

УДК 662.31, 539.3

С.А. Афанасьева, Ю.А. Бирюков, Н.Н. Белов, В.В. Буркин,
А.Н. Ищенко, Ю.И. Карташов, В.З. Касимов, В.В. Фоменко, Н.Т. Югов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МЕТАНИЯ УДАРНИКОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ
С НАНОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ¹**

Рассматриваются возможности управления воспламенением, горением без перехода в детонацию новых высокоэнергетических композитных топлив за счет ввода в их состав субмикронных и нанодисперсных алюминиевых наполнителей. Установлены основные закономерности процессов измельчения алюминиевых частиц до наноуровня. Проведены баллистические испытания и расчетные исследования высокоскоростного соударения при оптимальном сочетании начальной скорости и массы метаемого тела.

Ключевые слова: *высокоэнергетические топлива, нанодисперсные наполнители, экспериментальное, математическое моделирование, высокоскоростное метание, соударение.*

Основой нового витка научно-технического прогресса в ближайшее время будут нанотехнологии, внедрение которых создаст базу для качественного скачка в развитии практически всех сфер деятельности человека. Ситуация в современном материаловедении позволяет прогнозировать создание материалов с уникальными физическими и химическими свойствами при использовании наноструктурных элементов (частиц, зерен, кристаллов). Изучение возможностей повышения физико-механических свойств высокоэнергетических материалов в области высокоскоростного метания до уровня, который недостижим на основе применения традиционных подходов, но возможен путем применения нанотехнологий, является актуальной задачей и обусловлена тем, что возможности модернизации и создания перспективных высокоскоростных средств метания традиционными методами исчерпаны.

Результаты предварительных исследований показали, что возможности управления воспламенением, горением и переходом в детонацию газогенерирующих пористых топлив различного типа, в том числе и пластизольных, за счет ввода в их состав ультрадисперсных металлических частиц и воздействия на них горячей электрической плазмы создает научно обоснованную базу для разработки топлив нового класса со скоростями горения, меняющимися в широком диапазоне, и новых плазмотронов, позволяющих реализовывать оптимальные режимы управления процессами газообразования. При этом для обеспечения высоких энергетических характеристик, увеличения глубины регулирования скорости горения топлив и снижения уровня двухфазных потерь предполагается возможным замена порошков алюминия микронных размеров на нанопорошки со средним размером частиц 0,05–0,1 мкм.

¹ Работа выполнена при поддержке программы АВИЦП Минобрнауки № 2.1.1/12470 и гранта РФФИ № 10-01-00573а.

Ультрадисперсные алюминиевые частицы традиционно используются для регулирования калорийности и скорости горения твердых ракетных топлив. Обычное увеличение скорости горения нитроглицериновых порохов типа Н и НБ составляет 20–30 % по сравнению с неметаллизированным составом. Оптимальное содержание порошкообразного алюминия в смесевых топливах на основе перхлората аммония составляет 18–20 % по массе, что дает прирост удельного импульса в 6–8 % [1]. В последние годы порошкообразный алюминий стал применяться и в метательных зарядах для ствольных систем. Он может добавляться в качестве дополнительного горючего в виде порошка в гранулированные и трубчатые метательные заряды, включаться в состав перспективных топлив, например жидких, гелеобразных и монокристаллических [2]. В [3] отмечается, что введение металлических частиц в пористые топлива ускоряет переход их горения в детонацию. В нашем случае ставилась задача регулирования с помощью добавки алюминия скорости послынного горения в широких пределах без срыва горения в детонационный режим.

Создание условий для высокоскоростного метания неразрывно связано с исследованием высокоскоростного соударения твердых тел как конечного результата этих усилий. Исследование явлений, возникающих при высокоскоростном ударе, экспериментальными методами без глубокого теоретического анализа часто не дают необходимого результата, несмотря на большие материальные и технические затраты. В связи с этим резко возросла роль математического моделирования как средства изучения различных явлений и процессов в твердых телах при динамических нагрузках. Когда физический эксперимент и математическое моделирование применяются совместно, дополняя друг друга, можно получить максимально достоверные результаты. Для теоретического анализа результатов высокоскоростного соударения разработана методика на базе математической модели динамики деформирования и разрушения твердых тел [4].

1. Получение наноразмерных порошков алюминия для высокоэнергетических композитных топлив

Результаты исследований показали, что поставленную задачу невозможно решить с использованием традиционных порошков алюминия типа АСД-4, которые содержат широкий спектр различных по размеру частиц от 8 до 30 мкм. Минимальный средний размер частиц в порошках, выпускаемых отечественной промышленностью, составляет около 5 мкм (АСД-8). Для изменения скорости горения в несколько раз требуется использовать частицы с характерным размером менее 1 мкм. Значительное влияние на активность таких порошков оказывают способы получения продукта, поскольку во время протекания технологического процесса происходит образование побочных веществ и тем самым снижение содержания металла [5]. В настоящее время развиваются различные способы получения нанодисперсных порошков (электрический взрыв проводника, плазмохимические, газофазные и др.). При получении порошка алюминия данными способами частицы обладают повышенной активностью в зависимости от способов пассивации, что приводит к появлению примесей в виде окислов алюминия, нитридов или органических соединений. Содержание активного алюминия в получаемых нанодисперсных частицах не превышает 80–85 %.

