

Федеральная служба по техническому и экспортному контролю

Государственный научный центр Российской Федерации  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный научно-исследовательский институт химии и механики  
им. Д.И. Менделеева»

ISSN: 2073-6649

# БОЕПРИПАСЫ

№ 1

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
СБОРНИК

Москва  
2023



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель Редакционного Совета, главный редактор,  
генеральный директор ФГУП «ЦНИИХМ»  
д-р техн. наук, доцент, член-корреспондент РАН С.А. Бобков  
Ответственный секретарь В.В. Абрамов

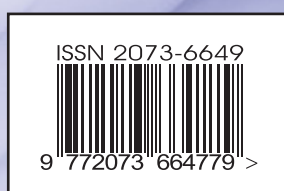
Генеральный директор АО «ФНПЦ «НИИПХ» канд. техн. наук, член-корр. РАН Н.М. Варёных  
Генеральный директор АО «НПП «Краснознамёнец» канд. техн. наук, доцент В.И. Вареница  
Генеральный директор и генеральный конструктор ФГУП «ФЦДТ «Союз»  
акад. РАН, акад. РАН, д-р техн. наук, проф. Ю.М. Милёхин  
Генеральный директор Концерна «Калашников»  
д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН В.Н. Лепин  
Заместитель генерального директора, научный руководитель –  
генеральный конструктор АО «НПО «Прибор» им. С.С. Голембиовского»  
д-р техн. наук, проф., акад. РАН О.Т. Чижевский  
Заместитель генерального директора – директор по научной работе  
и инновациям АО «КНИИМ» канд. техн. наук Н.В. Шикунов  
Ученый секретарь ФГУП «ЦНИИХМ» д-р техн. наук, проф. А.М. Аверченко  
Советник генерального директора ФГУП «ЦНИИХМ»  
д-р техн. наук, проф., акад. РАН И.Н. Торгун  
Главный специалист центра ФГУП «ЦНИИХМ» д-р техн. наук В.П. Никишов

Научно-технический сборник «Боеприпасы»  
зарегистрирован в Министерстве печати и информации Российской Федерации  
Регистрационное свидетельство: ПИ № 77-17212 от 16 января 2004 г.

В соответствии с решением Министерства обороны РФ и Федеральной службы  
по техническому и экспортному контролю от 30 марта 2009 г.  
научно-техническому сборнику «Боеприпасы» придан статус  
печатного органа Министерства обороны Российской Федерации  
по вопросам боеприпасов и специальной химии

Адрес редакции: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16А  
Телефоны: (499) 611-80-26, 616-98-22  
Факс: (499) 782-23-21  
E-mail: redaction@cniihm.ru

Электронная почта ФГУП «ЦНИИХМ»: mail@cniihm.ru  
Электронная версия сборника размещена на сайте: <https://cniihm.ru>



---

---

**СОДЕРЖАНИЕ**

---

---

<b>РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА. ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.....</b>	<b>5</b>
О КАЧЕСТВЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ .....	5
<i>Ш.Л. Гусейнов, В.А. Косых, Н.С. Гозуев</i>	
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>11</b>
<b>ЭНЕРГИЯ КОГЕЗИИ И ПАРАМЕТРЫ РАСТВОРИМОСТИ НИТРОЭФИРОВ.....</b>	<b>11</b>
<i>Д.В. Плешаков</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА <math>\Omega</math>-МОРФОЛИН-4-МЕТОКСИ-АЦЕТОФЕНОНА.....</b>	<b>14</b>
<i>Ю.А. Вейц, П.А. Донюш, С.В. Сипин, М.В. Мелентьев, И.В. Егоров</i>	
<b>КОМПОЗИТЫ АЛ/ФТОРОПЛАСТ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДЫМОВЫХ ЗАВЕС,     ОСЛАБЛЯЮЩИХ ПРОПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВИДИМОМ, ИНФРАКРАСНОМ     И МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ.....</b>	<b>18</b>
<i>Ш.Л. Гусейнов, С.Г. Федоров, А.Ю. Тузов, В.А. Ваулин, А.В. Истомин, В.В. Романов, А.В. Барышев</i>	
<b>РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОМЕХА–СИГНАЛ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ .....</b>	<b>23</b>
<i>А.В. Калитаев, П.П. Лукашов</i>	
<b>АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ АГРЕГАТОВ И СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ     И МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....</b>	<b>26</b>
<i>Н.С. Гончаров, М.А. Никифоров, А.В. Николаев, М.В. Мотова</i>	
<b>СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>29</b>
<i>М.Н. Ерофеев, М.В. Мукомела, М.В. Мотова</i>	
<b>ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ. ПИРОТЕХНИКА .....</b>	<b>32</b>
<b>КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТОВ И АЛЮМИНИЯ,     ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЪЗОВАНИЯ В БОЕВЫХ ЧАСТЯХ БОЕПРИПАСОВ И ПИРОТЕХНИКЕ.....</b>	<b>32</b>
<i>Ш.Л. Гусейнов, С.Г. Федоров, В.И. Апухтина, А.Ю. Тузов, С.А. Кондратьев, В.А. Ваулин</i>	
<b>ЭКОЛОГИЯ. УТИЛИЗАЦИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ .....</b>	<b>47</b>
<b>ФОСФОРСОДЕРЖАЩИЕ БОЕПРИПАСЫ И ИХ УТИЛИЗАЦИЯ .....</b>	<b>47</b>
<i>Н.М. Ватутин, В.В. Колтунов, А.Б. Терентьев, Д.О. Тюкин</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....</b>	<b>57</b>
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ SIMINTESCH ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АВТОНОМНОГО     ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ПЛАНИРУЮЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....</b>	<b>57</b>
<i>А.С. Дзюба, Ф.Д. Трофимов</i>	
<b>ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ .....</b>	<b>63</b>
<i>В.И. Сорокин</i>	

