

06

Особенности инициирования сильноточным электронным пучком энергокомполитов на основе пористого кремния с добавками борида и графена

© Г.Г. Савенков,^{1,3} В.А. Морозов,² М.А. Илюшин,¹ У.М. Побережная,^{1,3} В.М. Фрейман,³ А.Г. Зегря,³
В.А. Брагин,⁴ Д.В. Фадеев,⁵ Г.Г. Зегря³

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Старый Петергоф, Санкт-Петербург, Россия

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴НПО „Поиск“,
188662 Ленинградская обл., Всеволожский район, Мурино, Россия

⁵Муромский приборостроительный завод,
602205 Муром, Россия

e-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2023 г.

В окончательной редакции 10 октября 2023 г.

Принято к публикации 21 октября 2023 г.

Представлены результаты экспериментов по зажиганию образцов энергонасыщенных композитов на основе пористого кремния (горючее) и перхлората натрия (окислитель), содержащих порошки борида ниобия и графена, сильноточным электронным пучком. Установлена немонотонная зависимость воспламеняемости энергонасыщенных композитов от концентрации борида ниобия.

Ключевые слова: энергонасыщенный композит, пористый кремний, борид ниобия, графен, сильноточный электронный пучок, зажигание.

DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23

Введение

Энергонасыщенные композиты (ЭНК) на основе пористого кремния (*por-Si*) с различными окислителями, начиная с начала XXI в., вызывают повышенный интерес исследователей во многих зарубежных странах, в том числе и в России [1–4].

Расчетные и экспериментальные значения удельной теплоты взрывчатого превращения Q (под взрывчатым превращением понимается горение, взрыв, детонация [5]) для ЭНК на основе *por-Si* превосходят соответствующие значения удельной теплоты Q как для индивидуальных вторичных взрывчатых веществ (ВВ), так и для взрывчатых составов [3,5–7]. И, хотя, скорость детонации D пропорциональна корню квадратному из Q : $D \sim \sqrt{Q}$ [5], тем не менее измеряемые значения скоростей процесса не превосходят 4.5 km/s [1,2,4,6–11]. Отметим, что значение скорости реакции 10 km/s по поверхности образца, приводимое в [11], вряд ли может считаться скоростью детонации. В работе [10] фиксировали максимумы скорости 5000 и 6710 m/s при 67% пористости кремния. Однако сообщалось, что эти высокие значения скорости были измерены только в течение одного или двух кадров высокоскоростного видео, где фронт реакции „прыгает“ на 2 см между кадрами в видео с 250 000 fps. Низкие значения D , несмотря на

высокие значения Q , естественно, сказываются на взрывчатых характеристиках указанных ЭНК (инициирующей и детонационной способностях), что и сдерживает их практическое применение.

В то же время известно [12], что максимальная теплота взрыва Q_{\max} (показатель предельной возможности выделения энергии ВВ в процессе превращения химической энергии в тепловую при взрывчатом превращении (горении, взрыве, детонации), которая коррелирует с Q , является количественным показателем эксплуатационной безопасности (совокупность показателей по механической и тепловой чувствительности) классических ВВ типа $C_a H_b N_c O_d$ (т.е. вторичных (бризантных) ВВ) и может быть использована для их классификации по степени опасности. Вероятно, это справедливо и для ЭНК на основе пористого кремния. Например, исследования, проведенные в работе [13], показали, что чувствительность к удару и трению бинарных смесей (*por-Si* + перхлораты), которые имеют более высокие значения теплоты взрыва, чем классические вторичные ВВ, очень высока и находится на уровне чувствительности классических первичных (инициирующих) ВВ.

Таким образом, необходимо решить проблему повышения Q с одновременным снижением чувствительности, по крайней мере, к механическим воздействиям,