Известно, что факторами, существенно улучшающими качество порошков, являются механическая активация и узкое фракционирование. Современные тен-

денции развития техники измельчения показывают, что для получения субмикронных порошков наиболее эффективны пневматические методы [6], использующие сжатый газ с давлением 0,4–1,0 МПа. Принципиально важно, что только пневматические методы обеспечивают измельчение сверхтвердых материалов с минимальным намолом. Этот принцип успешно реализован в пневматическом циркуляционном аппарате путем воздействия на насыпной слой материала недо-расширенных затопленных газовых струй [7].

В основе работы циркуляционных аппаратов с затопленными струями лежит управляемое циркуляционное движение потоков газ – твердые частицы в замкнутых объемах. Принципиальными отличиями этого метода от других известных пневматических методов измельчения являются непрерывный вывод из зоны измельчения готовых фракций и многократная рециркуляция неизмельченного материала. При этом обеспечивается возможность многократного силового взаимодействия частиц материала между собой, что, в конце концов, приводит к их разрушению.

Принцип работы аппарата (рис. 1) основан на замкнутой циркуляции сыпучих материалов внутри циркуляционной камеры через транспортную трубу. Газовая струя захватывает частицы из конической части циркуляционной камеры и через транспортную трубу выносит в зону сепарации. Тонкая фракция выделяется с помощью центробежного сепаратора и выносится из камеры в циклон.

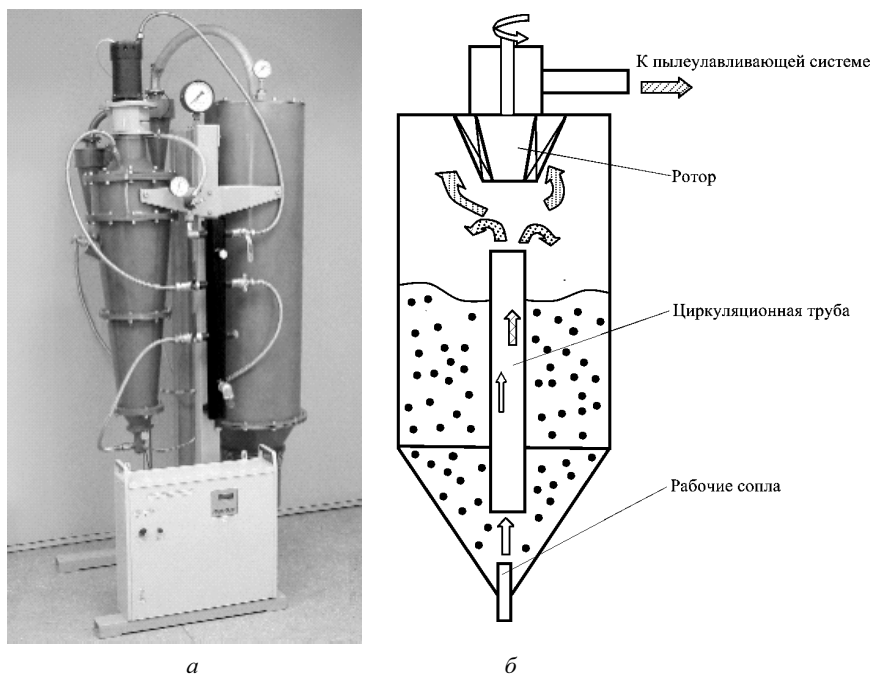


Рис. 1. Общий вид (а) и схема работы (б) пневмациркуляционного аппарата для измельчения порошков

Крупная фракция материала возвращается на свободную поверхность насыпного слоя, откуда частицы под действием силы тяжести снова опускаются в зону измельчения. На границе «струя – насыпной слой» за счет большого градиента

скоростей порядка 100–300 м/с происходит интенсивное ударно-волновое взаимодействие между частицами. В то же время частицы не соударяются со стенками аппарата, что практически исключает намол примесей.

Проведены исследования процессов получения алюминия АПЦ (алюминий пневмоциркуляционный) для высокоэнергетических топлив из марок алюминия АСД-4 и АСД-6 пневмоциркуляционным методом, включающим диспергирование частиц с одновременной воздушно-центробежной классификацией. Полученный материал характеризуется повышенным содержанием активного металла, низкой гигроскопичностью и адсорбцией влаги, узким гранулометрическим составом: отношение средних диаметров крупных и мелких частиц $d_{\max}/d_{\min}$ на разных полях наблюдения на микроскопе составляет 2–4, масса сферических частиц составляет 98–99 %. Содержание несферических частиц определялось методом счетной микроскопии по анализу фотоснимков полей с оптического микроскопа.