<b>БОЕВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ</b> .....	<b>67</b>
МАЛОРАЗМЕРНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ОБЪЕКТЫ ВЕРОЯТНОГО ПРОТИВНИКА – СОВРЕМЕННАЯ УГРОЗА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫМ ВОЕННЫМ ОБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.....	67
<i>В.А. Хорчев</i>	
<b>ПОРОХА</b> .....	<b>70</b>
О ДИВЕРСИФИКАЦИИ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПОРОХОВ И БАЛЛИСТИЧНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ.....	70
<i>В.Ю. Мелешко, А.А. Грек, Д.А. Наумов</i>	
<b>БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ</b> .....	<b>75</b>
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППЫ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ .....	75
<i>Д.В. Молдован</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ СНИЖЕНИЯ ВЫСОТЫ ДЛЯ МНОГОРОТОРНЫХ ПЛАТФОРМ....	83
<i>А.В. Палагин, А.А. Десярев</i>	
<b>СРЕДСТВА ПОРАЖЕНИЯ</b> .....	<b>87</b>
КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ЗАРЯДОВ «ЩЕТОЧНОГО» ТИПА ДЛЯ СТАРТОВЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМ БЛИЖНЕГО БОЯ.....	87
<i>Е.А. Тихонова, Т.А. Енейкина, Г.В. Игнатьев, А.Ю. Абросимов, Р.Ф. Гатина</i>	
<b>ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ</b> .....	<b>95</b>
ПЕРВЫЙ ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ ОБОРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ «ВОЕНТЕХ» .....	95
<i>К.М. Иванов</i>	
<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ</b> .....	<b>99</b>
ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКТИРУЕМЫХ РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ .....	99
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	<b>101</b>



---

---

## РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА. ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

---

---

УДК 628.1.038+663.634

### О КАЧЕСТВЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Д-р техн. наук *Ш.Л. ГУСЕЙНОВ*, канд. техн. наук *В.А. КОСЫХ*, *Н.С. ГОГУЕВ*  
(ГНЦ РФ АО «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений»)

*Ввод нового ГОСТ на дистиллированную воду создал ряд проблем для ракетных двигателей, использующих ее и высококонцентрированный пероксид водорода. Предложены решения по их устранению.*

**Ключевые слова:** КОНЦЕНТРАЦИЯ; ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ; ДИСТИЛЛЯЦИЯ; ХЛОРИД; АММИАК; УГЛЕРОД.

Дистиллированная вода (ДВ) широко применяется в различных отраслях промышленности, в том числе для производства военной техники. Например, для выполнения работ с применением высококонцентрированного пероксида водорода (ВПВ) по ГОСТ Р 50632-93 при производстве торпед и подготовке к запуску объектов ракетно-космической техники (РКТ) используют только дистиллированную воду в больших количествах. Ранее качество ДВ регулировалось требованиями ГОСТ 6709-72 [1]. Действие указанного нормативного документа на территории Российской Федерации прекратилось с 1 июля 2019 г. в связи с принятием нового ГОСТ Р 58144-2018 [2] (приказ Госстандарта от 29.05.2018 № 280-ст). Технология получения ДВ теперь предполагает использование специальной установки для очистки воды, тогда как рань-

ше для ее производства применяли перегонные аппараты (дистилляторы).

