взрыва. Однако с повышением концентрации ПТФЭ теплота взрыва снижается из-за резко отрицательной теплоты образования этого вещества. Высокие температуры, сопровождающие процесс окисления алюминия, ускоряют разложение ПТФЭ. Результаты расчета показали возможность повышения метательной способности за счет введения ПТФЭ в состав, содержащий взрывчатое вещество с положительным кислородным балансом.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, алюминий, композиция, теплота взрыва, метательная способность.

DOI: 10.31857/S0207401X20010094

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время политетрафторэтилен (ПТФЭ) вызывает значительный интерес у исследователей и разработчиков энергетических материалов. Известно, что ПТФЭ может выполнять функцию как высокоплотного связующего, так и окислителя металла (Al, Mg) в составе твердых ракетных топлив [1]. Исследования показали также, что ПТФЭ способен выступать в роли активного компонента взрывчатых материалов. В работе [2] приведены результаты мониторинга процесса разлета медной оболочки при детонации композиций, содержащих октоген (Ок) – циклотетраметилентетранитрамин, ПТФЭ и Mg. Сравнение экспериментальных данных по скорости детонации и результатов расчета, выполненного с использованием термодинамического кода TIGER, позволило авторам работы [2] предположить, что ПТФЭ частично разлагается уже в зоне реакции детонационной волны. Несмотря на то, что рассмотренные композиции уступали Ок по скорости разлета оболочки, полученные результаты свидетельствовали о взаимодействии Mg с продуктами разложения как Ок, так и ПТФЭ в процессе расширения продуктов взрыва (ПВ).

Новая волна интереса к ПТФЭ вызвана публикацией данных о высокоскоростном воздействии ударников из ПТФЭ на алюминийсодержащие мишени. Так, в работе [3] утверждается, что высокая разрушающая способность фторопластового

ударника при взаимодействии с преградой, содержащей Al, обусловлена деструкцией ПТФЭ и экзотермической реакцией продуктов разложения с Al. Оценки показывают, что смесь ПТФЭ и Al должна обладать высоким энергосодержанием. Тепловой эффект реакции взаимодействия этих веществ в случае стехиометрической смеси в два раза превышает теплоту взрыва (ТВ) тринитротолуола [4, 5].

В настоящее время одним из перспективных методов повышения реакционной способности композиций типа горючее/окислитель является механоактивация. Механоактивированные энергетические композиты (МАЭК) представляют собой высокооднородные системы, реакционная способность которых значительно выше, чем у смесей, полученных обычным способом механического смешения. В работе [6] приведены результаты исследования свойств МАЭК, содержащих ПТФЭ и металлическое горючее – Al и Mg. При ударно-волновом инициировании в низкоплотных образцах таких МАЭК был получен стационарный детонационноподобный режим. В частности, для МАЭК ПТФЭ/Al (73/27) скорость распространения процесса составляла 1200 м/с.

В работе [7] приведен краткий обзор исследований, проводимых за рубежом, по созданию новых высокоплотных композитов для перспективных боеприпасов. В статье отмечается, что материалы на основе системы ПТФЭ/металл (в частности, ком-

позиция ПТФЭ/Al) внедряются в боевые части ракет, бронебойно-зажигательные пули и снаряды, используются в составе облицовкикумулятивных зарядов для повышения запреградного эффекта.

Основным параметром, характеризующим возможности взрывчатого вещества (ВВ) совершать работу, является теплота взрыва. Эту величину определяют с использованием специальных калориметрических установок с бомбами, внутри которых подрывается исследуемый заряд. Измерения энерговыделения при взрыве поликомпонентных систем позволяют не только получать данные по ТВ, но и проводить сравнение этих композиций по глубине протекания реакций между компонентами. Предлагаемая работа посвящена изучению ударно-индуцированных процессов в композициях Ок/ПТФЭ/Al методом детонационной калориметрии. Выбор Ок обусловлен тем, что в настоящее время это одно из наиболее распространенных мощных ВВ. Октоген имеет кислородный баланс (КБ), равный -21.6% . В статье также представлены результаты оценки метательной способности (МС) ряда модельных композиций ВВ/ПТФЭ/Al.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [8–12] приведены результаты измерений ТВ бинарных систем, содержащих бризантное ВВ и Al (включая алюминий с частицами наноразмера (n -Al)). В настоящей статье рассмотрены композиции, содержащие Al со средним размером частиц, составляющим 3.6 мкм, и активностью 96% (концентрацией несвязанного металла). Размеры основной массы частиц ПТФЭ составляли 20–100 мкм. Средний размер частиц Ок был равен 15 мкм. Смеси готовились длительным перемешиванием под слоем инертной жидкости.