Определялись следующие параметры получаемого продукта:

1) насыпная плотность (ρ , г/см³) пикнометрическим методом [8];
 2) гигроскопичность (А, мас. %) и адсорбция (В, мас. %). Гигроскопичность оценивали потерей веса исходной навески в сушильном вакуумном шкафу при температуре 70–75 °С в течение 4 часов. Адсорбцию характеризовали приростом веса исходной навески, находящейся в специальной камере с постоянной влажностью 63 % в течение 15 суток. Влажность в камере соответствовала нормальной влажности рабочих помещений;

3) содержание активного металла (АI, мас. %) в полученном продукте находилось волнометрическим методом по выделившемуся объему водорода при действии на пробу 10 % раствора гидроксида калия [9];

4) температура начала интенсивного окисления (T , °С) методом дифференциально-термического анализа (ДТА);

5) Степень окисления порошка (a) находилась по термогравиметрической кривой (ТГ) методом ДТА. Степень окисляемости алюминия в оксид устанавливалась по формуле

$$\alpha = \frac{+\Delta m}{C_{Al} \times 0,89} \times 100,$$

где $+\Delta m$ – увеличение массы, определенное по кривой ТГ, %; C_{Al} – массовое содержание металлического алюминия в пробе, %;

6) содержание оксида алюминия в пробе путем растворения пробы 10 % соляной кислотой и взвешиванием полученного остатка твердых веществ (Al_2O_3 , мас. %).

Другие примеси (Z) оценивали как разность величин исходной пробы и суммы активного металла и оксида алюминия:

$$Z = \frac{Q - (Q_{Al} + Q_{Al_2O_3})}{Q} \times 100, \text{ мас. \%},$$

где Q – вес исходной пробы, г; Q_{Al} – вес активного металла в пробе, г; $Q_{Al_2O_3}$ – вес окиси алюминия в пробе, г.

Для сравнения такие же характеристики определяли и для порошков микронного и нанодиапазона размеров частиц: АСД-4, «Аlex» и др. В таблице приведены характеристики порошков: «Аlex», полученного электровзрывным методом проволочек; «Плазменный К» («Пл. К»), полученного плазменным методом с пассивацией в керосине; алюминия АСД-4; алюминиевой пудры ПАП-1; алюминия АПЦ.

Характеристики порошков

Марка и размер частиц, мкм	ρ , г/см ³	А, мас. %	В, мас. %	Al, мас. %	A ₂ O ₃ , мас. %	Z, мас. %	T, °C	α
«Alex», $\leq 0,1$	0,28	8,3	39,1	85,8	12,9	1,8	520	66,2
«Пл, К», $\leq 0,1$	0,15	17,4	42,1	83,2	14,5	2,3	520	69,2
АСД-4, ≤ 15	1,06	3,2	4,2	94,5	5,5	нет	830	26,4
ПАП-1, 1–50	0,29	5,5	6,8	91,5	8,5	нет	800	42,8
АПЦ, 0,2–0,5	0,34	3,3	5,1	94,7	5,3	нет	570	90,6

Методом дифференциально-термического анализа в интервале температур 20–1000 °C выявлены закономерности окисления порошков алюминия (α , %) при этом скорость нагрева составляла 5 °C в минуту в воздушной среде. Результаты опытов представлены на рис. 2.

Таким образом, АПЦ по содержанию активного металла практически не отличается от марок микронного алюминия, то есть содержит на 10–14 % больше активного металла по сравнению с нанодисперсными порошками алюминия. Адсорбция влаги и гигроскопичность АПЦ сохраняется на уровне микронных порошков алюминия, а температура начала интенсивного окисления близка к алюминию марки «Alex».

Увеличивается степень окисляемости в 1,3–1,4 раза по сравнению с «Alex», что актуально для эффективного использования в смесевых высокоэнергетических материалах. АПЦ в необходимых количествах могут быть получены из серийно выпускаемых порошков АСД. При этом выход достигает до 10 % от исходной массы. Себестоимость получения порошков АПЦ существенно ниже по сравнению с порошками с аналогичными характеристиками, полученными электро-взрывными, плазменными и другими методами.

Как видно из рис. 3, порошки АПЦ состоят практически только из близких по размеру частиц сферической формы и не содержат агломератов и частиц пластинчатого типа, что актуально для технологических процессов.

Таким образом, разработана лабораторная технология формирования ультрадисперсных и наноразмерных порошков алюминия, включающая в себя измельчение, сепарацию и смешивание тонкодисперсных порошков. Получены лабораторные партии нанопорошков алюминия, необходимых компонентов высокоэнергетических топлив.

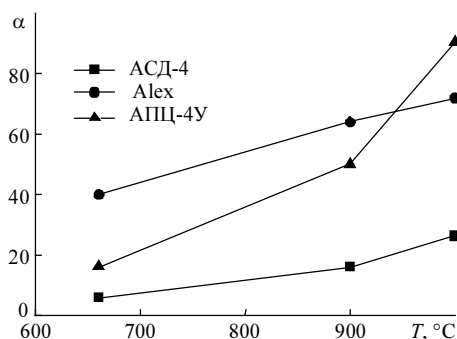


Рис. 2. Зависимости окисления порошков алюминия в воздушной среде от температуры

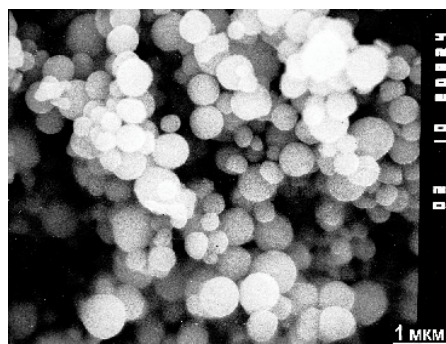


Рис. 3. Порошок алюминия АПЦ после обработки и фракционирования (микрофотография)