что повысит эксплуатационную безопасность изделий, снаряженных ЭНК (*por-Si* + окислитель). Известно, что снижение чувствительности взрывчатых веществ и составов к механическим воздействиям осуществляется либо путем их флегматизации, либо путем их разбавления инертными добавками [14]. Для повышения же энергоемкости различных энергонасыщенных материалов (ЭНМ), включая ракетные топлива и пиротехнические составы, часто в качестве добавки с высокой теплотой сгорания предлагается порошкообразный бор [15,16]. Но наряду с этим бор имеет ряд сдерживающих факторов своего применения: высокую температуру воспламенения (~ 1900 К), большие значения времени задержки воспламенения и характерного времени горения. Поэтому на замену ему предложены дибориды алюминия (AlB_2), титана (TiB_2) и полиборид магния (MgB_{12}) [1,15–17], которые уменьшают негативные факторы бора и также повышают энергетические характеристики указанных ЭНМ за счет своей повышенной теплоты взрывчатого превращения (теплоты сгорания) [18,19]. Однако необходимо отметить, что введение инертных порошкообразных высокоплотных металлических добавок (сталь, вольфрам) в индивидуальные бризантные ВВ всегда снижает скорость детонации [20]. Данные по влиянию высокоплотных металлических добавок на композиционные ЭНМ отсутствуют.

В свете сказанного одним из претендентов на добавку в ЭНМ может являться борид ниобия (NbB). К сожалению, в литературе отсутствуют данные по его теплотворной способности. Но можно предполагать, что она гораздо выше, чем диборидов алюминия (AlB_2), титана (TiB_2) и полиборида магния (MgB_{12}), поскольку теплотворная способность ниобия гораздо выше теплотворной способности алюминия, титана и магния. К тому же преимуществом бориды ниобия является то, что он имеет существенно более высокую плотность по сравнению с бором и диборидами алюминия и титана (7.5 g/cm^3 против 2.4 g/cm^3 , 3.2 g/cm^3 , 4.52 g/cm^3 соответственно). А это может привести к более существенному повышению плотности заряда с его добавками. В результате существует вероятность повышения детонационного давления в процессе взрывчатого превращения (ВП) в режиме детонации при условии полного окисления бориды ниобия [5].

Однако не ясно, какие значения концентраций добавок бориды ниобия в заряды ЭНК на основе пористого кремния являются оптимальными с точки зрения соотношения между энергоемкостью и чувствительностью. Кроме того, высокие значения концентрации могут привести к высоким значениям энергоемкости, но и к низким значениям чувствительности, в результате возникнет проблема инициирования таких зарядов. В то же время можно предполагать, что вышеуказанные заряды ЭНК с добавками бориды ниобия перспективны с точки зрения инициирования с помощью электрофизических воздействий (электрический разряд, воздействие силь-

ноточного электронного пучка (СЭП) наносекундной длительности и др.).

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию влияния добавок бориды ниобия в заряды ЭНК на основе пористого кремния (в качестве горючего) и перхлората натрия (в качестве окислителя) на их воспламеняемость под действием сильноточного электронного пучка наносекундной длительности. Выбор электронно-пучкового инициирования воспламенения (зажигания) обусловлен тем, что СЭП наносекундной длительности, обладая трехфакторным воздействием (тепловым, механическим и ударно-волновым) на ЭНМ [21], более эффективно действует на композиции, имеющие в своем составе частицы повышенной электрической проводимости и плотности [22].

1. Энергонасыщенные композиты и методика проведения экспериментов

В качестве основного энергонасыщенного композита был взят ЭНК *por-Si*⁺ перхлорат натрия ($NaClO_4$) в соотношении 50 : 50 (массовые доли). Пористый кремний с пористостью $\sim 66\text{--}68\%$ был получен из пластин толщиной $\sim 700\text{--}800 \mu\text{m}$ монокристаллического кремния, легированного бором (марка КДБ-100). Технология получения пластин пористого кремния, порошка (размер частиц порошка $35\text{--}45 \mu\text{m}$) из них и энергонасыщенного композита на основе *por-Si* изложена в работах [23–25].

Перхлорат натрия в качестве окислителя был выбран в силу того, что он наряду с перхлоратом кальция, по мнению ряда исследователей, является наиболее оптимальным (как с точки зрения своей растворимости, так и с точки зрения получаемых энергетических характеристик композитов) для ЭНК на основе *por-Si* [1]. Раствор перхлората натрия в этиловом спирте и порошок пористого кремния обрабатывали в ультразвуковой ванне „Сапфир“ мощностью 50 W в течение 30 min при комнатной температуре. В результате $NaClO_4$ адсорбировался на стенках пор и равномерно распределялся в массе пористого кремния.