Теплота взрыва измерялась с использованием калориметрической установки с внутренним объемом бомбы, равным 1.7 л. Образцы, состоящие из прессованных таблеток, с плотностью, составляющей 0.92–0.95 от теоретически максимальной плотности, диаметром 12 мм и массой 12–15 г помещались в оболочку из нержавеющей стали с толщиной стенки 6 мм. Для инициирования использовался электродетонатор ЭД-8 и промежуточная таблетка из Ок диаметром 12 мм и массой 1.2 г. Бомба с прикрепленным по центру полости зарядом продувалась аргоном, а затем заполнялась этим же газом до давления в 20 атм. Тепловой эффект, вносимый системой инициирования, учитывался при определении ТВ.

Использование промежуточной таблетки из Ок вызвано сложностью инициирования детонации в образцах композиций с высоким содержа-

нием ПТФЭ. Помещение заряда в массивную оболочку обеспечивало более полное взаимодействия компонентов смеси. Другая роль оболочки заключалась в снижении интенсивности вторичного нагрева продуктов ударными волнами, отраженными от стенок бомбы [4, 5, 10]. При наличии оболочки значительная доля энергии ПВ трансформируется в кинетическую энергию оболочки, что снижает температуру вторичного нагрева. Эффект заполнения калориметрической бомбы инертным газом подобен действию металлической оболочки за исключением того, что в этом случае часть энергии тратится на нагрев инертного газа. При испытаниях алюминизированных композиций для уменьшения температуры вторичного нагрева ниже “пороговой” необходимо использовать массивную оболочку совместно с заполнением бомбы инертным газом. Более подробное описание методики и особенностей проведения эксперимента для смесей с энергетической добавкой представлено в работе [10].

Очевидно, что при измерениях ТВ композиций с ПТФЭ степень участия последнего в химических реакциях, а значит, характер и параметры процессов, протекающих в образце, зависят от диаметра заряда, массивности оболочки и мощности инициатора. В связи с этим ТВ состава с ПТФЭ не следует рассматривать в качестве универсальной характеристики. Однако полученные значения могут быть использованы для сравнения композиций с ПТФЭ по энерговыделению в единых условиях испытаний.

Детальный анализ режимов, инициируемых в образцах, не проводился. Однако в зависимости от состояния оболочки после взрыва все наблюдаемые процессы можно условно разделить на две категории. Детонация (взрывчатое разложение) сопровождается разрушением оболочки. Отсутствие деформации основной части оболочки свидетельствует о том, что процесс либо перешел в режим горения, либо затух, и часть образца осталась неразложившейся. Следует подчеркнуть, что измеряемое значение ТВ отражает конечный результат химического превращения, включая реакции в расширяющихся продуктах. Это ослабляет влияние на ТВ особенностей процессов, протекающих в зоне реакции детонационной волны. На первом этапе были исследованы составы, не содержащие ПТФЭ.

1. Композиция октоген/Al

Очевидно, что расширяющиеся ПВ совершают основную часть механической работы при газообразном состоянии воды, образующейся при взрыве. Однако при охлаждении продуктов в калориметрической бомбе вода конденсируется. Поэтому обычно измеряемую величину ТВ пересчитывают на условие “вода — газ” (если вода

присутствует в ПВ). В данном случае с целью приведения значений ТВ к указанному условию рассчитывался состав продуктов, соответствующий непосредственно измеряемой величине теплового эффекта. На рис. 1 символами обозначены экспериментальные значения ТВ, приведенные к условию “вода – газ”. Расчетные кривые на рис. 1 построены при соблюдении того же условия. Здесь и на последующих рисунках темные символы соответствуют разрушению оболочки. Светлые символы отвечают случаю, когда оболочка разрушалась только вблизи инициирующего заряда.