2. Регулирование характеристики конвективного горения композитных топлив добавлением наноразмерных частиц алюминия

Ниже исследуются возможности регулирования с помощью алюминиевых частиц скорости газоприхода в моноблочных пористых композитных топливах серии НТБС, горящих в конвективном режиме. Данное топливо является композитным и состоит из пластифицированной нитроцеллюлозы, в которую добавляется кристаллическое взрывчатое вещество. Оно изготавливается по литьевой технологии и в начальном состоянии обладает лишь замкнутой технологической пористостью на уровне 2–3 %. Структура топлива этого класса с включением алюминия и без него показана на рис. 4 (коэффициент увеличения 1500).

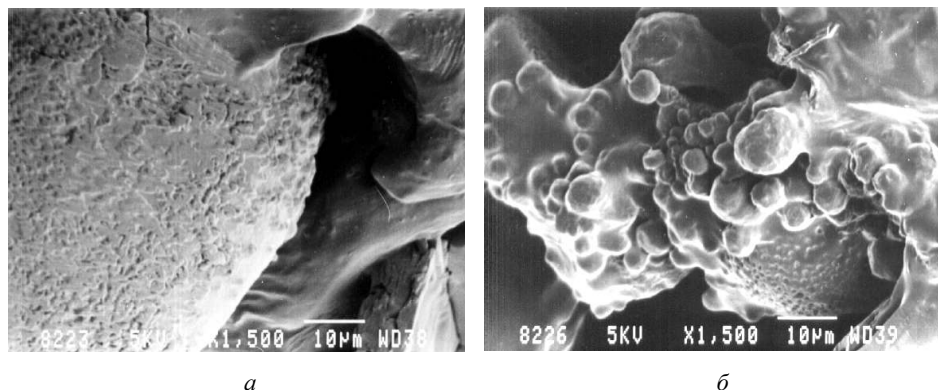


Рис. 4. Структура композитного топлива без алюминия (а) и с алюминием (б) $d = 3$ мкм

На рис. 5 приведена кривая изменения давления P при сжигании топлива в манометрической бомбе. Расчет проведен в рамках модели, описанной в [10].

В начале процесса топливо горит в послыном кондуктивном режиме (участок AB на рис. 5). Развитая структура горения образуется в поверхностном слое топлива в момент времени 250 мс (точка B) за счет неравномерного выгорания компонент и прорастания поверхностных пор в глубь матрицы под действием избыточного внутрипорохового давления. После начала конвективного режима выгорания (участок BC) горение подобных топлив сопровождается обильным диспергированием к-фазы на отдельные частицы и их догоранием в широкой зоне над поверхностью образца.

Эксперименты по сжиганию твердых пористых моноблочных композитных топлив в условиях замкнутого объема показали, что включение в их состав субмикронного порошка Al дает возможность увеличить скорость горения за счет изменения структуры пор и характера

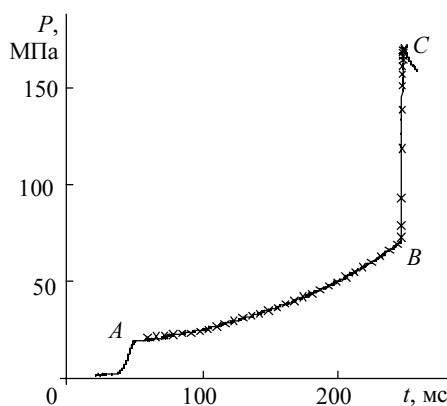


Рис. 5. Зависимость давления в замкнутом объеме от времени: — эксперимент; $\times$ — расчет

адгезионных связей [2]. Обобщение результатов позволило получить итоговые зависимости эффективной торцевой скорости горения U_{100} (при давлении газа 100 МПа) композитного топлива и давления срыва в конвективный режим P_c от диаметра частиц алюминия, показанные на рис. 6. Увеличение скорости горения может достигать пяти раз при одновременном четырехкратном уменьшении давления срыва. Это позволяет разрабатывать слоенные комбинированные моноблочные заряды для баллистических установок с необычайно высоким регулированием скорости газообразования по их длине.

