

## Применение микрогибридных гетерогенных конденсированных систем для повышения энергетики ракетных двигателей

© П.М. Бечаснов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены гетерогенные конденсированные системы, потенциально позволяющие использовать в их составе высокоэффективные окислители, в том числе жидкие, применение которых в составе твердых ракетных топлив невозможно обеспечить существующей технологией. Если разместить такие окислители, как диоксид азота и тетранитрометан, в герметичных сгорающих полимерных капсулах, соединяемых физическими или химическими способами, можно создать микрогибридный ракетный двигатель. Проведенные на основе анализа характеристик аналогичных систем и термодинамических расчетов исследования показывают, что подобные системы способны обеспечить необходимую при работе ракетного двигателя механическую прочность, достаточную скорость и статическую устойчивость горения, химическую совместимость компонентов, а также энергетику на уровне жидкостных высококипящих топливных пар, сохраняя преимущества твердотопливных двигателей. С учетом того что микрогибридные ракетные двигатели на редкость безопасны в производстве и эксплуатации, их легко изготавливать с помощью современных технологий, поэтому такие ракетные двигатели рассматривают в качестве перспективного направления для дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** гибридные ракетные двигатели, микроструктурированные топливные заряды, предпусковое отверждение жидких окислителей

**Введение.** Гетерогенные конденсированные системы по определению [1] представляют собой механические смеси твердых или жидковязких горючих и окислителей. Из систем такого типа наиболее широко применяются смесевые твердые топлива (для ракетных, воздушно-реактивных и других двигателей) и пиротехнические смеси. Однако технология их производства достаточно сложна и небезопасна, поскольку для обеспечения необходимых свойств смесей требуются вводить в них большое количество компонентов разного назначения, в том числе высокоэнергетичных, а также специально для таких задач создавать оборудование [2]. Поэтому постоянно рассматриваются альтернативы этой технологии.

Известны, например, предложения использовать для производства твердотопливных зарядов аддитивные технологии [3]. Такой подход позволит использовать топливную шашку сразу после печати, минуя длительное отверждение, и потенциально обеспечивать высокую серийность производства при унификации технологии создания

различных двигателей. Тем не менее его безопасность остается под вопросом, так как в процессе печати по-прежнему предполагается смешивать энергонасыщенные компоненты и подвергать их термическому воздействию. В этом отношении более безопасно использовать гибридные двигатели, в которых топливные компоненты пространственно разделены до момента запуска двигателя. Однако известны недостатки этих систем, в основном — неполнота и неравномерность сгорания топлива, из-за которых некорректно их сравнивать с твердотопливными двигателями и сложно столь же широко применять на практике.

Для того чтобы улучшить эти свойства гибридных двигателей до определенного уровня, необходимо увеличить количество каналов и усложнить их форму [4]. В свою очередь, при использовании таких двигателей выдвигаются требования к системе подачи жидкого компонента, возрастающие по мере усложнения гидравлической схемы заряда, в том числе в связи с ростом количества каналов.

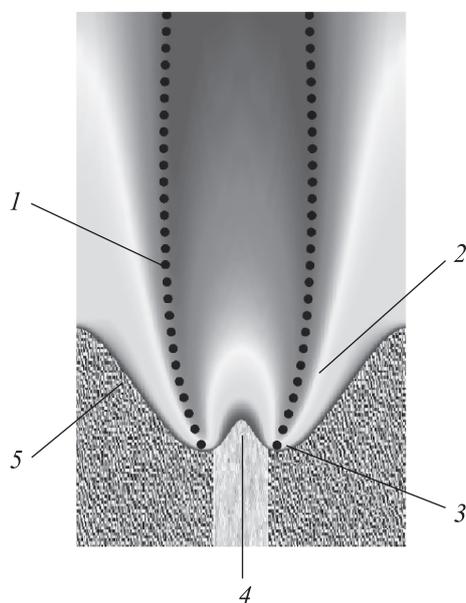
Объединить преимущества обоих подходов поможет гибридный двигатель, у которого оба компонента уже размещены в общей камере сгорания (КС). При этом изначально жидкий компонент должен быть отвержден или капсулирован во избежание неконтролируемого перетекания внутри КС. Первый вариант близок к твердотопливному двигателю раздельного снаряжения, когда пространственно разделяют твердые заряды горючего и окислителя, но существует возможность раздельного снаряжения жидким компонентом, присущая гибридным двигателям. Во втором варианте сохраняется различие фаз компонентов, но отсутствует свободное течение жидкой фазы. Для обоих вариантов такого двигателя предлагается термин «микрогибридный двигатель», отражающий сохранение силовым агрегатом свойств гибридного двигателя в малом масштабе.

Цель данной работы — определить возможные характеристики таких двигателей на основе доступных из литературы сведений об испытаниях схожих систем и термодинамических расчетов, чтобы понимать, насколько перспективно их дальнейшее исследование для повышения энергетики ракетных двигателей.

**Слоевые заряды и их горение.** Наиболее близки по геометрии и физике горения к микрогибридному двигателю слоевые заряды твердого топлива. Образцы таких зарядов, состоящие из перемежающихся слоев топлива и окислителя, представляют собой двумерный аналог смесового топлива. Их используют для модельных теоретических и экспериментальных исследований [5, 6].