В качестве добавок использовались порошкообразный борид ниобия (размер части $20\text{--}30 \mu\text{m}$) и многослойный

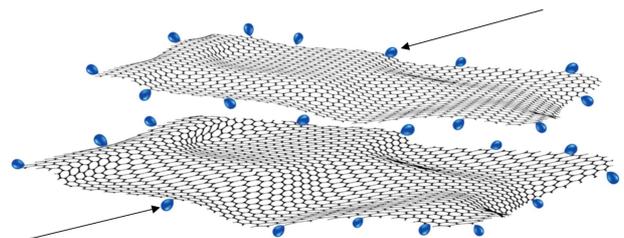


Рис. 1. Двухслойный графен, содержащий гидроксильные группы (обозначены стрелками), незакрытые валентности в графене закрыты водородом.

(2–5 слоев) графен (Gr), который содержит гидроксильные группы OH^- (рис. 1), в результате чего в таком графене содержится $\sim 9\%$ кислорода [26,27].

Выбор графена обусловлен тем, что он является эффективной сенсibiliзирующей добавкой в ЭНМ при воздействии СЭП [28]. Добавки борида ниобия составляли 5, 10, 12.5, 15 и 20 mass.% (сверх 100% в основной ЭНК). Добавки Gr в композит $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + \text{NbV}$ (5 mass.%) составляли 5 mass.% (сверх 100% относительно основного ЭНК) и 10 mass.% сверх 100% в композите $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4$ (10 mass.%). Графен и борид ниобия вводили в навеску $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4$ в сухом виде, смешивая до получения однородного порошка, таким образом, получали композиции $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + \text{NbV}$ или $\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + \text{NbV} + \text{Gr}$.

Все ЭНК запрессовывали в колпачки с внутренним диаметром 4.55 mm на высоту $\sim 1.1\text{--}1.2\text{ mm}$ (полная глубина колпачка 2.0 mm). Масса всех запрессованных ЭНК составляла 32–44 mg, плотность $\rho_c \approx 1.64\text{--}2.57\text{ g/cm}^3$. Можно отметить, что добавка графена приводила к ухудшению условий прессования заряда в колпачке, и роста плотности заряда не наблюдалось (см. таблицу, строки 6 и 7), а в некоторых случаях это приводило и к снижению плотности по отношению к зарядам без графена (см. таблицу, строка 7).

Схема облучения образца ЭНК в колпачке СЭП (диаметром 8 mm) наносекундной длительности (30–40 ns на полувысоте) в принципе аналогична схеме, приведенной в работе [29]. Средняя энергия электронов в пучке составляла 250 keV. Эксперименты проводились в вакуум-камере с остаточным давлением воздуха 10^{-2} Pa.

2. Результаты экспериментов и их анализ

Результаты экспериментов представлены в таблице. В качестве положительного результата произошедшего взрывчатого превращения считалось полное отсутствие заряда ЭНК в колпачке. Пример неполного взрывчатого превращения заряда представлен на рис. 2.

Вид и режим взрывчатого превращения остается неизвестным. Анализ результатов, приведенных в таблице, показал следующее.

Во-первых, результаты, приведенные в 4-ой строке таблицы, свидетельствуют о том, что скорость взрывчатого превращения ЭНК ($\text{por-Si} + \text{NaClO}_4 + 12.5\% \text{ NbV}$) сопоставима со скоростью распространения упругих волн в данном композите. Такой вывод следует из того, что ударная волна, инициированная ударно-волновым фактором СЭП, пройдя сквозь образец ЭНК, частично отразилась от дна колпачка и выбросила весьма незначительное количество композита (остальная часть в результате взрывчатого превращения успела сгореть).

Можно полагать, что значение упругой волны в композите находится в условном диапазоне 3.5–4.5 km/s [30,31]. Таким образом, во всех случаях,



Рис. 2. Общий вид образцов после воздействия СЭП наносекундной длительности: *a* — полное выгорание заряда ЭНК в колпачке; *b* — неполное выгорание заряда ЭНК в колпачке.

когда произошло полное выгорание ЭНК, скорости взрывчатого превращения, очевидно, находятся в том же самом диапазоне. Являются ли эти значения скоростями детонации? Вопрос остается открытым, для ответа на него требуются дополнительные исследования.

Во-вторых, в зарядах ЭНК без добавок и с добавками графена происходит их полное выгорание.

В-третьих, в зарядах ЭНК с добавками борида ниобия (без добавок графена) их полное выгорание происходит при определенных концентрациях NbV. С чем же могут быть связаны подобные результаты?