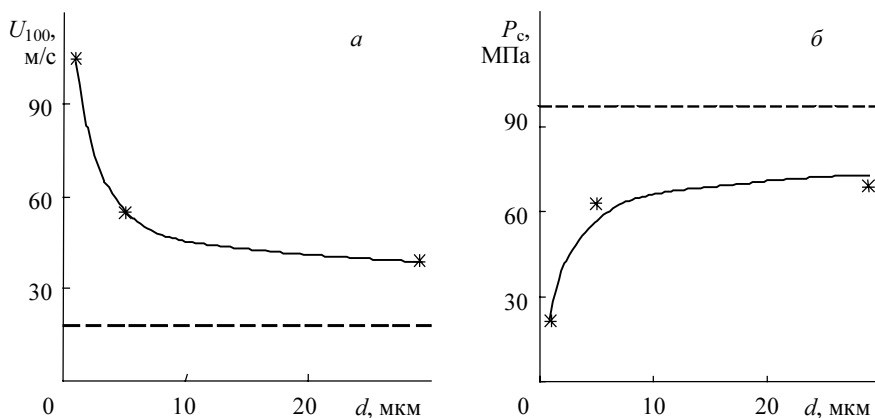


Рис. 6. Зависимости скорости горения (а) и давления срыва в конвективный режим (б) композитного топлива от диаметра частиц алюминия: — — для топлива без алюминия; * — эксперимент

Полученные расчетные значения скорости воспламенения топлива оказались близки к значениям эффективной скорости торцевого горения. Анализ размеров канальной зоны горения показывает, что в обычном топливе НТБС-51 она занимает 0,2–0,3 мм. Это составляет 1–2 характерных размера кристалла ВВ, входящего в состав топлива, и выгорающего с повышенной скоростью. Ширина зоны догорания не превышает 2–2,5 мм. В топливе с субмикронными частицами канальная зона горения расширяется до 1,5–2 мм, а зона догорания – до 1,5 см.

В высокоэнергетических топливах другого типа, находящихся в пластизольном агрегатном состоянии, в роли катализаторов был опробован ультра- и нанодисперсный алюминий с размерами частиц от 10 мкм (АСД-4), а также полученный пневмациркуляционным (А06ПЦМ) и электровзрывным методами (марки А100 и А50). В зависимости от дисперсности применяемого А1 получено повышение скорости горения в 1,5–10 раз с достижением уровня скорости горения примерно 0,3–0,5 м/с при давлении 100 МПа и качественное изменение законов горения $U = aP^v$ от $v < 1$ до $v > 1$ (1,5–2,5), что иллюстрируется опытными данными зависимости скорости горения ряда вариантов составов, приведенными на рис. 7. Увеличение скорости горения коррелирует со степенью дисперсности применяемых порошков А1: чем меньше средний диаметр частиц, тем выше скорость горения составов.

Поскольку при высоких давлениях (300–500 МПа) можно прогнозировать достижение скоростей торцевого горения подобных составов на уровне метров и десятков метров в секунду, они могут быть использованы в качестве основных и до-

полнительных метательных зарядов торцевого горения в ствольно-реактивной схеме высокоскоростного метания. Обобщение результатов баллистических испытаний и расчетов показали, что добавка алюминия наиболее эффективна в пределах 10–12 % мас. % для порохов типа ПАП-3 на неактивном связующем и увеличивается до 15–20 мас. % с увеличением активности используемого связующего и суммарного окислительного потенциала пороха (пороха типа ПАП-2 и ПАП-3). Помимо увеличения скорости горения порохов, использование в их рецептурах металлического горючего позволяет уменьшить молекулярную массу газофазных продуктов сгорания (ПС), увеличить удельную силу, улучшить газодинамические качества ПС как рабочего тела,двигающего снаряд. Одновременно с этим появляются конденсированные продукты сгорания, величина которых зависит от количества используемого алюминия в данном типе пороха. На разгон и движение продуктов сгорания по стволу тратится часть энергии заряда, т.е. возникают двухфазные потери, которые могут быть достаточно велики. Увеличение содержания алюминия сверх 20 мас. % приводит к существенному увеличению двухфазных потерь.

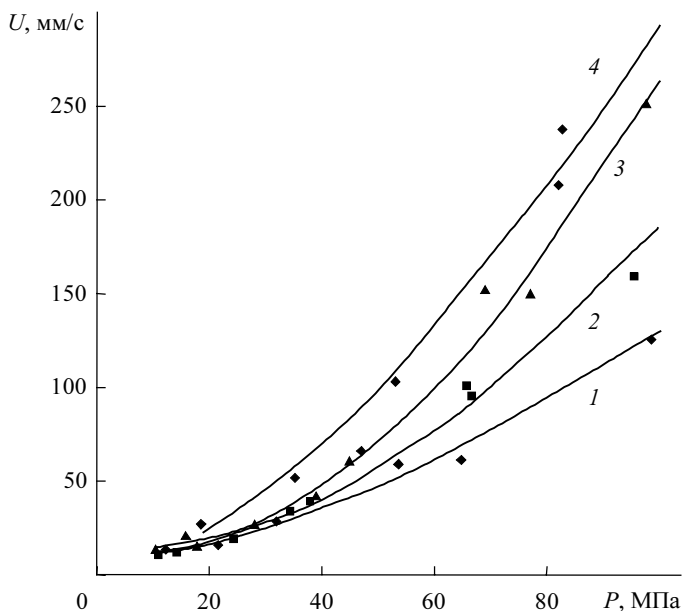


Рис. 7. Зависимости скорости горения от давления в замкнутом объеме для модельных вариантов составов с алюминием различной дисперсности: 1 – базовый состав с 10 % АСД-4 ($d_{cp} \sim 10 \mu\text{м}$); 2 – состав с 10 % А1 марки А06ПЦМ ($d_{cp} \sim 0,8\text{--}1,2 \mu\text{м}$); 3 – состав с 10 % А1 марки А100 ($d_{cp} \sim 140 \text{ нм}$); 4 – состав с 10 % А1 марки А50 ($d_{cp} \sim 70 \text{ нм}$)

Таким образом, проведены исследования по определению влияния субмикронных и нанодисперсных наполнителей на физико-химические параметры новых топлив. Выявлены их оптимальные характеристики, которые позволяют использовать топлива в различных схемах высокоскоростного метания.

