

А. Ф. Ильюшенко^{1,2}, Е. Е. Петюшик¹, О. К. Кривонос¹

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь

²Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ЦИКЛИЧНЫМИ НИТРАМИНАМИ

Аннотация. Приведено описание способов повышения основных характеристик (плотность, теплота сгорания, температура горения, показатель газообразования) и эксплуатационных свойств (скорость и температура горения, полный и удельный импульс, свойства продуктов сгорания) энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала введением энергетических добавок в виде мелкодисперсных сферических порошков высокоэнергетических металлов или их сплавов, неметаллических материалов, дана оценка их эффективности с учетом технологичности и безопасности использования. Рассмотрено влияние основных ингредиентов композиционного материала на его эксплуатационные свойства.

Дан анализ современных подходов ведущих производителей к повышению эксплуатационных свойств энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала путем введения в его состав одного из циклических нитрамина с последующим модифицированием пластификаторами, обеспечивающим снижение чувствительности материала. Проведены термодинамические расчеты для ряда составов энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала, содержащего пластифицированные вторичные циклические нитрамина. Выполнен комплекс экспериментальных исследований образцов материала различных составов и определены их основные свойства.

Показана возможность равноценной замены в составе энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала мелкодисперсного порошка алюминия на один из флегматизированных циклических нитрамина. По результатам термодинамических расчетов и на основании комплекса экспериментальных исследований энергетических характеристик материала подтверждена возможность такой замены и определены границы приемлемого содержания циклических нитрамина в составе энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала. Сформулированы задачи для выхода на промышленную технологию изготовления на отечественных предприятиях рассмотренного класса материалов, модифицированных циклическими нитраминами.

Ключевые слова: энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы, циклические нитрамина, удельный импульс, модифицирование

Для цитирования. Ильюшенко, А. Ф. Модифицирование энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала циклическими нитраминами / А. Ф. Ильюшенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 27–33.

A. Ph. Ilyushchanka^{1,2}, Ya. Ya. Piatsiushyk¹, A. K. Kryvanos¹

¹State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Belarus

²Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

MODIFICATION OF THE ENERGY-SATURATED HETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIAL BY CYCLIC NITRAMINES

Abstract. Several methods have been described for increasing the main characteristics (density, heat of combustion, combustion temperature, gas formation index) and operating properties (combustion speed and temperature, total and specific impulse, properties of combustion products) of an energy-saturated heterogeneous composite material by introducing energy additives in the form of fine-dispersed spherical powders of high-energy metals or their alloys, non-metallic materials. Their efficiency has been estimated taking into account the workability and safety of use. The influence of the main ingredients of the composite material on its operating properties has been considered.

An analysis of modern approaches of leading manufacturers has been given to increase the operational properties of energy-saturated heterogeneous composite material by introducing into its composition one of the cyclic nitramines with subsequent modification by plasticizers, providing a decrease in the sensitivity of the material. Thermodynamic calculations have been carried out for a number of compositions of an energy-saturated heterogeneous composite material containing plasticized secondary cyclic nitramines. A complex of experimental studies of material samples of various compositions has been performed and their main properties have been determined.

A possibility of an equivalent substitution of finely dispersed aluminum powder in the composition of an energy-saturated heterogeneous composite material for one of the phlegmatized cyclic nitramines. According to the results of thermodynamic calculations and a complex of experimental studies of the energy characteristics of the material, the possibility of such a substitution has been confirmed and the boundaries of the acceptable content of cyclic nitramines in the composition of an energy-saturated heterogeneous composite material have been determined. The tasks for entering the industrial technology of manufacturing at the domestic enterprises of the considered class of materials modified with cyclic nitramines have been formulated.

Keywords: energy-saturated heterogeneous composite materials, cyclic nitramines, specific impulse, modification

For citation. Плушчанка А. Ф., Пяцішук Я. Я., Крыванос А. К. Модифікація энергоситованого гетэрагеннага кампазіцыйнага матэрыяла цыклічнымі нітрамінамі. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 27–33 (in Russian).