При зажигании слоевого топлива процесс горения начинается с плоской поверхности, на которой затем происходит относительное выступание одного слоя над другим (рис. 1). Сравнительно медленно горящий компонент при этом выступает над поверхностью и получает

большой теплоприход, что позволяет несколько выровнять свод заряда и избавиться от микромасштабного нестационарного горения, характерного для твердых топлив.



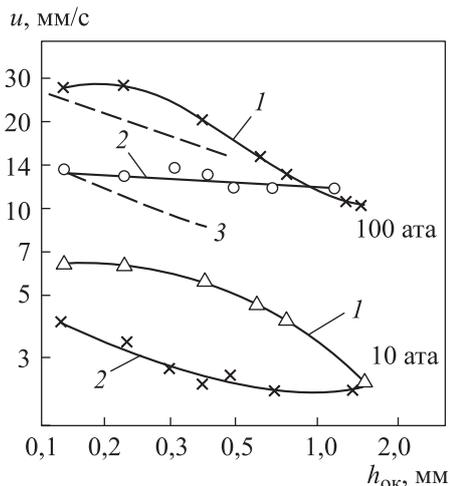
**Рис. 1.** Схема горения слоевого топлива:

- 1 — поверхность стехиометрического состава; 2 — диффузионное пламя;  
3 — точка максимальной скорости горения; 4 — выступающий слой горячего;  
5 — выступающий слой окислителя

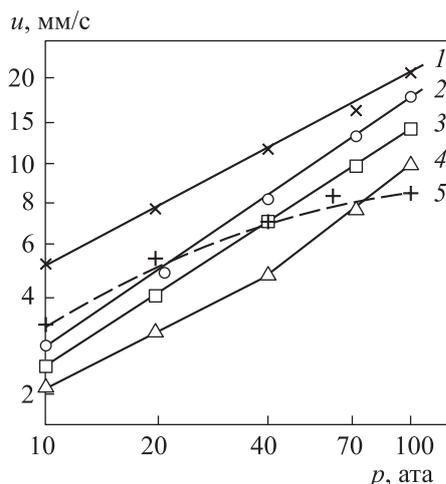
Сведения о первой аналитической модели слоевых топлив были опубликованы в 1960 г. [7]. После полувековых попыток моделирования процесса горения гетерогенных слоевых топлив [8–10] теория в основном подтвердила качественные зависимости, известные из эксперимента. До настоящего времени ни одна из двумерных моделей не продемонстрировала возможность предсказания всех или большинства важных закономерностей горения, наблюдаемых в широком диапазоне изменения параметров. Поэтому для предсказания особенностей горения микрогибридных зарядов необходимо исследовать в первую очередь результаты экспериментов с твердыми слоевыми топливами.

Большая часть экспериментальных исследований слоевых топлив [11–13] проводилась с составами, содержащими в качестве окислителя перхлорат аммония, имеющий способность к самостоятельному горению, которой не обладает подавляющее большинство потенциальных окислителей микрогибридных двигателей. Поэтому анализ необходимо основывать на немногочисленных работах [9, 14], в которых предусматривались исследования слоевых систем на основе

окислителей, не поддерживающих самостоятельного горения. Полученные в этих работах результаты показывают, что скорость горения слоевых систем монотонно увеличивается с уменьшением толщины их слоев, достигая максимума при толщине менее 0,2 мм (рис. 2). При этом горение как таковое поддерживается практически при любых толщинах, а его скорость почти не зависит от соотношения компонентов.



**Рис. 2.** Зависимость скорости горения  $u$  многослойной системы при давлении 10 ата и 100 ата от толщины слоев окислителя  $h_{ок}$ :  
 1 — перхлорат калия с полистиролом; 2 — перхлорат аммония с полиформальдегидом; 3 — перхлорат аммония с нафталином



**Рис. 3.** Зависимость скорости пламени от давления для различных окислителей при толщине слоев 0,4 мм:  
 1 — перхлорат калия с полистиролом; 2 — перхлорат калия с полиформальдегидом; 3–5 — перхлорат аммония с различными горючими

Помимо того, было показано, что зависимость скорости горения такой системы от давления является степенной, как и для смесевых твердых топлив, причем показатель степени лежит в диапазоне значений 0,6...0,9, что позволяет добиться статически устойчивого режима горения в полузамкнутом объеме КС (рис. 3). Графики рис. 2 и 3 заимствованы из [14] с сохранением шкал по осям абсцисс и ординат в исполнении авторов статьи [14].

Конкретные значения скорости горения при различных давлениях зависят от используемых топливных компонентов и толщины слоев, размера гранул и т. п. Таким образом, применение слоевых топлив позволяет настраивать скорость горения путем изменения конструкции заряда без введения химических модификаторов, широко используемых в смесевых твердых топливах. В целом скорость горения слоевых топлив выше, чем у гомогенных смесей, если размер частиц в последних соответствует толщине слоя первых [1].

По мере уменьшения размера ячейки такого заряда все большее значение приобретает диффузионное контактное горение, снижающее зависимость скорости горения от давления. Фактически, изменение размера ячейки позволяет при постоянном химическом составе изменять скорость горения и вид ее зависимости от давления.