Сплошная линия 1 на рис. 1 отражает потенциальный запас химической энергии системы Ок/Ал при условии, что вся добавка состоит из активного Ал (окисная пленка отсутствует). В отличие от кривой 1 штриховая линия учитывает реальную активность Ал(3.6); здесь и всюду далее в скобках указан размер частиц Ал в микронах. Зависимости получены с использованием метода расчета состава ПВ алюминизированных ВВ [11]. Оценки выполнены при условии, что реакция образования Al_2O_3 является доминирующей, а в области высоких концентраций Ал, когда кислорода не хватает на полное окисление металла, образуются нитрид и карбид алюминия. Штрих-пунктирная линия отделяет область нитридных и карбидных реакций от области образования Al_2O_3 . Разные участки кривой 1 на рис. 1 (и штриховой линии) соответствуют различному набору алюминийсодержащих продуктов: AB – Al_2O_3 ; BC – Al_2O_3 и AlN ; CD – Al_2O_3 , AlN и Al_4C_3 ; $D...$ – Al_2O_3 , AlN , Al_4C_3 и Al . Кривая 2 на рис. 1 построена с использованием разработанного ранее метода расчета ТВ алюминизированных композиций [12].

Как следует из рис. 1, введение Ал в состав с Ок значительно повышает ТВ. Однако экспериментальное значение ТВ ниже потенциального запаса энергии системы. Результаты измерений показали, что прирост ТВ составляет ~50% (при концентрации Ал 35–40%). При содержании Ал до 45% наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных. Однако при концентрации Ал 55% экспериментальное значение лежит выше расчетной кривой 2. Причина состоит в том, что метод расчета, предложенный в [12], не учитывает возможность образования нитрида и карбида алюминия, и при высоком содержании Ал расчетная кривая 2 и штрих-пунктирная линия, отделяющая область нитридных и карбидных реакций от области образования Al_2O_3 , сливаются. Полученный результат свидетельствует о взаимодействии Ал с азотом при концентрации Ал 55%. Не исключено, что в данном случае имеет место и реакция Ал с углеродом. Возможность образования нитрида алюминия подтверждают экспериментальные данные по составу ПВ, представлен-

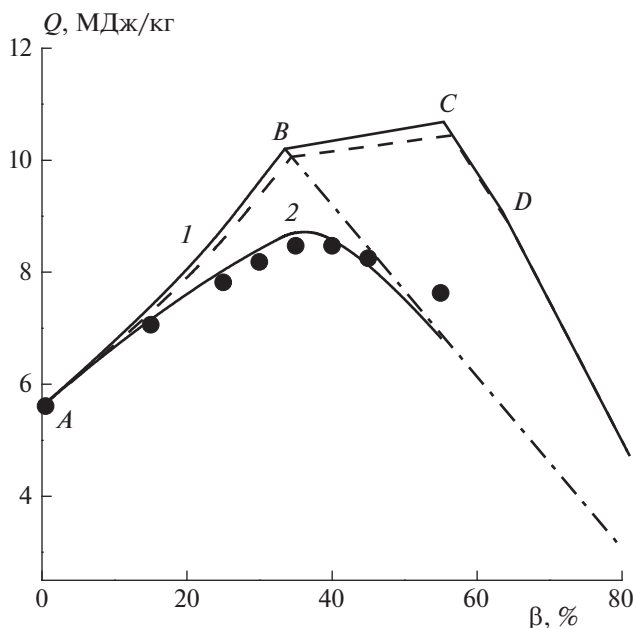


Рис. 1. Тепловой эффект в зависимости от концентрации Ал (β) в смеси Ок/Ал: 1 — потенциальный запас энергии, 2 — расчетная ТВ, символы — приведенные экспериментальные значения ТВ.

ные в работе [13]. Однако, в целом, нитридные и карбидные реакции не являются определяющими, так как протекают частично и только при высоком содержании Ал, а по тепловому эффекту они значительно уступают реакциям, приводящим к образованию Al_2O_3 .

При расчете кривой 2 на рис. 1 рассматривались следующие ПВ: Al_2O_3 , Al , CO_2 , CO , H_2O , H_2 , C , N_2 . Зависимость мольных концентраций продуктов от содержания Ал иллюстрирует рис. 2. Как следует из рис. 2, с повышением исходной концентрации Ал число молей CO_2 и H_2O уменьшается, что происходит в связи с образованием Al_2O_3 . Когда в ПВ остается небольшое количество CO_2 и H_2O , содержание CO также начинает снижаться. Концентрация Al_2O_3 сначала возрастает, а при содержании Ал свыше 40% — уменьшается. При высокой концентрации Ал в смеси почти весь кислород расходуется на окисление металла и лишь его незначительная часть остается в составе CO . При этом в связи с отсутствием воды в ПВ в качестве значений ТВ рассматривались непосредственно измеряемые ее величины. Характерно, что с увеличением содержания Ал заметно уменьшается общее количество молей газообразных ПВ: от 37.6 моль/кг для чистого Ок до 13.9 моль/кг для композиции с 50% Ал.