В настоящее время при воздействии на ЭНМ (ВВ) импульсов энергии, которые приводят к взрывчатым превращениям наибольшее распространение и развитие получила теория „горячих точек“ [5]. Согласно этой теории, разогрев ВВ происходит в локальных очагах (которые и называются „горячими точками“). Разогрев локальных очагов до критической температуры (T_{cr})

Результаты экспериментов по иницированию ЭНК

№	ЭНК	Плотность, g/cm ³	Результат	Примечание
1	<i>por</i> -Si+NaClO ₄	1.64–1.79	+	
2	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (5 mass.%)	1.83–2.0	±	Частичное выгорание 4–5 mg ЭНК
3	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (10 mass.%)	2.35–2.57	–	Потемнение поверхности
4	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (12.5 mass.%)	2.4–2.6	+	~ 3 mg ЭНК выбрасывалось волной отражения в вакуум-камеру
5	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (15 mass.%)	2.25–2.46	+	
6	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (20 mass.%)	2.3–2.5	+	Получены два положительных результата и два отрицательных (неполное выгорание композиции)
7	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (5 mass.%) + Gr (5 mass.%)	1.84–2.01	+	
8	<i>por</i> -Si+NaClO ₄ +NbB (10 mass.%) + Gr (5 mass.%)	2.3–2.5	+	

Примечание. В каждой строке (кроме строки 6) отражены результаты трех экспериментов, в строке 6 — четырех экспериментов.

(температуры вспышки) приводит к быстрой экзотермической реакции в них, т. е. к взрывчатому превращению (горению). Если концентрация очагов горения достаточно велика, то их объединение приводит к горению большой поверхности заряда, что в результате может привести к более высокому режиму взрывчатого превращения (низкоскоростной или нормальной детонации).

В случае зарядов ЭНК без добавок энергокомполит близок к индивидуальному ВВ, в котором горючее и окислитель находятся в одной молекуле. Тогда при действии электронного пучка на заряд ВВ или на заряд *por*-Si+NaClO₄ выделение энергии пучка происходит практически на каждой частице ВВ или поре ЭНК, заполненной перхлоратом натрия, вместе со стенками поры, т. е. в качестве „горячей точки“ или очага иницирования следует рассматривать всю область энергосвечения электронного пучка, имеющую в первом приближении диаметр пучка и толщину, равную экстраполированному пробегу электронов [21]. Таким образом, при действии СЭП на ЭНК без добавок энергии пучка хватает, чтобы в почти каждой частице заряда создать „горячую точку“ и тем самым возбудить в заряде ВП.

Однако при действии СЭП на заряды ЭНК с добавками NbB процесс разогрева может происходить по другому более сложному сценарию. Поскольку даже при относительно небольшой концентрации бориды ниобия (5 и 10%) полного взрывчатого превращения в образцах не происходит, разумно предположить, что очаги воспламенения в основном композите не образуются или их концентрация очень мала, т. е. в этом случае роль локальных очагов разогрева выполняют инертные частицы бориды ниобия, которые являются областями повышенной плотности (вместе с близлежащими частицами ЭНК). Такие области в соответствии с общими физическими принципами либо в большей степени при-

тягивают к себе электроны, увеличивая тем самым вероятность их столкновения с частицами NbB, либо поглощаются этими частицами, проходя сквозь более легкие частицы основного ЭНК. В результате таких множественных столкновений происходит ускоренный и более интенсивный нагрев инертных частиц бориды ниобия, вплоть до температуры плавления ($T_f = 2545$ К). О том, что такие температуры достижимы, свидетельствуют достаточно давно известные методы закалки различных металлов и сплавов сильноточным электронным пучком различной длительности [32]. Необходимо также учесть и то, что удельная теплоемкость с бориды ниобия в два раза ниже удельной теплоемкости основной композиции ($c \approx 300\text{--}400$ J/(kg·K) у NbB против $700\text{--}750$ J/(kg·K) у *por*-Si+NaClO₄). Таким образом, даже при одинаковой дозе облучения частицы бориды ниобия могут нагреваться в соответствии с соотношением (1) до более высоких температур:

$$\Delta T = \frac{D_e}{C_1}, \quad (1)$$

где E_e — количество энергии излучения ΔE , поглощенное в единице массы m облучаемого вещества (поглощенная доза излучения): $D_e = \Delta E/m$.