Дополнительно следует отметить такие свойства слоевых топлив, как значительно меньшая склонность к детонации [15], поскольку критический диаметр детонации в их случае относится не к габаритным размерам заряда, а к толщине слоя взрывоопасного компонента. Поэтому, если один из компонентов слоевого топлива не взрывоопасен, потенциально можно даже использовать в качестве второго компонента вещества со сравнительно высокой чувствительностью к детонации.

**Окислители, их свойства и требования к ним.** Для обоих вышеизложенных вариантов микрогибридного двигателя — с отверждением жидкого окислителя в каналах твердого заряда горючего и с предварительным микрокапсулированием окислителя перед изготовлением заряда по технологии смесевых твердых топлив — требуется обеспечить сравнительно высокое объемное стехиометрическое соотношение горючего и окислителя, т. е. используемый окислитель должен содержать большую долю активного кислорода. Кроме того, он должен иметь высокую плотность и химическую совместимость с материалом капсулы. Желательно также незначительное изменение его плотности при фазовом переходе и колебаниях температуры в условиях эксплуатации.

Практически это ограничивает применимые окислители из числа распространенных тем перечнем, в который входят безводная азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ), диоксид азота ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ), тетранитрометан ( $\text{C}(\text{NO}_2)_4$ ) и высококонцентрированная перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Некоторые перхлораты могут быть растворены в горючих растворителях и осаждены внутри заряда твердого горючего или капсулы, но этот процесс отличается высокой технологической сложностью и не позволяет обеспечивать столь же высокое содержание активного кислорода, как у отвержденных жидких окислителей. Кроме того, перхлораты по сравнению с ними имеют существенно меньшую энергетику (перхлораты щелочных металлов) либо слишком малую стабильность, для того чтобы обеспечить продолжительный срок хранения полученного топлива (перхлораты нитрония, нитрозила) [16].

Для сравнения свойства указанных окислителей приведены в табл. 1 [17–19]. На их основе проводили оценку характеристик микрогибридных зарядов, в качестве общего горючего рассматривался состав из полиэтилена (90 %) и алюминия (10 %), отражающий полиэтиленовый заряд с алюминизацией контактных поверхностей.

Такое горючее имеет среднюю плотность  $1116 \text{ кг/м}^3$ . Расчеты термодинамических параметров горения микрогибридных зарядов проводили для идеального равновесного течения в сопле при давлении 40 бар в КС на уровне моря.

Таблица 1

## Свойства основных окислителей применительно к микрогибридным зарядам

Свойства окислителя	Окислитель				
	$\text{HNO}_3$	$\text{N}_2\text{O}_4$	$\text{C}(\text{NO}_2)_4$	$\text{H}_2\text{O}_2$ (98 %)	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$
Доля активного кислорода, %	63,5	69,5	65,3	46,0	34,0
Температура замерзания при атмосферном давлении, °С	-41,59	-11,2	13,8	-2,5	-
Плотность в твердой фазе / при +50 °С, $\text{кг/м}^3$	1657/1459	1513/1375	1637	1471/1402	1950
Эквивалентный коэффициент теплового расширения, $\text{K}^{-1}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	?	$3,07 \cdot 10^{-4}$	-
Давление пара при +25 / +50 °С, мм рт. ст.	62/213	927/2688	8,42/43,3	5/10	-
Оптимальное отношение окислителя к горючему	4,3	3,6	4,3	6	8,1
Объемное отношение окислителя к горючему	2,9/3,3	2,7/2,9	2,9	4,6/4,8	4,6
Удельный импульс, с	250,6	262,7	262,7	262	240
Температура горения, К	3159	3455	3499	2966	3007
Плотность пары, $\text{кг/м}^3$	1554/1394	1426/1318	1538	1420/1361	1858

Из литературных источников [20–22] известна совместимость рассматриваемых окислителей со следующими материалами:

- безводная азотная кислота — алюминий, нержавеющие стали, фторопласты;
- диоксид азота — алюминий, нержавеющие стали, фторопласты;
- тетранитрометан — алюминий, фторопласты;
- перекись водорода — алюминий, нержавеющие стали, ряд пластмасс, в том числе горючих.

Это позволяет сделать вывод о достаточности алюминирования контактных поверхностей для предотвращения их коррозии всеми рассматриваемыми окислителями. При этом перекись водорода можно использовать с полимерными горючими и без их алюминирования.

Для фторопластов стойкость к нитрованию обеспечивается, по заявлениям производителей, вплоть до температур +100 °С, например,

для политетрафторэтилена [23, 24], позволяя рассматривать их наряду с алюминием в качестве материала для зарядов длительного хранения.

Наряду с исследованиями долговременной совместимости материалов ряд исследований показывает, что даже при температурах +50...+60 °С обеспечивается стойкость полиэтилена к азотной кислоте концентрацией до 100 % на срок от нескольких часов до нескольких дней [25, 26]. Это дает основания предполагать стойкость полимерного заряда к заливаемому окислителю, имеющему температуру около точки замерзания, по крайней мере на время поддержания заряда при этой или более низкой температуре. Такая ограниченная стойкость не дает возможности производить заряды с длительным хранением в заправленном состоянии, но позволяет упростить технологию зарядов, заливаемых перед запуском.