Введение. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы (ГКМ) являются источниками энергии целого ряда технических систем, работающих на основе использования реактивной тяги, создаваемой в процессе контролируемого горения указанного класса материала. Современные ГКМ представляют собой смесь равномерно распределенных полидисперсных фракций окислителя в среде полимера, который одновременно выполняет функцию связующего материала и является горючим [1]. Продукцию из ГКМ чаще всего используют в виде компактных изделий заданных размеров и формы. Изначально этот материал представляет собой гетерогенную субстанцию с достаточно высоким показателем вязкости (иногда до 10^5 Па·с), которая по мере полимеризации приобретает форму заполненной ею емкости.

В зависимости от особенностей технологии изготовления ГКМ и требуемых характеристик в состав такого материала могут вводиться технологические добавки, пластификаторы, стабилизаторы и антиоксиданты, которые в настоящее время представлены широким набором химических веществ и соединений.

Постановка задачи. Основными характеристиками, отражающими свойства ГКМ, являются плотность, теплота сгорания, температура горения, показатель газообразования. Эксплуатационные свойства указанного материала в основном определяются скоростью и температурой его горения, полным и удельным импульсом, свойствами продуктов сгорания ГКМ (прозрачность реактивной струи, степень ее абразивного воздействия на корпусные элементы технической системы) [2, с. 394–395].

В целях повышения удельного и полного импульса, скорости горения ГКМ в его состав вводят энергетические добавки в виде мелкодисперсных сферических порошков высокоэнергетических металлов или их сплавов, а также их гидридов или боридов. Использование в качестве энергетической добавки гидридов или боридов указанного класса металлов, как правило, ведет к существенному усложнению технологии изготовления ГКМ при незначительном приросте удельного импульса готового продукта [3]. Проведенный в [4] анализ показал, что наиболее подходящей энергетической добавкой по основным параметрам является мелкодисперсный сферический алюминий марок АСД или ПАД, что подтверждается на практике ведущими производителями ГКМ.

Экспериментально доказано, что введение мелкодисперсного сферического порошка алюминия при теплоте его сгорания 5300 ккал/кг и энтальпии образования конечного продукта горения $\Delta H_{298}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ минус 1675 кДж/моль существенно повышает удельный импульс ГКМ. В то же время применение алюминия в составе ГКМ связано с рядом проблем, проявляющихся в его неполном сгорании и агломерации, а также в образовании конденсированных продуктов в волне горения. В последующем это сказывается на работе технического устройства и приводит к потере удельного импульса, эрозионному воздействию на элементы конструкции технической системы, образованию шлаков в камере сгорания и повышенной дымности выхлопной струи [5].

Приведенные недостатки алюминия обуславливают необходимость поиска веществ или смесей, которые можно использовать в качестве энергетической добавки без снижения удельного импульса ГКМ относительно его алюминизированного аналога.

Большинство производителей ГКМ в качестве такой замены рассматривают некоторые циклические нитрамины (N-нитроамины) [6], например 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадиазоциклогексан ($(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$) или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадиазоциклооктан ($(\text{CH}_2)_4\text{N}_4(\text{NO}_2)_4$) и др. Однако

названные нитрамины являются достаточно высокочувствительными веществами, введение которых в состав смесевой композиции без предварительной подготовки может привести к неконтролируемой реакции с выделением большого количества теплоты и газов [7, с. 10].

С учетом изложенного *целью работы* ставится выявление возможности и определение условия равноценной замены мелкодисперсного порошка алюминия на один из циклических нитраминов, а также экспериментальное подтверждение данной гипотезы. При установлении такой возможности предполагается определить перечень задач, решение которых позволит выйти на промышленную технологию изготовления ГKM, модифицированного одним из циклических нитраминов.

В настоящее время известно несколько подходов к снижению чувствительности 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана. Наиболее распространенными из них являются модифицирование этих нитраминов:

пластификаторами, например парафином, воском, церезином, диоктилсебацатом и др. Введение указанных пластификаторов снижает вероятность их неконтролируемой реакции [8];

графитовыми покрытиями [9]. Нанесение графитовых покрытий на частицы уменьшает статическое напряжение, что приводит к переводу таких покрытий в полупроводниковое состояние и тем самым снижает степень чувствительности к механическим воздействиям на этапе их смешивания и формования;

1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензолом в сочетании с углеродом с нанесенным на него оксидом металла в среде поливинилового спирта (Патент RU 2441859) и др.