Частицы NbB, нагретые до высоких температур (например, плавления или близких к ней), собственно и разогревают близлежащие области ЭНК до критических температур, вызывая в них термическое разложение и быстрые экзотермические реакции (горение). Объединение очагов горения приводит к горению большей части площади заряда ЭНК (исключая площадь, занимаемую частицами бориды ниобия), что может вызвать один из режимов взрывчатого превращения — низкоскоростную или нормальную детонацию. Высокая температура ВП ($3500\text{--}4000$ К) основной композиции может привести к полному разложению частиц бориды ниобия, усилив

полный температурный эффект ВП всей композиции и возможно его детонационные параметры.

Очевидно, что для полного объединения очагов воспламенения необходимым условием является достижение их концентрации некоторого критического значения n_{cr} [33]. Исходя из данного условия, легко можно объяснить результаты по ВП в образцах с боридом ниобия (без добавок графена).

При 5% концентрации частиц NbB их явно недостаточно. Поэтому в качестве горячих точек выступают частицы основного ЭНК, но поскольку количество таких очагов также незначительно (вследствие того, что большое количество электронов попадает на частицы бориды ниобия), то начавшееся горение затухает. При концентрации частиц NbB 10% их также недостаточно, но в этом случае доза облучения, приходящаяся на частицы основного ЭНК, весьма незначительна и поэтому очаги воспламенения в *por-Si+NaClO₄* либо отсутствуют совсем, либо их количество весьма мало, вследствие чего горение в заряде не возникает. Наконец, концентрация 12.5% является критическим значением, начиная с которого заряд воспламеняется полностью. Но уже при 20% содержании бориды ниобия энергии активной части заряда (*por-Si+NaClO₄*) начинает не хватать для горения его инертной части (NbB) вследствие чего в ряде случаев происходит неполное взрывчатое превращение заряда.

Взрывчатое превращение зарядов ЭНК с добавками графена, вероятно, объясняется следующими причинами. Во-первых, как было сказано выше, применяемый графен содержал дополнительный кислород, расположенный по периферии графеновых листов. Количество кислорода в таких графеновых листах достигает ~ 9%. Т.е. в применяемых образцах ЭНК дополнительно находилось 0.45% (mass.) (5% Gr) и 0.9% (mass.) (10% Gr) кислорода, являющегося активным окислителем. Во-вторых, графен обладает (по крайней мере, теоретически) большой электропроводностью. Кроме того, он имеет аномально высокий коэффициент теплопроводности $\sim 5 \cdot 10^3$ W/(m·K) [34], что может привести к сильному теплоотводу и широкой зоне разогрева материала основного ЭНК, прилегающего к частицам графена, которые могут разогреваться под действием потока электронов до очень высоких температур, являясь, таким образом, своеобразными горячими точками. Отметим, что температура плавления графена по разным оценкам находится в диапазоне $T_{mel} = 3400-5000$ K [35,36]. Однако имеются исследования [37], в которых показано, что в инертной атмосфере при нагревании до 600°C процессы термодеструкции приводят к потере примерно 20% массы образца двухслойного графена, остаток графена распадется в инертной атмосфере при более высокой температуре. Учитывая наши результаты (эксперименты проводили в вакууме и графен полностью сгорал), можно полагать, что T_{mel} графена все же находится ближе к значению $T_{mel} = 3400$ K.