Следует отметить, что совместимость тетранитрометана с полимерными материалами пока еще недостаточно исследована, но доступны сведения о том, что он совместим с большим количеством пластмасс. Известно также [27], что сверхвысокомолекулярный полиэтилен не имеет полярных групп и разрывов молекулярной цепочки, что существенно увеличивает его химическую стойкость. В сочетании с доказанным механизмом воздействия диоксида азота на полиэтилен именно благодаря этим особенностям молекулярной структуры [28] его можно считать перспективным материалом для долговременного хранения азотнокислых окислителей. Однако, к сожалению, пока он недостаточно полно исследован в этом качестве.

**Потенциальные свойства микрогибридных зарядов.** Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что энергетика микрогибридных составов с жидкими при нормальных условиях окислителями существенно превосходит обеспечиваемую перхлоратом аммония. При этом введение алюминия в состав на основе перхлората аммония вплоть до термодинамически оптимальной величины не позволяет ему сравниться по этому показателю с микрогибридными зарядами, обеспечивая рост не более чем на 6 с.

Удельный импульс топливной пары несимметричный диметилгидразин+тетраоксид диазота в этих условиях составляет 271 с, что превышает показатели микрогибридных зарядов всего на несколько секунд. При использовании эффективных окислителей можно достичь уровня удельного импульса, который в твердых топливах достигается только в случае применения октогена в качестве одного из компонентов [29]. Плотность топливной пары для микрогибридных зарядов определяется термодинамически оптимальным соотношением окислителя и горючего, тогда как температура горения и содержание конденсированной фазы в продуктах их сгорания устанавливаются непосредственно расчетным путем.

Поскольку скорость горения существенно зависит от экспериментально подбираемых толщин слоев и состава горючего, в качестве оценки достижимого диапазона скоростей горения можно принять данные из литературных источников для слоевых систем с окислителем, не способным к самостоятельному горению.

Прочность и достижимую деформацию микрогибридных зарядов можно оценить из следующих соображений. Поскольку такой заряд не содержит связующего, окислитель несет нагрузку только на сжатие, а прочность определяется только каркасом из горючего. Полиэтилен высокой плотности имеет предел прочности при растяжении 22...32 МПа [30], а его объемное содержание в заряде составляет 17...27 % для различных окислителей, поэтому предельное напряжение растяжения заряда, отнесенное к площади полиэтилена, может достигать 3,74...8,64 МПа. При этом относительное удлинение полиэтилена при разрыве колеблется в зависимости от марки в диапазоне 400...800 %, что обеспечит сравнимые характеристики заряда в целом.

Следует отметить, что коэффициент линейного теплового расширения полиэтилена составляет около  $500 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что приблизительно соответствует эквивалентным показателям жидких окислителей, а прочность стенок полиэтиленового заряда при стехиометрическом соотношении компонентов достаточна для удержания диоксида азота при температуре +50 °С, который имеет максимальное давление насыщенных паров среди рассмотренных окислителей.

Для сравнения итоговые потенциальные свойства микрогибридных зарядов и показатели смесевых твердых топлив сведены в табл. 2.

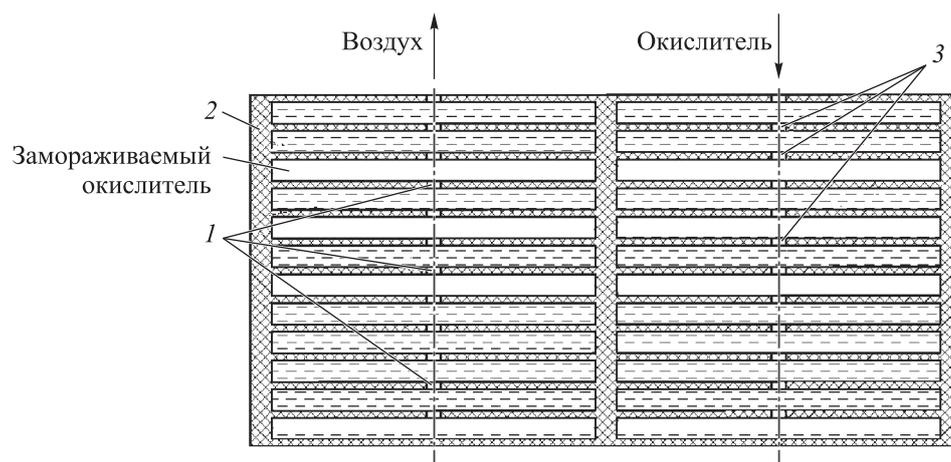
Таблица 2

**Потенциальные свойства микрогибридных зарядов и смесевые твердые ракетные топлива**

Состав и характеристики топлив и зарядов	Смесевые твердые топлива			Микрогибридные заряды
	без энергетических добавок	с энергетическими добавками	высокоплотные	
	<i>Компоненты</i>			
Перхлорат аммония	75–85	45–50	10–30	–
Октоген	–	15–25	30–50	–
Инертное связующее	18–20	9–10	–	15–20
Активное связующее	–	–	15–20	–
Алюминий	–	20–22	20–22	1–4
Жидкий окислитель	–	–	–	76–84
	<i>Характеристики</i>			
Удельный импульс, $(p/p_a = 4,0/0,1 \text{ МПа})$ , Н·с/кг	2000–2200	2500–2550	2550–2600	2450–2600
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1550–1650	1800–1850	1850–1900	1300–1600