При кажущейся проработанности вопроса проблема снижения чувствительности циклических нитраминов в настоящее время окончательно не решена, так как каждый из приведенных подходов имеет свои недостатки. Так, модифицирование 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана графитовым покрытием из спиртового коллоидного раствора приводит к повышению пожарной опасности технологии изготовления ГKM.

Снижение чувствительности циклических нитраминов за счет введения в их состав 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола в сочетании с углеродом и нанесенным на него оксидом металла в среде поливинилового спирта технологически сложно и ограничивается доступностью необходимого сырья на рынке, а предложенные составы ГKM с ультрадисперсным алмазом ввиду своих реологических свойств технологически не реализуемы.

Вышеприведенные особенности модификации ГKM существенно усложняют технологию его изготовления, определяя необходимость проведения комплекса мероприятий по обеспечению промышленной безопасности. Наиболее безопасным в настоящее время является способ модификации 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана пластификаторами типа воск, парафин, церезин, диоктилсебацат и др.

Наряду с необходимостью снижения чувствительности циклических нитраминов проблемным вопросом по-прежнему остается отсутствие гарантированных поставщиков данного класса высокоэнергетического материала. Так, в Республике Беларусь не налажено их промышленное производство. Единственным производителем 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана в Российской Федерации является Завод имени Я. М. Свердлова (г. Дзержинск, Нижегородская область), который при наличии большого спроса на внутреннем российском рынке не может рассматриваться в качестве гарантированного поставщика сырья для белорусского производства ГKM. Поэтому необходимость отработки промышленной технологии с большим объемом ежегодного выхода модифицированного ГKM требует поиска других источников надежных поставок пластифицированных циклических нитраминов.

С учетом изложенного для изготовления ГKM, модифицированного рассмотренным классом нитраминов, целесообразно использовать пластифицированные вторичные 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексан или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктан, получаемые в ходе промышленной утилизации боеприпасов на соответствующих предприятиях страны (Центр утилизации авиационных средств поражения и Центр утилизации артиллерийских и инженерных боеприпасов).

Теоретическая часть исследования. В целях оценки возможности равноценной замены порошка алюминия на указанные циклические нитрамины проводились термодинамические расчеты для составов ГKM, содержащего Al до 15 % (контрольный образец), а также модифицированного

1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ с его содержанием 5 %, 10 % и 15 % (образцы № 1, 2 и 3 соответственно). Результаты расчетов для указанных композиций приведены в таблице.

Теплота сгорания ГKM определялась по данным элементарного состава с помощью эмпирической формулы Менделеева [10, с. 14], а теоретический удельный импульс J_s (J_v) вычислен при условии идеального расширения, без потерь расхождения или других потерь, связанных с отклонениями от идеального исполнения.

Результаты термодинамических расчетов
The results of thermodynamic calculations

Топливная композиция	Содержание энергетической добавки, %	T , К	ρ , г/см ³	J_s , Н·с/кг	J_v , Н·с/дм ³
ГKM (модифицированный Al), контрольный образец	15	1765	1,600	1999,2	300,7
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 1	5	1538	1,635	2294,2	382,8
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 2	10	1484	1,631	2148,2	358,1
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 3	15	1436	1,627	2007,0	333,2

Проведенные расчеты (таблица) показали увеличение удельного импульса ГKM, модифицированного $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, относительно контрольного образца при относительно равной плотности смеси композиции. Также модифицирование ГKM указанным нитрамино способствует снижению его рабочей температуры горения (\approx на 300 К), что соответствующим образом влияет на формирование прочностных и жаростойких требований к самой технической системе и отражается на ее стоимости. С учетом результатов, полученных по итогам расчетов, спланирована экспериментальная часть исследования.

Экспериментальная часть исследования. По разработанной технологии в стандартном смесителе роторного типа изготовлены экспериментальные составы ГKM с 5%-ным содержанием пластифицированного $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ – образец № 1, 10%-ным – образец № 2 и 15%-ным – образец № 3.