3. Исследование проникающей способности составных ударников с сердечниками из стали и вольфрама

Проведены баллистические испытания ударников проникающего типа с сердечниками из стали и вольфрама. Ударники ускорялись в баллистической ствольно-реактивной установке с присоединенным зарядом калибром 30 мм. В комбинированных зарядах для их присоединенной части использовались пластизольные топлива с алюминиевыми частицами размером от 10 мкм. Получено оптимальное сочетание начальной скорости и массы метаемого тела для данных условий заряжения.

Ниже представлены результаты баллистических испытаний и математического моделирования взаимодействия составных ударников массой 50 г с сердечниками из стали массой 29,8 г и ВНЖ массой 32,2 г (рис. 8) со стальной бронеплитой толщиной 45 мм при скорости удара 3030 м/с и при скорости удара 3125 м/с.

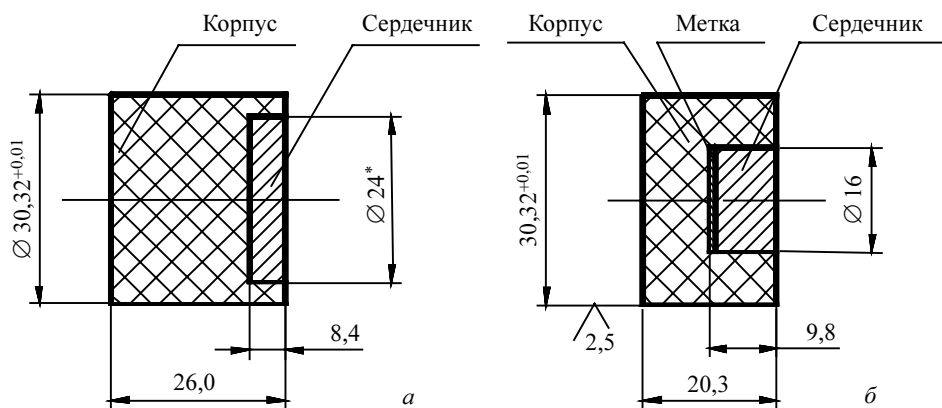


Рис. 8. Чертеж ударника в сборке с сердечником из стали (а) и ВНЖ (б)

Корпус ударников выполнен из текстолита. В конструкции ударника с сердечником из ВНЖ использовалась «метка» – стальная пластинка толщиной 0.2 мм, усиливающая сигнал для определения скорости ударника. Расчет проведен с помощью программного комплекса [11].

При соударении ударника с сердечником из стали с бронепреградой толщиной 45 мм при скорости 3030 м/с (рис. 9, 10) образуется кратер глубиной 34 мм (расчет 34,5 мм, отклонение от эксперимента 2,5 %) диаметром 59 мм (расчет 60 мм, отклонение 1 %) и с тыльной стороны откольная выпучина высотой 14 мм (расчет 15 мм, отклонение 7 %) и диаметром 62 мм (расчет 72 мм, отклонение 10 %).

Судя по хронограмме процесса, при 30 мкс в бронеплите начинает формироваться магистральная трещина, которая в последующие моменты времени расширяется, с тыльной стороны образуется выпучина. Ударник в процессе проникания срабатывается. К 103 мкс на дне кратера остаются фрагменты сердечника, текстолитовый стакан полностью разрушен. Расчет в это время закончен, так как скорость фрагмента ударника равна нулю.

На рис. 11 представлена картина пробития бронеплиты ударником с сердечником из стали при максимальной для данных условий выстрела скорости удара 3125 м/с. Увеличение скорости приводит к пробитию бронепреграды.



Рис. 9. Вид лицевой (а) и боковой (б) поверхностей бронеплиты после соударения с ударником с сердечником из стали