Состав и характеристики топлив и зарядов	Смесевые твердые топлива			Микрогибридные заряды
	без энергетических добавок	с энергетическими добавками	высокоплотные	
Температура горения, К	2500–3000	3000–3500	3600–3800	2950–3500
Конденсированная фаза в выхлопе, %	< 5	15–35	15–35	< 5
Скорость горения, мм/с	5–15	5–15	5–15	2–30
Прочность, МПа	0,9–1,0	0,4–0,6	0,4–0,6	3,7–8,6
Деформация, %	70–100	30–50	30–40	400–800

**Предварительные облик и технология производства.** В смешанных твердых топливах горючая связка обеспечивает прочность заряда, будучи равномерно распределенной между зернами мелкокристаллического окислителя. Изготовление по этой технологии микрогибридных зарядов представляет сложную технологическую задачу, в которой необходимо подбирать связующее, проводить при отрицательных температурах заливку и отверждение заряда, а затем, в связи с невозможностью нанесения на окислитель инертного к нему покрытия, термостатировать заряд при температуре химической инертности. Возможны несколько вариантов построения микрогибридного заряда, различающихся размером содержащих окислитель элементов и требованиями к длительности нахождения в заправленном состоянии. Во всех этих вариантах прочность обеспечивается несущим каркасом из горючего с наполнителем из окислителя (рис. 4). Рассмотрим далее два варианта построения микрогибридного заряда.



**Рис. 4.** Схема блока микрогибридного заряда:

1 — литниковые отверстия; 2 — полимерный каркас; 3 — заправочные отверстия

В первом варианте предусматривается заправка горючего каркаса окислителем непосредственно перед запуском двигателя и последующее охлаждение до замерзания окислителя. Поскольку при работе двигателя окислитель находится в твердом состоянии, его капсулирование необязательно. При этом поверхность горючего находится в контакте с химически активным окислителем сравнительно непродолжительное время до его замерзания, что предположительно позволит выполнять ее из материала, имеющего ограниченную стойкость. Следует отметить, что ввиду низкой теплопроводности обоих компонентов охлаждение больших зарядов будет занимать длительное время.

Рассматривая толщину слоя окислителя 0,1...0,4 мм, соответствующую максимальной скорости горения (см. рис. 2), из потребного объемного соотношения окислителя к горючему (см. табл. 1) можно получить толщину слоя горючего в диапазоне 25...100 мкм для пластика и 10...50 мкм для алюминия, что соответствует пленочным структурам. Такие структуры можно организовать как слоевые (с разделительными распорками) или трубчатые, причем первый вариант значительно проще технологически. Полимерные пленки с разделительными утолщениями сначала укладываются послойно, причем так, чтобы оставались каналы для заливки окислителя и литники для выхода воздуха, а затем прошиваются поблочно полимерной нитью для обеспечения прочности на растяжение поперек слоев и на сдвиг. Готовые блоки пленок могут быть соединены в заряд склеиванием или механически с ультразвуковым контролем сплошности.

Альтернативой слоевому может стать трубчатый заряд, состоящий из склеенных между собой пучков полимерных трубок с общими коллекторами, соединяемых склеиванием или сваркой. При этом применение высококонцентрированной перекиси водорода позволяет использовать такие заряды в условиях длительного хранения в заправленном состоянии при условии предварительной пассивации. Однако перед запуском двигателя, скорее всего, потребуется охлаждение заряда до замерзания перекиси во избежание ее перетекания в полете. Окончательно необходимость предпускового термостатирования может быть определена при экспериментальных исследованиях таких зарядов.

Второй вариант — создание трубчатого заряда долговременного хранения. Такой заряд, в отличие от слоевого, принципиально позволяет выделять герметичные объемы под окислитель. Однако для него необходимо изменить материалы, контактирующие с окислителем, на совместимые с ним. При этом фторопласт как негорючий материал будет балластом для заряда, и его применение должно быть максимально ограничено. Поэтому наиболее реализуемым представляется

процесс изготовления трубок из алюминиевой фольги с полимерным связующим между ними, хотя технологически сделать такой заряд будет намного сложнее, чем для первого варианта. Принципиально возможно также алюминирование внутренней поверхности полимерных трубок.

При дальнейшей миниатюризации объемов окислителя, используемых в микрогибридном заряде долговременного хранения, происходит фактический переход к его микрокапсулированию. Проведенный анализ возможных технологий такого капсулирования показал [31], что в основном применимы следующие технологии изготовления капсул окислителя:

- «бутилирование», при котором короткие участки металлической трубки с твердым окислителем запаиваются фторопластом;
- холодное вакуумное осаждение алюминия на поверхность замороженных капель жидкого окислителя;
- разлив окислителя с последующей герметизацией в микроемкости, изготовленные трехмерной печатью.