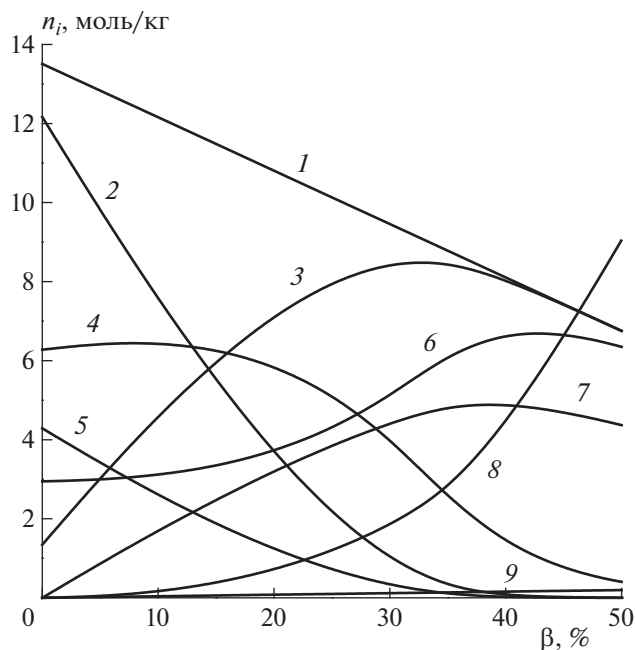


Рис. 2. Расчетный молярный состав ПВ в зависимости от концентрации Al (β) в смеси Ок/Al: 1 – N_2 , 2 – H_2O , 3 – H_2 , 4 – CO , 5 – CO_2 , 6 – C , 7 – Al_2O_3 , 8 – Al , 9 – начальная окисная пленка.

2. Композиция Ок/ПТФЭ/Al

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость теплового эффекта от содержания Al для композиции Ок/ПТФЭ/Al. Массовое соотношение Ок/ПТФЭ в смеси было постоянным – 20/80. Кривая 1, отражающая потенциальный запас энергии системы, построена с использованием метода оценки состава ПВ [11]. Кривая 2 рассчитана с помощью метода, разработанного для смесей Al с ВВ, содержащих в качестве окислителя кислород [12]. Выбор фторсодержащих продуктов для расчетов сопряжен с определенными трудностями, возникающими в связи с пробелами в изучении химических реакций при детонации с участием фтора. Автор работы [14], анализируя результаты калориметрических исследований, пришел к выводу, что при взрыве фторсодержащего индивидуального ВВ в конечных ПВ присутствует только фтористый водород (если для его образования имеется достаточное количество водорода). Термодинамические расчеты, выполненные авторами работы [15] с использованием Программы ВКВ-RR, показали, что при детонации ВВ элементного состава $CHNOF$ в точке Чепмена–Жуге образуется в основном CF_4 . При расширении продуктов концентрация этого вещества снижается, а содержание HF повышается. В соответствии с этими данными в предлагаемой работе рассматривались следующие фторсодержащие продукты: AlF_3 , HF

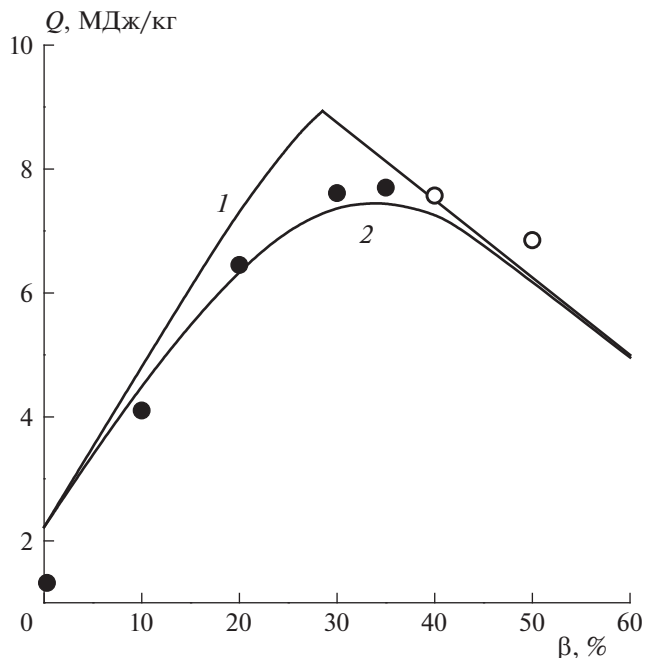


Рис. 3. Тепловой эффект в зависимости от концентрации Al (β) в смеси Ок/ПТФЭ/Al при массовом соотношении Ок/ПТФЭ, равном 20/80: 1 – потенциальный запас энергии, 2 – расчетная ТВ, символы – экспериментальные значения ТВ.