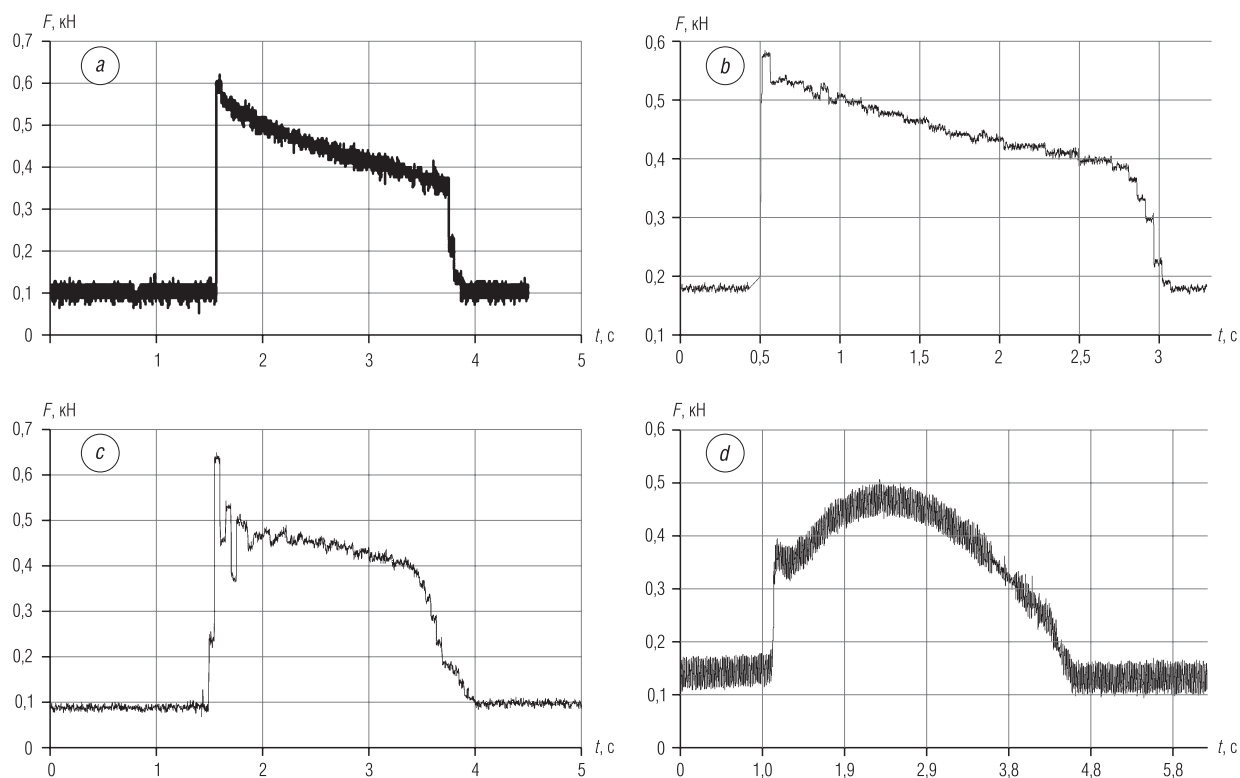
Полученная масса с вязкостью $4,8 \cdot 10^3$ Па·с заливалась по ГОСТ 18 616-80 в подготовленные формы с внутренним диаметром 66,4 мм и высотой 160 мм. Ее отверждение проводилось по рекомендованному регламенту для принятого полимера. Для формирования внутреннего канала использовался центральный стержень с диаметром 40 мм. После полимеризации образцов центральный стержень извлекался с помощью прессового оборудования.

Параметры изготовленных образцов оценивались в ходе их стендовых испытаний. Условия проведения испытаний устанавливались следующие: температура окружающей среды -5 °С, относительная влажность воздуха 91 %.

В ходе испытаний все образцы продемонстрировали стабильность горения при различных значениях давления, подтвердив расчетные показатели (см. таблицу). Время воспламенения составило менее 40 мс, а скорость горения при нормальном давлении – около 6,6 мм/с. С выходом на стабильный режим горения отмечено отсутствие пламени и прозрачность струи выхлопных газов у образцов № 1 и 2. Выхлопная струя образца № 3 имела характерный для данного класса материала полупрозрачный дым, наличие которого, предположительно, обусловлено избыточным содержанием неокисленного углерода.