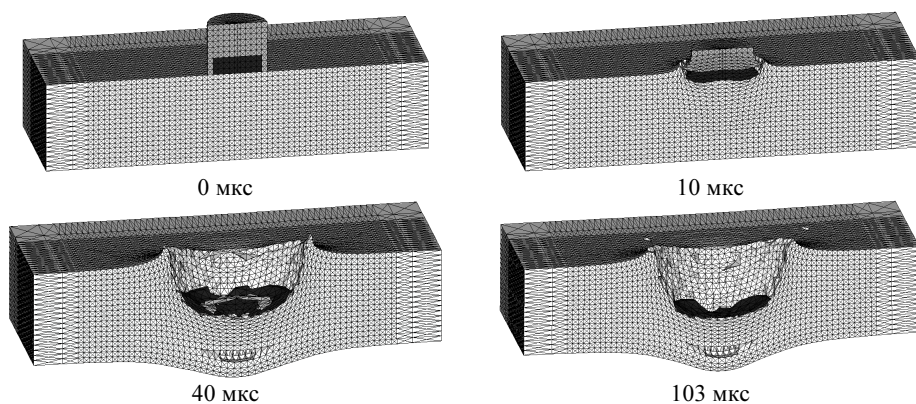


Рис. 10. Хронограмма пробития бронеплиты ударником с сердечником из стали

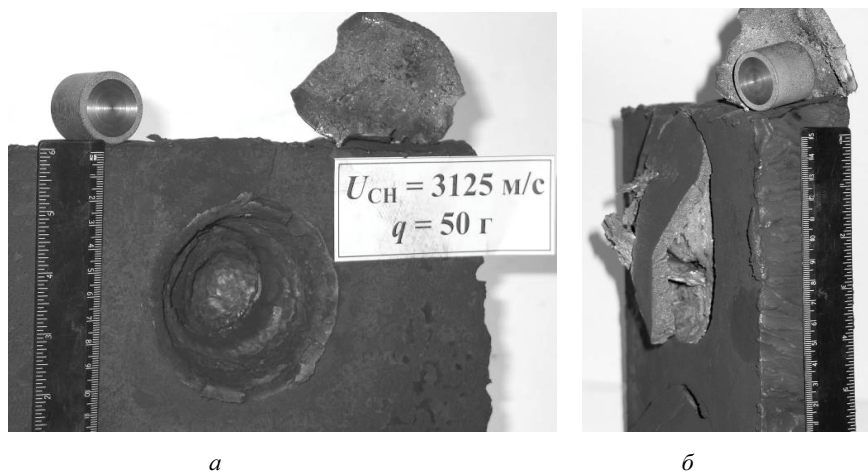


Рис. 11. Вид лицевой (а), тыльной (б) поверхностей бронеплиты и фрагмента откольной тарелки после соударения

При соударении ударника с сердечником из ВНЖ с бронепреградой толщиной 50 мм при скорости 3030 м/с (рис. 12, 13) в бронепреграде образуется сквозное отверстие.

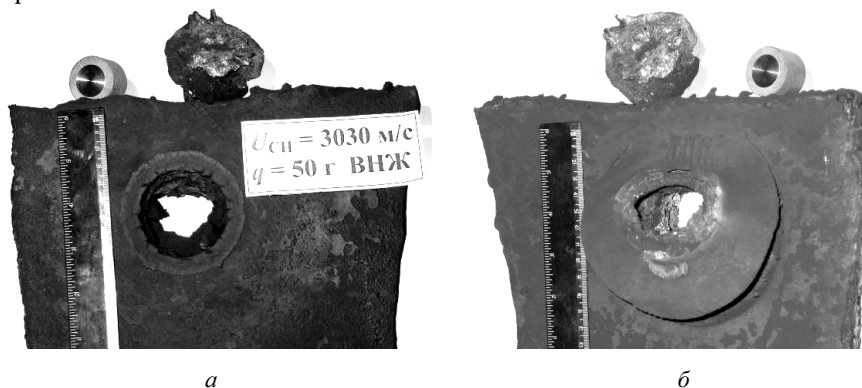


Рис. 12. Вид лицевой (а) и тыльной (б) поверхностей бронеплиты с фрагментом откольной тарелки после соударения с ударником с сердечником из ВНЖ