и CF_4 . Оценки выполнены без учета возможности взаимодействия Al с азотом и углеродом.

Следует отметить, что при измерении ТВ фторсодержащих ВВ вследствие образования HF и в случае присутствия в продуктах H_2O коррозионные реакции с участием фтористоводородной кислоты могут вносить погрешность в измеряемую величину. Для минимизации влияния этих реакций автор работы [14] использовал бомбу из коррозионностойкого медно-никелевого сплава “монель”. Как уже отмечалось, в наших опытах заряд помещался в оболочку из нержавеющей стали. При этом в полость бомбы вставлялся “стакан” из того же материала. Крышка бомбы также была выполнена из нержавеющей стали. При рассмотрении ПВ предполагалось приоритетное образование перечисленных выше фторсодержащих веществ. В соответствии с этим допущением ПВ исследуемых композиций с невысокой концентрацией Al не должны содержать воды, так как в этом случае фтора достаточно для связывания всего водорода (как и части углерода). При повышенной концентрации Al (30% и более) в ПВ должно присутствовать лишь одно фторсодержащее соединение – AlF_3 , а вода должна отсутствовать, так как основная часть кислорода связывается алюминием и лишь незначительная доля кислорода может находиться в составе CO . В связи с этим в качестве значений ТВ

Таблица 1. Значения теплового эффекта

Композиция	ρ , г/см ³	Q_e , МДж/кг	Q_c , МДж/кг	ΔQ_e , МДж/кг	ΔQ_c , МДж/кг
Ок	1.81	5.61	5.61	2.84	2.90
Ок/Al 60/40	2.00	8.45	8.51		
Ок/ПТФЭ 60/40	1.92	4.27	4.21	3.75	3.60
Ок/ПТФЭ/Al 36/24/40	2.09	8.02	7.81		

композиций Ок/ПТФЭ/Al рассматривались значения, непосредственно измеряемые в эксперименте.

Как следует из рис. 3, ТВ смеси возрастает с повышением концентрации Al. При отсутствии Al в составе экспериментальное значение ТВ лежит ниже кривой 2, что свидетельствует о неполном взаимодействии компонентов. Данный вывод подтверждается тем, что в твердых продуктах композиции Ок/ПТФЭ состава 20/80 обнаружен неразложившийся ПТФЭ. При содержании Al 10% и более в экспериментальные величины, соответствующие детонационному процессу (темные символы на рис. 3), удовлетворительно согласуются с расчетными данными. По-видимому, повышение температуры взрыва за счет высокого теплового эффекта окисления Al способствует ускорению разложения ПТФЭ.

В экспериментах с образцами композиций Ок/ПТФЭ/Al при соотношении концентраций компонентов 12/48/40 и 10/40/50 основная часть оболочки оставалась целой, что позволяет предположить, что процесс в этих образцах протекал в режиме горения. Экспериментальное значение для второй смеси на рис. 3 лежит выше линии, соответствующей полному расходованию кислорода и фтора на окисление Al. Это указывает на возможность образования в данном случае нитрида и карбида алюминия.

Повышение доли ПТФЭ в рассматриваемых композициях снижает ТВ. Это происходит в основном из-за резко отрицательной теплоты образования ПТФЭ. Однако выигрыш в ТВ за счет введения Al возрастает. Об этом свидетельствуют результаты, представленные в табл. 1, где ρ – плотность заряда, Q – значение ТВ, ΔQ – прирост ТВ за счет введения Al. Индексами “e” и “c” отмечены экспериментальные и расчетные величины соответственно. В данном случае приведение величины ТВ к условию “вода – газ” осуществлялось только для Ок, так как согласно расчету продукты взрыва рассматриваемых композиций не должны содержать воды. Как следует из табл. 1, введение ПТФЭ в состав с Ок, хотя и снижает ТВ, но заметно увеличивает прирост ТВ, связанный с добавлением Al. Аналогичная закономерность прослеживается и при рассмотрении расчетных значений ТВ, также представленных в табл. 1. Удовлетворительное согласие экспериментальных данных

(в случае детонации) с результатами расчета свидетельствует в пользу допущений, заложенных в основу оценки ТВ композиций Ок/ПТФЭ/Al.