Экспериментальные значения величины тяги, полученные в ходе испытаний для всех вариантов изготовленной топливной композиции, представлены на рисунке (а–с). Для сравнения показаны аналогичные параметры контрольного образца с содержанием алюминия до 15 % и испытанного на стенде композиционного материала при идентичных условиях (вариант d).

Сравнительный анализ представленных на рисунке диаграмм подтверждает возможность модификации ГKM циклическими нитраминами с их содержанием от 5 до 15 % от общей массы всех компонентов. Дальнейшее увеличение доли 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или



Диаграммы горения ГКМ, модифицированного флегматизированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$: *a* – 5 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *b* – 10 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *c* – 15 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *d* – до 15 % Al

Combustion diagrams of HCM modified with plegmatized $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$: *a* – 5 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *b* – 10 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *c* – 15 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *d* – up to 15 % Al

1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана выше 15 % в составе ГКМ ведет к падению тяги по причине недостатка окислителя, необходимого для горения полимера.

Таким образом, в ходе эксперимента подтверждена возможность полноценной замены в составе ГКМ порошка алюминия на один из флегматизированных циклических нитраминов, получаемых в ходе промышленной утилизации боеприпасов; определены границы приемлемого содержания циклических нитраминов в составе ГКМ на основе полиэфирной смолы, а также один из возможных составов; разработаны основы технологии изготовления безметаллического ГКМ.

С учетом полученных в ходе стендовых испытаний результатов состав образца с содержанием от 5 до 15 % 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана может быть принят за основу для изготовления безметаллического ГКМ. Предложенный состав может использоваться в технических системах, в которых критично наличие твердых частиц оксида алюминия в выхлопной струе, продукты горения не оказывают абразивно-разрушающего воздействия на этапе старта и не формируют дымовой завесы, негативно влияющей как на работу других узлов и агрегатов всей системы в целом, так и технического персонала, обслуживающего данную систему.

Практически подтверждено (Патент RU 2258057), что необходимая по массе доля флегматизированного 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана для детонации несгоревшего ГКМ при встрече технической системы с преградой составляет 10–15 %. Введение в состав ГКМ более 15 % флегматизированного 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана приводит к увеличению дымности выхлопной струи в ходе его горения, что создает помехи подсистеме наблюдения и управления.

В целях дальнейшего освоения разработанного состава ГКМ в производстве необходимо: определить целесообразный фракционный состав, обеспечивающий максимальную плотность упаковки, закон горения для данного состава; провести весь комплекс стендовых испытаний

(на изменение температуры окружающей среды, виброустойчивость, чувствительность к механическим воздействиям и др.), испытания на прозрачность выхлопной струи, а также натурные испытания в составе технической системы. По результатам испытаний следует уточнить состав и технологию изготовления ГKM; разработать технологический процесс изготовления ГKM, модифицированного флегматизированными циклическими нитраминами; изготовить необходимое технологическое оборудование и оснастку.

Наряду с доработкой полученного состава целесообразно продолжить исследования вопросов использования конверсионных материалов в изготовлении ГKM. Для этого необходимо: исследовать возможность изготовления ГKM с введением в его состав в качестве энергетической добавки других высокоэнергетических материалов, получаемых в ходе промышленной утилизации; определить наиболее целесообразные стабилизаторы горения флегматизированных циклических нитрамина для всего диапазона рабочих температур и давлений; установить для всех разработанных составов целесообразный фракционный состав, обеспечивающий максимальную плотность упаковки; определить закон горения для всех разработанных составов. По результатам перечисленных работ следует обозначить направления исследований по дальнейшей локализации производства ГKM и его компонентов на отечественных предприятиях.

Выводы. Модифицирование ГKM одним из флегматизированных циклических нитрамина делает процесс его изготовления более безопасным ввиду отсутствия необходимости снижать его чувствительность на этапе подготовки исходных компонентов перед смешиванием, а также дает возможность повторного использования конверсионных материалов, что существенно снижает стоимость конечного продукта. Указанные свойства разработанного ГKM способствуют дальнейшему развитию ряда технических систем, существенно увеличивая эффективность их применения по назначению за счет лучшей управляемости.

Решение приведенных задач позволит отработать методологию модификации ГKM доступными на внутреннем рынке флегматизированными циклическими нитраминами, создать технологический задел для дальнейшей локализации производства данного класса композиционного материала и продолжить работы по поиску энергетических добавок, удовлетворяющих современным требованиям.