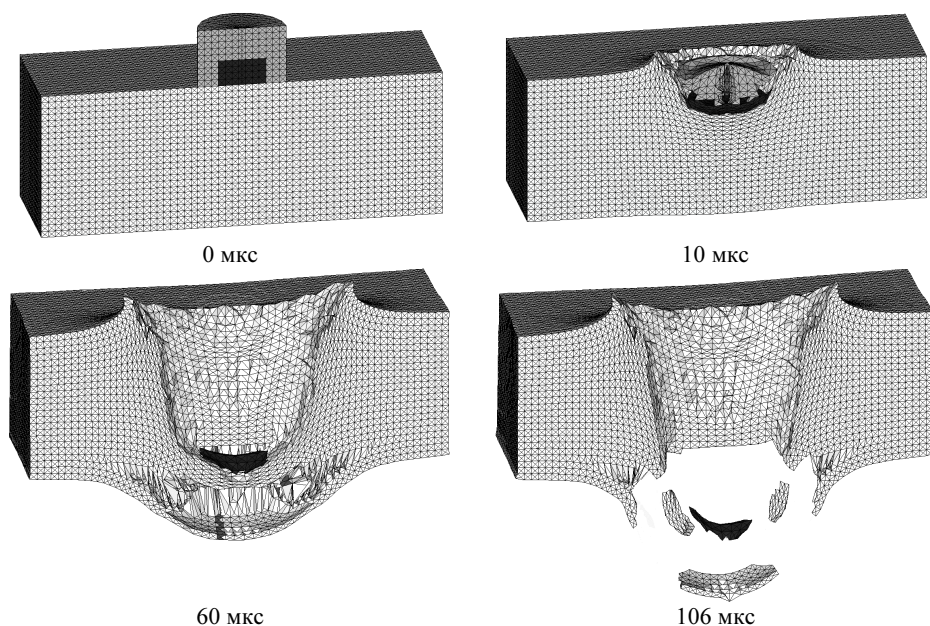


Рис. 13. Хронограмма пробития бронеплиты ударником с сердечником из ВНЖ

С тыльной стороны наблюдаются откольная выпучина, пробитая ударником, и фрагменты отколовшейся части откольной тарелки, спрессованной с остатком ударника. Сопоставление результатов расчета с экспериментом: диаметр входного отверстия на лицевой поверхности бронеплиты 72 мм (расчет 75 мм, отклонение 4 %), диаметр выходного отверстия на тыльной поверхности бронеплиты 35 мм (расчет 33 мм, отклонение 6 %), диаметр откольной выпучины 117 мм (расчет 105 мм, отклонение 10 %). Судя по хронограмме, ударник в процессе проникания

срабатывается, к 30 мкс текстолитовый стакан полностью разрушен. Фрагмент сердечника к 100 мс пробивает преграду. Его скорость при 106 мкс составляет 480 м/с. Позже он достигнет отколовшуюся часть преграды.

Как показали результаты экспериментального и математического моделирования, соударения повышение скорости соударения, как и применение более прочных составов сердечников (ВНЖ по сравнению со сталью), приводит к существенному увеличению пробивной способности ударников.

Выводы

В данной работе реализован комплексный подход к исследованию механики быстротекущих процессов на основе взаимосвязанных фундаментальных знаний газовой динамики многофазных сред, химической физики, теплофизики и механики деформированного твердого тела, направленный на изучение возможностей повышения физико-механических свойств высокоэнергетических топлив в условиях высокоскоростного метания.

В результате комплексной оптимизации режимов ускорения твердых тел с использованием ствольно-реактивной схемы метания и новых композитных топлив с ультрадисперсными наполнителями получена возможность ускорять ударники массой 40–50 г до скоростей порядка 3000 м/с на баллистической установке с присоединенным зарядом калибром 30 мм.

Расчетный анализ, апробированный на сопоставлении с экспериментальными данными, позволяет достоверно использовать вычислительный эксперимент на более широкий диапазон скоростей соударения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
2. Барышев М.С., Бирюков Ю.А., Ищенко А.Н. и др. Конвективное горение композитных моноблочных топлив с ультрадисперсным алюминием // Материалы Междунар. конф. Байкальские чтения II. Моделирование процессов в синергетических системах. Улан-Удэ. Томск: Изд-во ТГУ, 2002. С. 117.
3. Ильин А.П., Громов А.А., Яблуновский Г.В. Об активности порошков алюминия // РГВ. 2001. Т. 37. № 4. С. 58.
4. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г. и др. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: STT, 2005.
5. Шаталин А.С., Ромашёв А.Г. Новые конструкционные материалы на основе керамики и композитов с керамической матрицей // Перспективные материалы. 2001. № 4. С. 4.
6. Silverberg P.M., Sharon S.M. Homing in On best size reduction method // Chemical Engineering. 1998. November. V. 105. P. 123.
7. Бирюков Ю.А., Бузник В.М., Дунаевский Г.Е. и др. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение. Томск: Изд-во НТЛ, 2009.
8. Вейганд К. Методы эксперимента в органической химии. М.: 1950.
9. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Т.2. Количественный анализ. М.: Химия, 1976.
10. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
11. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611042. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 3 февраля 2010 г.

Статья поступила 01.07.2011 г.

Afanas'eva S. A., Biryukov Yu. A., Belov N. N., Burkin V. V., Ishchenko A. N., Kartashov Yu. I., Kasimov V. Z., Fomenko V. V., Yugov N. T. INCREASE OF EFFICIENCY OF HIGH-SPEED THROWING OF STRIKERS WITH APPLICATION OF HIGH-ENERGY FUELS WITH NANODISPERSED FILLERS. Possibilities of control for ignition and burning without transition in a detonation of new high-energy composite fuels due to introducing submicron and nanodispersed aluminum fillers in their structure are considered. The basic laws of crushing of aluminum particles up to the nanolevel are established. Ballistic tests and computational researches of high-speed impact are carried out for an optimum combination of the initial speed and mass of the thrown bodies.

Keywords: high-energy fuels, nanodispersed fuels, experimental and mathematical modeling, high-speed throwing, impact.

AFANAS'EVA Svetlana Akhmed-Ryzovna (Tomsk State University)

E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

BIRUKOV Yuriy Aleksandrovich (Tomsk State University)

E-mail: powder@niipmm.tsu.ru

BELOV Nikolay Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: n.n.belov@mail.ru

BURKIN Victor Vladimirovich (Tomsk State University)

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

ISHCHENKO Alexander Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

KARTASCHOV Yuriy Ivanovich (Tomsk State University)

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

KASIMOV Vladimir Zinatovich (Tomsk State University)

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

FOMENKO Vasily Vladimirovich (Tomsk State University)

E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

YUGOV Nikolay Tihonovich (Tomsk State University)

E-mail: n.t.yugov@mail.ru