3. Расчет метательной способности

Как отмечалось выше, величина ТВ отражает потенциальные возможности ВВ совершать работу. Одним из важнейших параметров, характеризующих конкретное действие ВВ, является МС. Для изучения МС используется ряд экспериментальных методик, в той или иной степени имитирующих условия применения ВВ на практике. Лабораторные методы в основном подразделяются на два типа: метание металлических пластин с торца заряда и расширение цилиндрических оболочек. Одной из наиболее распространенных методик, принадлежащих к первому типу, является метод М-40 (аналог метода М-60) [16]. В методе М-40 исследуется процесс ускорения стальной пластины толщиной 4 мм, метаемой с торца заряда толщиной и диаметром 40 мм в канале толсто-стенной стальной оболочки. Мерой МС обычно служит скорость пластины на расстоянии 40 мм от торца заряда. Методика Т-20 [16] относится ко второму типу методов. Ранее в работе [9] было показано, что закономерности, найденные при исследованиях ВВ по методу М-40 и Т-20, во многом совпадают. Поэтому в предлагаемой работе рассматривается МС, соответствующая условиям испытаний по методике М-40. Ниже представлены результаты оценки влияния ПТФЭ на МС ряда модельных композиций. Расчеты выполнены с использованием разработанного ранее метода [17]. В качестве эталона рассматривался Ок.

При изучении алюминийсодержащих ВВ особое внимание исследователей уделяется составам с *n*-Al, в частности наноструктурным композитам с равномерным распределением частиц *n*-Al в матрице ВВ. Метод расчета, предложенный в работе [17], позволяет проводить оценки МС таких систем. Результаты расчета относительной скорости пластины для смесей ВВ/ПТФЭ и ВВ/ПТФЭ/Al представлены на рис. 4. В качестве ВВ рассматривались CL-20 (гексанитрогексаазиновюртитан, КБ = –11%) [18] и БТНЭН (бис(тринитроэтил)нитрамин). В настоящее время CL-20 является одним из наиболее перспективных мощных ВВ. В отличие от CL-20 вещество БТНЭН имеет положительный КБ

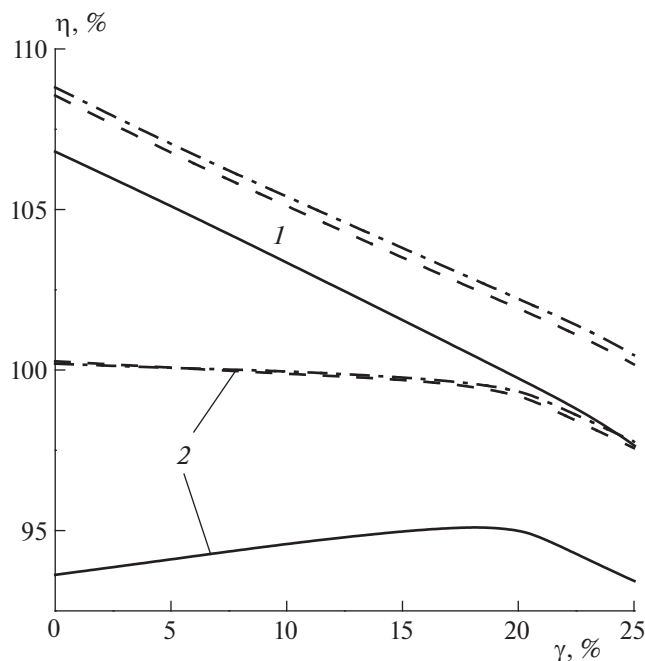


Рис. 4. Расчетная относительная МС (η) смесей ВВ/ПТФЭ (сплошные линии), ВВ/ПТФЭ/Al(7) (штриховые линии) и наноструктурных композитов ВВ/ПТФЭ/Al(0.1) (штрих-пунктирные линии) в зависимости от концентрации ПТФЭ (γ) в смеси ВВ/ПТФЭ; ВВ: 1 – CL-20, 2 – БТНЭН.

(+16.5%). При расчете рассматривался Al с размером частиц 7 мкм и активность 98%. Размер частиц n -Al был выбран равным 0.1 мкм при активности 86%, что соответствует параметрам n -Al, полученного конденсационным методом Гена–Миллера в ИНЭП ХФ РАН [19]. При расчете предполагалось, что за характерные времена метания пластины в методе М-40 (~20 мкс) ПТФЭ полностью разлагается и участвует в реакции. Содержание добавки Al было оптимизировано для каждой точки (оптимальная концентрация лежит в диапазоне 10–12%).