Изготовленные капсулы собираются в заряд на клею (существуют клеи с нанотрубками, способными хорошо склеивать полиэтилен) либо механически соединяются с герметизацией стыков, после чего собранная конструкция проходит дефектоскопию.

Высокая достижимая степень миниатюризации топливных капсул позволит улучшить смешение компонентов и исключить детонацию состава при сохранении их размера ниже критического диаметра детонации. Поскольку при термоциклировании структура основы не нарушается, а требования к адгезии отсутствуют, гетерогенный заряд будет подвержен лишь химическому контактному старению. Дополнительным позитивным фактором будет то, что при механическом воздействии утечка окислителя будет происходить только из разрушенных капсул, что позволит минимизировать возможный ущерб. Существенным преимуществом микрогибридного заряда также является потенциал отказа от предстартового термостатирования, так как исключено перетекание жидкого окислителя.

**Заключение.** Микрогибридные системы, предусматривающие использование отвержденных жидких окислителей с несущим механические нагрузки полимерным горючим, имеют аналоги в виде словесных зарядов, горение которых изначально изучалось как модельное для процесса горения смесевых твердых топлив. Подобные системы обладают:

- способностью к горению без способности к детонации;
- возможностью объединения химически несовместимых в смеси компонентов;
- возможностью обеспечения соотношений компонентов, более близких к стехиометрическим, чем в твердотопливных зарядах;

– способностью настройки скорости горения и ее зависимости от давления в диапазоне  $u = 2 \dots 30$  мм/с и  $v = 0,4 \dots 1,0$ ;

– технологическим преимуществом отдельного снаряжения окислителем, в том числе в условиях полигона.

По сравнению с наиболее эффективными октогенсодержащими алюминизированными твердыми топливами микрогибридный заряд может иметь схожий удельный импульс (находящийся на уровне амилгептильных жидкостных ракетных двигателей), сопоставимую плотность заряда, на  $200 \dots 300$  °С меньшую температуру горения, большую прочность и допустимую деформацию, практически полное отсутствие конденсированной фазы и опасных веществ в выхлопе. При этом такой заряд будет значительно безопаснее твердотопливных аналогов.

Таким образом, микрогибридные гетерогенные энергонасыщенные конденсированные системы в настоящее время могут быть реализованы технологически и по оценочным значениям основных показателей пригодны для использования в ракетной технике и к тому же имеют ряд преимуществ перед традиционными системами. Все это делает перспективными продолжение исследований в данном направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. *Горение гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Наука, 1967.
- [2] Дементьева Д.И., Кононов И.С., Мамашев Р.Г., Харитонов В.А. *Введение в технологию энергонасыщенных материалов*. Бийск—Барнаул, Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009.
- [3] Курдов С.С., Заволокин В.Е., Комков М.А. Создание твердотопливных зарядов для ракетных двигателей твердого топлива с помощью аддитивных технологий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1629>
- [4] Design of Multiport Grain with Hydrogen Peroxide Hybrid Rocket. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, vol. 34 (5), pp. 1–9. DOI: 10.2514/1.B36949
- [5] Фитцджеральд М.П., Брюстер М.К. Горение слоевых топлив (обзор). 1. Экспериментальные исследования. *Физика горения и взрыва*, 2005, т. 11, № 56, с. 95–115.
- [6] Фитцджеральд М.П., Брюстер М.К. Горение слоевых топлив (обзор). 2. Теоретические исследования. *Физика горения и взрыва*, 2006, т. 42, № 1, с. 3–25.
- [7] Nachbar W. A theoretical study of the burning of a solid propellant sandwich. In: *Solid Propellant Rocket Research*. M. Summerfield, ed. (Progress in Astronautics and Rocketry Series). New York, Academic Press, 1960, vol. 1, pp. 207–226.
- [8] Fenn J.B. A phalanx flame model for the combustion of composite solid propellants. *Combust. Flame*, 1968, vol. 12, pp. 201–216.
- [9] Bakhman N.N., Librovich V.B. Flame propagation along solid fuel-solid oxidizer interface. *Combust. Flame*, 1970, vol. 15, no. 2, pp. 143–153.
- [10] Струнин В.А., Фирсов А.Н., Шкадинский К.Г., Манелис Г.Б. Закономерности гетерогенного горения. *Физика горения и взрыва*, 1989, т. 25, № 5, с. 25–32.