Заключение

В рамках проведенной работы показано, что частицы бориды ниобия и графеновые листы могут быть применены в качестве активных добавочных компонентов энергонасыщенных композигов на основе пористого кремния. Как частицы бориды ниобия, так и частицы двухслойного графена играют роль горячих точек, нагревающих прилегающие частицы основного ЭНК до их температуры вспышки. Кроме того, частицы бориды ниобия увеличивают плотность заряда и тем самым могут способствовать увеличению давления в продуктах взрывчатого превращения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку (проект 075-15-2020-790).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ш.Л. Гусейнов, С.Г. Федоров *Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах* (ТОРУС ПРЕСС, Москва, 2015)
- [2] C.R. Becker, G.J. Gillen, M.E. Staymates, C.R. Stoldt *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7** (45), 25539 (2015). DOI: 10.1021/acsami.5b09076
- [3] Г.Г. Савенков, А.Г. Зегря, Г.Г. Зегря, Б.В. Румянцев, А.Б. Синани, Ю.М. Михайлов. *ЖТФ*, **89** (3), 397 (2019). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23 [G.G. Savenkov, A.G. Zegrya, G.G. Zegrya, B.V. Rumyantsev, A.B. Sinani, Yu.M. Mikhailov. *Tech. Phys.*, **64** (3), 361 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219030204]
- [4] P.M. Guerieri, B. Fuchs, W.A. Churaman. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **46** (8), 1260 (2021). DOI: 10.1002/prep.202000311
- [5] *Физика взрыва* под ред. Л.П. Орленко (Физматлит, М., 2002), т. 1.
- [6] E.G. Kishilew, A. Gany. In: *Proceedings of the 16th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials* (University of Pardubice Pardubice, Czech Republic, 2013), p. 1066.
- [7] A. Abraham, W. Nicholas, N.W. Piekielek, J. Christopher, C.J. Morris, E.L. Dreizin. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **41** (1), 179 (2016). DOI: 10.1002/prep.201500108
- [8] D. Clément, J. Diener, E. Gross, N. Künzer, N. Timoshenko, D. Kovalev. *Phys. Status Solidi A*, **202** (8), 1357 (2005). DOI:10.1002/pssa.200461102
- [9] W. Churaman, L. Currano, C. Becker. *J. Phys. Chem. Solids*, **71** (2), 69 (2010). DOI:10.1016/j.jpcs.2009.07.02
- [10] C.R. Becker, S. Apperson, C.J. Morris, S. Gangopadhyay, L.J. Currano, W.A. Churaman, C.R. Stoldt. *Nano Lett.*, **11** (2), 803 (2011). DOI: 10.1021/nl104115u