Из рис. 4 следует, что введение Al в состав CL-20/ПТФЭ повышает МС; в то же время увеличение содержания ПТФЭ в композициях CL-20/ПТФЭ и CL-20/ПТФЭ/Al снижает МС. При этом составы с Al(7) и нанокompозиты с Al(0.1) имеют близкие значения МС. Расчет показывает, что за характерные времена процесса несвязанный металл Al(0.1) практически полностью окисляется даже в случае механических смесей, содержащих CL-20. Металл Al(7) также испытывает глубокое окисление при взаимодействии с ПВ композиций на основе CL-20, но полного сгорания активного металла в этом случае не происходит. Однако доля окисной пленки в Al(7) существенно ниже, чем в Al(0.1). В результате различие составов с Al(7) и нанокompозитов с Al(0.1) по МС оказывается незначительным.

Согласно расчету добавление ПТФЭ в количестве ~20% к БТНЭН должно приводить к некото-

рому повышению МС (см. рис. 4). Этот результат обусловлен тем, что в продуктах взрыва БТНЭН присутствует свободный кислород, который способен окислять углерод, выделяющийся при разложении ПТФЭ. Добавление Al к составам на основе БТНЭН повышает МС, причем в большей степени, чем в случае композиций с CL-20. Однако из-за более низкой МС самого БТНЭН и смесей БТНЭН/ПТФЭ алюминийсодержащие композиции по МС проигрывают составам на основе CL-20. Несмотря на заметное повышение МС смеси БТНЭН/ПТФЭ за счет добавления Al, увеличение содержания ПТФЭ снижает МС алюминизированной системы. Штриховая и штрих-пунктирная кривые для композиций с БТНЭН практически совпадают. Из этого следует, что, как и в случае CL-20, создание алюминизированного нанокompозита БТНЭН/ПТФЭ/Al(0.1) не приведет к выигрышу в МС по отношению к составам, содержащим Al(7).

Известно, что одним из способов повышения эффективности композиций с n -Al является применение алюминия, частицы которого покрыты активным материалом. Авторы работы [20] в качестве активного покрытия, наряду с другими веществами, использовали диборид алюминия (AlB_2). Им удалось повысить массовую долю активного вещества в n -Al марки “Alex” до 96% (78% Al + 18% AlB_2). Из расчетных данных, представленных в [21], следует, что МС нанокompозита, содержащего CL-20 и Al(0.1) с частицами, по-

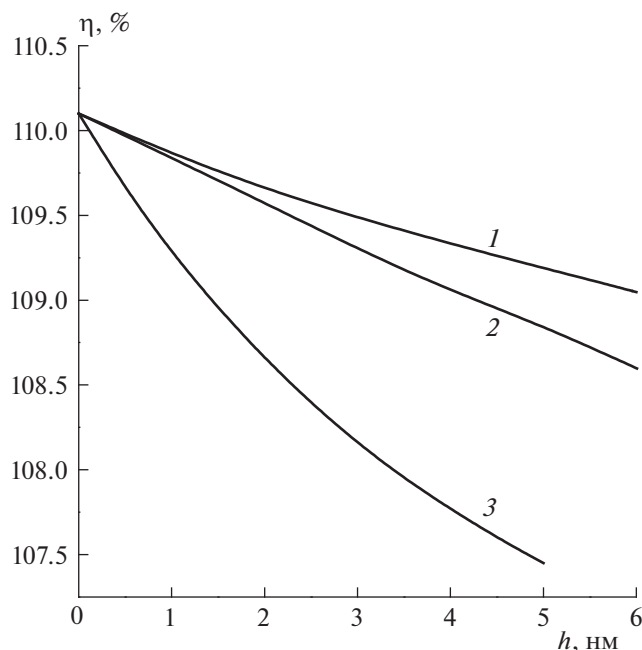


Рис. 5. Расчетная относительная МС (η) наноструктурных композитов на основе CL-20 в зависимости от толщины (h) покрытия частиц Al(0.1). Материал покрытия: 1 – AlB_2 , 2 – ПТФЭ, 3 – Al_2O_3 .

крытыми AlB_2 , при концентрации $n\text{-Al} \sim 12\%$ близка к рекордному уровню в 110%. Авторы работы [22] в качестве защитного слоя использовали ПТФЭ.