- [11] Fowling J. Experiments relating to the combustion of ammonium perchlorate-based propellants. *Proc. Combust. Inst.*, 1967, vol. 11, pp. 447–456.
- [12] Hightower J.D., Price E.W. Experimental studies relating to the combustion mechanism of composite propellants. *Astronaut. Acta*, 1968, vol. 14, no. 1, pp. 11–21.
- [13] Price E.W., Handley J.C., Panyam R.R., et al. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches. *AIAA Journal*, 1981, vol. 19, no. 3, pp. 380–386.
- [14] Ермолаев В.С., Коротков Л.И., Фролов Ю.В. Закономерности горения слоистых конденсированных систем. *Физика горения и взрыва*, 1970, т. 6, № 3, с. 277–285.
- [15] Митрофанов В.В. *Детонация гомогенных и гетерогенных систем*. Новосибирск, Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2003.
- [16] Андреев К.К. *Термическое разложение и горение взрывчатых веществ*. Москва, Наука, 1966.
- [17] Сарнер С. *Химия ракетных топлив*. Москва, Мир, 1969.
- [18] Tschinkel J.G. Tetranitromethane as Oxidizer in Rocket Propellants. *Ind. Eng. Chem.*, 1956, vol. 48, no. 4, pp. 732–735. <https://doi.org/10.1021/ie50556a022>
- [19] Edwards G. The vapour pressure of tetranitromethane. *Trans. Faraday Soc.*, 1952, vol. 48, art. ID 513. <https://doi.org/10.1039/TF9524800513>
- [20] Boyd W.K., Berry W.E., White E.L. *Compatibility of Materials with Rocket Propellants and Oxidizers*. Battelle Memorial Institute, Defense Metals Information Center, 1965.
- [21] Uney P.E., Fester D.A. *Material compatibility with space storable propellants. Design Guidebook*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA, 1972.
- [22] Hazardous Substance fact sheet. Tetranitromethane. *New Jersey Department of Health and Senior Services*. URL: <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1836.pdf>
- [23] Chemical Resistance of PTFE. *Habiateknofluor* URL: <https://www.habiateknofluor.se/wp-content/uploads/2020/06/Chemical-Resistance-of-PTFE-2.pdf>
- [24] Chemical resistance PTFE. *Polyfluor* URL: <https://www.polyfluor.nl/en/chemical-resistance/ptfe/>
- [25] Tisinger L.G., Carraher C.E. Nitric acid induced degradation of high density and linear medium density polyethylene: Physical property sensing techniques. In: *Geosynthetics: Microstructure and Performance*. Ian D. Peggs, ed. ASTM International, 1990, pp. 48–56.
- [26] Cagliaio M.E., Rueda D.R., Balt F.J. Degradation of nitric acid-treated bulk polyethylene: Selective removal of chain defects. *Polymer Bulletin*, 1980, vol. 3, pp. 305–310.
- [27] Stein H.L. Ultrahigh molecular weight polyethylenes (uhmwpe). In: *Engineered Materials Handbook*, 1982, pp. 167–171.
- [28] Ogihara Taeko. Oxidative degradation of polyethylene in nitrogen dioxide. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1963, vol. 36, no. 1, pp. 58–63.
- [29] Ракетное топливо. *Военный энциклопедический словарь Министерства обороны РФ*. URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=14449@morfDictionary>
- [30] Майофис И.М. *Химия диэлектриков*. Москва, Высшая школа, 1970.
- [31] Солодовник В.Д. *Микрокапсулирование*. Москва, Химия, 1980.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бечаснов П.М. Применение микрогибридных гетерогенных конденсированных систем для повышения энергетики ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2230>

**Бечаснов Павел Михайлович** — канд. техн. наук (2011), доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: [bechasnov@bmstu.ru](mailto:bechasnov@bmstu.ru)

## Application of microhybrid heterogeneous condensed systems to increase the rocket engines power

© P.M. Bechasnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper considers heterogeneous condensed systems which potentially make it possible to use highly efficient oxidizers in their composition, including those liquid. The existing technologies are unable to include them in composition of the solid rocket propellants. Placing oxidizers such as nitrogen dioxide and tetranitromethane in hermetically sealed combustible polymer capsules connected by physical or chemical means allows creating a microhybrid rocket engine. Studies based on analyzing characteristics of similar systems and thermodynamic calculations demonstrate that such systems are potentially able to ensure mechanical strength required for the rocket engine functioning, sufficient speed, combustion static stability and chemical compatibility of components, as well as power at the level of liquid high-boiling fuel vapors, while maintaining advantages of the solid fuel engines. Considering their initial higher safety in production and operation, as well as the ability to be produced by modern technologies, microhybrid rocket engines appear to be promising area of further research.*

**Keywords:** hybrid rocket engines, microstructure propellant charges, liquid oxidizer pre-curing

### REFERENCES

- [1] Bahman N.N., Belyaev A.F. *Gorenie geterogennykh kondensirovannykh sistem* [Combustion of heterogeneous condensed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967.
- [2] Dementyeva D.I., Kononov I.S., Mamashev R.G., Kharitonov V.A. *Vvedenie v tekhnologiyu energonasyshchennykh materialov* [Introduction to energy saturated materials]. Biysk–Barnaul, Altay State Technical University Publ., 2009.
- [3] Kurdov S.S., Zavalokin V.E., Komkov M.A. Sozdanie tverdotoplivnyh zaryadov dlya raketnyh dvigatelej tverdogo topliva s pomoshch'yu additivnykh tekhnologij [Manufacturing of propellant grains for solid rocket motors using additive technology]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 6.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1629>
- [4] Design of Multiport Grain with Hydrogen Peroxide Hybrid Rocket. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, vol. 34 (5), pp. 1–9.  
<https://doi.org/10.2514/1.B36949>
- [5] Fitzgerald R.P., Brewster M.Q. Gorenie sloevykh topliv (obzor). 1. Eksperimentalnye issledovaniya [Combustion of layer fuels (review). 1. Experimental study]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 95–115.
- [6] Fitzgerald R.P., Brewster M.Q. Gorenie sloevykh topliv (obzor). 2. Teoreticheskie issledovaniya [Combustion of layer fuels (review). 2. Theoretical study]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 3–25.
- [7] Nachbar W. A theoretical study of the burning of a solid propellant sandwich. In: *Solid Propellant Rocket Research*. M. Summerfield, ed. (Progress in Astronautics and Rocketry Series). New York, Academic Press, 1960, vol. 1, pp. 207–226.