Список использованных источников

1. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: Респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2016. – Вып. 39. – С. 12–16.
2. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 533 с.
3. Бондаренко, С.Г. Эффективность применения гидроксида алюминия для ракетно-космических двигателей на пастообразном топливе / С.Г. Бондаренко, В.А. Габринец // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №4 (121). – С. 96–103.
4. Энергетические добавки в составе смесевых энергонасыщенных композиционных гетерогенных материалов / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 10-го Междунар. симп. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 429–440.
5. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации / О.Г. Глотов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 83–97.
6. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов / М.Б. Талавар [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 72–85.
7. Шарнин, Г.П. Химия энергоемких соединений / Г.П. Шарнин; М-во образ. и науки Рос. Федерации, Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – Казань: КНИТУ, 2011. – Кн. 2: N-, O-нитросоединения, фуросаны, фуразаны, азиды, диазосоединения. – 376 с.
8. Орлова, Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ / Е.Ю. Орлова. – Л.: Химия, 1973. – 688 с.
9. Алейников, В.А. Нанопокрyтия компонентов смесевых конденсированных систем / В.А. Алейников, В.М. Мальцев, Ю.М. Милехин // Нанокompозиты: исследования, производство и применение: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. по перспективным композиционным материалам «Нанокompозиты-2004». – М., 2004. – С. 102–103.
10. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев [и др.]; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

References

1. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V. Energy-saturated heterogeneous composite materials on a polymer base. Some development issues and ways to solve them. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, Issue 39, pp. 12–16 (in Russian).
2. Alemasov V. E., Dregalin A. Ph., Tishin A. P. Glushko V. P. (ed.). *The theory of rocket engines: a textbook for students of higher technical educational institutions*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 533 p. (in Russian).
3. Bondarenko S. G., Gabrinetz V. A. Efficiency of aluminum hydride application for paste fuel aerospace. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Aerospace Technic and Technology*, 2015, no. 4 (121), pp. 96–103 (in Russian).
4. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Petrov I. V., Smirnov G. V., Sudnik L. V. Energetic additives in the composition of mixed energy-saturated composite heterogeneous materials. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka: sbornik dokladov 10 mezhdunarodnogo simpoziuma* [Powder Metallurgy: surface engineering, new powder composite materials, welding: Collection of Reports of the 10th International Symposium]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 429–440 (in Russian).
5. Glotov O. G., Yagodnikov D. A., Vorob'ev V. S., Zarko V. E., Simonenko V. N. Ignition, combustion and agglomeration of encapsulated aluminum particles in a mixed solid fuel composition. II. Experimental studies of agglomeration. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 320–333. DOI: 10.1007/s10573-007-0045-y
6. Talavar M. B., Sivabalan R., Anniyapan M., Gore G. M., Astana S. N., Gandhe B. R. New trends in the development of promising high-energy materials. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 62–72. DOI: 10.1007/s10573-007-0010-9
7. Sharnin G. P. *Chemistry of energy-rich compounds. Book 2. N-, O-nitro compounds, furoxanes, furazans, azides, diazo compounds*. Kazan', Kazan National Research Technological University, 2011. 376 p. (in Russian).
8. Orlova E. Yu. *Chemistry and Technology of Disruptive Explosives*. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 688 p. (in Russian).
9. Aleinikov V. A., Maltsev V. M., Milekhin Yu. M. Nano-coating of the components of mixed condensed systems. Nano-composites: research, production and application. *Nanokompozity: issledovaniya, proizvodstvo i primeneniye: tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po perspektivnym kompozitsionnym materialam "Nanokompozity-2004"* [Nano-composites: research, production and application: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Practical Conference on Promising Composite Materials "Nano-composites-2004"]. Moscow, 2004, pp. 102–103 (in Russian).
10. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., Konovich M. N., Korchunov Yu. N., Rundygina Yu. A., Shagalova S. L., Shestakov S. M. *The fundamentals of the practical theory of combustion: a textbook for high schools*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Information about the authors

Aliaksandr F. Ilyushchanka – Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Yauheni Ya. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of General Director for Research, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Deputy of General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by