Влияние толщины покрытия частиц $n\text{-Al}$ на МС нанокompозитов CL-20/ $n\text{-Al}$ иллюстрирует рис. 5. Размер частиц $n\text{-Al}$ принимался равным 0.1 мкм. В качестве материала покрытия рассматривались следующие вещества: AlB_2 , ПТФЭ и Al_2O_3 . Расчеты выполнены для максимальной плотности заряда. Содержание добавки $n\text{-Al}$ для каждой точки оптимизировано. Значение МС при нулевой толщине слоя покрытия следует рассматривать как гипотетическое.

Как видно из рис. 5, МС нанокompозита на основе CL-20 слабо снижается с повышением толщины слоя из AlB_2 . Политетрафторэтилен в большей степени уменьшает МС, чем AlB_2 . Однако различие невелико. Наибольшее снижение МС соответствует возрастанию толщины слоя из инертного Al_2O_3 . Из этих данных следует, что уменьшение доли окисной пленки в $n\text{-Al}$ за счет использования активных покрытий может привести к повышению МС.

образования ПТФЭ. Высокая температура, сопровождающая процесс окисления Al, ускоряет разложения ПТФЭ. Разработанный ранее метод позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать ТВ смесей ВВ/ПТФЭ/Al. Согласно оценке при добавлении ПТФЭ к ВВ (например, в качестве связки) возможен выигрыш в МС (М-40) при условии, что ВВ имеет положительный КБ. В случае ВВ с положительным и близким к нулевому КБ создание нанокompозитов с Al(0.1) на основе смеси ВВ/ПТФЭ не приведет к дополнительному повышению МС по отношению к композициям, содержащим Al с размером частиц порядка нескольких микрон. Перспективы использования $n\text{-Al}$ в составах метательного действия во многом определяются возможностью замены балластной окисной пленки на частицах $n\text{-Al}$ покрытием из активного материала.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что композиции Ок/ПТФЭ/Al обладают высокими значениями ТВ. Однако увеличение содержания ПТФЭ в такой смеси снижает тепловой эффект прежде всего из-за резко отрицательной теплоты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паушкин Я.М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива / Под ред. Фокина А.И. М.: Наука, 1978.
2. Cudzilo S., Trzcinski W.A. // Хим. физика. 2003. Т. 22. № 1. С. 82.

3. Селиванов В.В., Стыров А.В. // Хим. физика. 1999. Т. 18. № 11. С. 72.
4. Махов М.Н., Пепекин В.И. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1989. С. 23.
5. Махов М.Н. // Хим. физика. 2000. Т. 19. № 6. С. 52.
6. Долгобородов А.Ю., Стрелецкий А.Н., Махов М.Н. и др. // Хим. физика. 2007. Т. 26. № 12. С. 40.
7. Имховик Н.А., Свидинский А.В., Смирнов А.С., Яшин В.Б. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 1. С. 93.
8. Махов М.Н. // Хим. физика. 2000. Т. 19. № 9. С. 83.
9. Махов М.Н., Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю. и др. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 4. С. 96.
10. Махов М.Н. // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2011. Вып. 4. С. 307.
11. Makhov M.N. // Proc. 33rd Intern. Annual Conf. of ICT. Pfinztal: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2002. P. 73.
12. Makhov M.N. // Proc. 36th Intern. Annual Conf. of ICT and 32nd Intern. Pyrotechnics Seminar. Pfinztal: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2005. P. 122.
13. Решетов А.А. // Матер. XI Симпоз. по горению и взрыву. Ч. II. Черногловка: ИПХФ РАН, 1996. С. 74.
14. Ornellas D.L. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1989. V. 14. № 3. P. 122.
15. Губин С.А., Одинцов В.В., Пепекин В.И., Шаргатов В.А. // Хим. физика. 1990. Т. 9. № 5. С. 673.
16. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва. В 2-х томах / Под ред. Орленко Л.П. Т. 1. М.: Физматлит, 2002.
17. Махов М.Н., Архипов В.И. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 36.
18. Sympson R.L., Urtiew P.A., Ornellas D.L. et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1997. V. 22. № 5. P. 249.
19. Жигач А.Н., Лейпунский И.О., Кусков М.Л. и др. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 4. С. 72.
20. Kwon Y.-S., Gromov A.A., Ilyin A.P. // Combust. and Flame. 2002. V. 131. № 3. P. 349.
21. Махов М.Н. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 3. С. 68.
22. Jones D.E.G., Tarcotte R., Fouchard R.C. et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2003. V. 28. № 3. P. 120.