- [8] Fenn J.V. A phalanx flame model for the combustion of composite solid propellants. *Combust. Flame*, 1968, vol. 12, pp. 201–216.
- [9] Bakhman N.N., Librovich V.B. Flame propagation along solid fuel-solid oxidizer interface. *Combust. Flame*, 1970, vol. 15, no. 2, pp. 143–153.
- [10] Strunin V.A., Firsov A.N., Shkadinsky K.G., Manelis G.B. Zakonomernosti geterogennogo goreniya [Regularities in heterogeneous combustion]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 5, pp. 25–32.
- [11] Fowling J. Experiments relating to the combustion of ammonium perchlorate-based propellants. *Proc. Combust. Inst.*, 1967, vol. 11, pp. 447–456.
- [12] Hightower J.D., Price E.W. Experimental studies relating to the combustion mechanism of composite propellants. *Astronaut. Acta*, 1968, vol. 14, no. 1, pp. 11–21.
- [13] Price E.W., Handley J.C., Panyam R.R., et al. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches. *AIAA Journal*, 1981, vol. 19, no. 3, pp. 380–386.
- [14] Ermolaev V.S., Korotkov L.I., Frolov Yu.V. Zakonomernosti goreniya sloevykh kondensirovannykh sistem [Regularities in the layer condensed systems combustion]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1970, vol. 6, no. 3, pp. 277–285.
- [15] Mitrofanov V.V. *Detonatsiya gomogennykh i geterogennykh sistem* [Detonation of homogeneous and heterogeneous systems]. Novosibirsk, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003.
- [16] Andreev K.K. *Termicheskoe razlozhenie i gorenje vzryvchatykh veshchestv* [Thermal decomposition and combustion of the explosive substances]. Moscow, Nauka Publ., 1966.
- [17] Sarner S. *Propellant chemistry*. New York, Reinhold Publishing, 1966 [In Russ: Sarner S. *Khimiya raketnykh topliv*. Moscow, Mir Publ., 1969].
- [18] Tschinkel J.G. Tetranitromethane as oxidizer in rocket propellants. *Ind. Eng. Chem.*, 1956, vol. 48, no. 4, pp. 732–735. <https://doi.org/10.1021/ie50556a022>
- [19] Edwards G. The vapour pressure of tetranitromethane. *Trans. Faraday Soc.*, 1952, vol. 48, art. ID 513. <https://doi.org/10.1039/TF9524800513>
- [20] Boyd W.K., Berry W.E., White E.L. *Compatibility of Materials with Rocket Propellants and Oxidizers*. Battelle Memorial Institute, Defense Metals Information Center, 1965.
- [21] Uney P.E., Fester D.A. *Material compatibility with space storable propellants. Design Guidebook*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA, 1972.
- [22] Hazardous Substance fact sheet. Tetranitromethane. *New Jersey Department of Health and Senior Services*. Available at: <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1836.pdf>
- [23] *Chemical Resistance of PTFE*. Available at: <https://www.habiateknofluor.se/wp-content/uploads/2020/06/Chemical-Resistance-of-PTFE-2.pdf>
- [24] *Chemical resistance of PTFE*. Available at: <https://www.polyfluor.nl/en/chemical-resistance/ptfe/>
- [25] Tisinger L.G., Carraher C.E. Nitric acid induced degradation of high density and linear medium density polyethylene: physical property sensing techniques. In: *Geosynthetics: microstructure and performance*. Ian D. Peggs, ed. ASTM International, 1990.
- [26] Cagiao M.E., Rueda D.R., Balt F.J. Degradation of nitric acid-treated bulk polyethylene: selective removal of chain defects. *Polymer Bulletin*, 1980, vol. 3, pp. 305–310.

- [27] Stein H.L. Ultrahigh molecular weight polyethylene (uhmwpe). *Engineered Materials Handbook*, 1982, vol. 2, pp. 167–171.
- [28] Ogihara Taeko. Oxidative degradation of polyethylene in nitrogen dioxide. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1963, vol. 36, no. 1, pp. 58–63.
- [29] Raketnoe toplivo [Rocket fuel]. *Voennyi entsikolopedicheskiy slovar Ministerstva oborony RF* [Military encyclopedic dictionary of the Ministry of Defence of the RF]. Available at:  
<https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=14449@morfdictionary>
- [30] Majofis I.M. *Khimiya dielektrikov* [Chemistry of dielectrics]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1970.
- [31] Solodovnik V.D. *Mikrokapsulirovanie* [Microencapsulation]. Moscow, Khimiya Publ., 1980.

**Bechasnov P.M.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: bechasnov@bmstu.ru