- [11] E.-C. Koch, D. Clément. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **32** (3), 205 (2007). DOI:10.1002/prep.200700021
- [12] В.И. Пепекин. *Хим. физ.*, **29** (12), 8 (2010). [V.I. Perekin. *Rus. J. Phys. Chem. B*, **5** (1), 41 (2011). DOI: 10.1134/S1990793111010118]
- [13] М.В. Агеев, Ю.Н. Ведерников, Г.Г. Зегря, У.М. Побережная, В.К. Попов, Г.Г. Савенков. *Письма в ЖТФ*, **46** (5), 48 (2020). DOI:10.21883/PJTF.2020.05.49110.18144 [M.V. Ageev, Yu.N. Vedernikov, G.G. Zegrya, U.M. Poberezhnaya, V.K. Popov, G.G. Savenkov. *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 249 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020030037]
- [14] М.А. Илюшин, Г.Г. Савенков, А.С. Мазур. *Промышленные взрывчатые вещества* (Лань, СПб., 2017)
- [15] Д.А. Ягодников, А.В. Воронежский, В.И. Сарабьев. *ФГВ*, **52** (3), 51 (2016). DOI: 10.15372/FGV20160307 [D.A. Yagodnikov, A.V. Voronetskii, V.I. Sarab'ev. *Combustion, Explosion, Shock Waves*, **52** (3), 300 (2016). DOI: 10.1134/S0010508216030072]
- [16] А.Г. Коротких, В.А. Архипов, К.В. Слюсарский, И.В. Сорокин. *ФГВ*, **54** (3), 109 (2018). DOI: 10.15372/FGV20180312 [A.G. Korotkikh, V.A. Arkhipov, K.V. Slyusarsky, I.V. Sorokin. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **54** (3), 350 (2018). DOI: 10.1134/S0010508218030127]
- [17] В.А. Архипов, А.С. Жуков, В.Т. Кузнецов, Н.Н. Золотарёв, Н.А. Осипова, К.Г. Перфильева. *ФГВ*, **54** (6), 68 (2018). DOI: 10.15372/FGV20180608 [V.A. Arkhipov, A.S. Zhukov, V.T. Kuznetsov, N.N. Zolotorev, N.A. Osipova, K.G. Perfil'eva. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **54** (6), 689 (2018). DOI: 10.1134/S0010508218060084]
- [18] M.K. King. *J. Spacecraft and Rockets*, **19** (4), 294 (1982). DOI:10.2514/3.62256
- [19] A. Gany, Y.M. Timnat. *Acta Astronautica*, **29** (3), 181 (1993). DOI:10.1016/0094-5765(93)90047-z
- [20] *Физика взрыва* под ред. К.П. Станюковича (Наука, М., 1975)
- [21] В.А. Морозов, Г.Г. Савенков, В.А. Брагин, В.М. Кац, А.А. Лукин. *ЖТФ*, **82** (5), 129 (2012).
- [22] Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, В.А. Брагин, В.М. Кац, А.А. Лукин. *ЖТФ*, **83** (7), 96 (2013).
- [23] Г.Г. Савенков, А.И. Козачук, У.М. Побережная, В.М. Фрейман, Г.Г. Зегря. *Письма в ЖТФ*, **47** (4), 7 (2022). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23 [G.G. Savenkov, A.I. Kozachuk, U.M. Poberezhnaya, V.M. Freiman, G.G. Zegrya. *Tech. Phys. Lett.*, **48** (2), 50 (2022). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23]
- [24] Г.Г. Зегря, В.П. Улин, А.Г. Зегря, Н.В. Улин, В.М. Фрейман, Ю.М. Михайлов. *ЖТФ*, **89** (10), 1575 (2019). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23 [G.G. Zegrya, V.P. Ulin, A.G. Zegrya, N.V. Ulin, Yu.M. Mikhailov. *Tech. Phys.*, **64** (10), 1492 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219100268]
- [25] А.Г. Зегря, В.В. Соколов, Г.Г. Зегря, Ю.В. Ганин, Ю.М. Михайлов. *Письма в ЖТФ*, **45** (21), 3 (2019). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23 [A.G. Zegrya, V.V. Sokolov, G.G. Zegrya, Yu.V. Ganin, Yu.M. Mikhailov. *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 1067 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019110154]
- [26] А.П. Возняковский, Г.Н. Фурсей, А.А. Возняковский, М.А. Поляков, А.Ю. Неверовская, И.И. Закиров. *Письма в ЖТФ*, **45** (9), 46 (2019). DOI:10.21883/PJTF.2019.09.47715.17705 [A.P. Voznyakovskii, G.N. Fursey, A.A. Voznyakovskii, M.A. Polyakov, A.Yu. Neverovskaya, I.I. Zakirov. *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 467 (2019). DOI:10.1134/S1063785019050158]
- [27] Г.Г. Савенков, Д.В. Фадеев, У.М. Побережная, М.А. Илюшин, А.С. Мазур, А.П. Возняковский, И.А. Оськин, В.А. Брагин, И.В. Шугалей. *Известия СПбГТИ(ТУ)*, **64** (90), 34 (2023). DOI 10.36807/1998-9849-2023-64-90-34-39
- [28] Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, М.А. Илюшин, М.А. Кац. *Письма в ЖТФ*, **44** (12), 39 (2018). DOI:10.21883/PJTF.2018.12.46289.17204 [G.G. Savenkov, V.A. Morozov, M.A. Ilyushin, V.M. Kats. *Tech. Phys. Lett.*, **44**, 522 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018060275]
- [29] Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, М.А. Илюшин, И.А. Оськин, В.А. Брагин, А.С. Козлов. *ЖТФ*, **87** (11), 1701 (2017). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56909.193-23
- [30] G.N. Aliev, V. Goller, P.A. Snow. *J. Appl. Phys.*, **110**, 043534-2 (2011). DOI: 10.1063/1.3626790
- [31] Д.В. Корабельников, Ю.Н. Журавлев. *ФТТ*, **58** (6), 1129 (2016).
- [32] Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. *Основы электроннолучевой обработки материалов* (Машиностроение, М., 1978)
- [33] С.А. Рашковский, Г.Г. Савенков. *Письма в ЖТФ*, **40** (11), 73 (2014).
- [34] С.П. Губин, С.В. Ткачев. *Графен и родственные наноструктуры углерода* (Книжный дом „ЛИБРОКОМ“, М., 2012)
- [35] А.Е. Галашев, О.Р. Рахманов. *УФН*, **184** (10), 1045 (2014). [A.E. Galashev, O.R. Rakhmanova. *Phys. Usp.*, **57** (10), 970 (2014). DOI 10.3367/UFNe.0184.201410c.1045]
- [36] А.И. Подливаев. *Письма в ЖЭТФ*, **115** (6), 384 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822060064
- [37] М.А. Илюшин, А.П. Возняковский, А.С. Козлов, О.П. Шустрова, И.В. Шугалей, Г.Г. Савенков, А.С. Тверьянович, Ю.С. Тверьянович, А.А. Возняковский, И.В. Целинский, А.В. Смирнов. *Известия СПбГТИ (ТУ)*, **47** (73), 3 (2018).