Значения физико-химических показателей ДВ по новому ГОСТ существенно отличаются от ранее предъявляемых к ней требований (см. табл. 1). В частности, значительно выше массовая доля ряда примесей, которые отрицательно влияют на показатели технологических процессов. Могут, например, возникать проблемы при разбавлении ВПВ в ходе заправки РКТ из-за изменения его физико-химических характеристик и стать причиной нештатной работы агрегатов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Кроме того, использование ДВ по ГОСТ Р 58144-2018 в работах с ВПВ потребует разработки новых аналитических методик.

Сравнительный анализ характеристик ДВ в соответствии с отмененным и новым ГОСТ, а

также с химически обессоленной водой, показывает следующее (см. табл. 1):

1. Содержание аммиака и аммониевых солей в ДВ согласно ГОСТ 58144–2018 на порядок выше, чем в ГОСТ 6709-72, а в химически обессоленной воде их содержание вовсе не определяется. Между тем аммиак и аммониевые соли являются активными субстанциями образования комплексных соединений. Поэтому их пороговое содержание в ДВ для контакта с ВПВ должно быть строго регламентировано согласно ГОСТ 6709-72.

2. Суммарная массовая концентрация нитратов и нитритов в ДВ также должна быть регламентирована согласно ГОСТ 6709-72 и ГОСТ 58144–2018. В химически обессоленной воде их содержание не определяется, что недопустимо при контакте такой воды с ВПВ, поскольку эти соединения являются химически активными компонентами.

3. Массовая концентрация хлоридов в ДВ согласно ГОСТ 58144–2018 составляет не более  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ , что в 25 раз больше, чем требование ГОСТ 6709-72, а в химически обессоленной воде их концентрация составляет  $0,12 \text{ мг/дм}^3$ . Это также недопустимо при контакте такой воды с ВПВ.

4. В химически обессоленной воде не определяют массовую концентрацию сульфатов Al, Ca, Cu, Pb, Zn, которые (кроме Al) являются катализаторами разложения ВПВ, поэтому пороговые значения их концентраций в воде, предназначенной для контакта с ВПВ, должны быть регламентированы как в ГОСТ 6709-72.

5. Водородный показатель pH воды для контакта с ВПВ должен быть ниже нейтрального, т.е. 6,6 согласно ГОСТ 6709-72.

6. Вода, предназначенная для контакта с ВПВ, не должна иметь жесткость, не допускается наличие в ней примесей кремниевой кислоты, соединений натрия, особенно, нефтепродуктов и других источников органического углерода, как было предусмотрено согласно ГОСТ 6709-72.

7. В воде, предназначенной для контакта с ВПВ, регламентируется остаток после выпаривания, т.к. этот показатель указывает на присутствие в составе воды ингредиентов, в числе которых могут находиться потенциальные катализаторы разложения ВПВ.

Таким образом, характеристики дистиллированной воды, предназначенной для контакта с ВПВ, должны соответствовать требованиям, изложенным в отмененном ГОСТ 6709-72. Это вытекает из многолетней практики и опыта работы предприятий, использующих в своих технологических процессах ВПВ, и накопленной при этом доверительной статистики.

В исключительных случаях при проведении ограниченного количества операций с ВПВ (кроме разбавления ВПВ для заправки в РН типа «Союз») в соответствии с п. 5.2.2 и 5.9 руководства по эксплуатации (РЭ) 301-02-208–2001 [3] разрешалось использовать промышленный конденсат или деминерализованную воду с характеристиками, максимально приближенными требованиям ГОСТ 6709-72, что оформлялось соответствующим стандартом (например, СТО). Такая практика имела место в Европейском космическом центре Куру при запуске ракеты-носителя «Союз».

Для выхода из ситуации, возникшей из-за отмены действия ГОСТ 6709-72, АО «ГНЦ РФ «Исследовательский центр им. Келдыша» [4] предложил при подготовке ВПВ к заправке в космическую технику и проведении аналитических работ продолжать применять ДВ, качество которой соответствует требованиям согласно ГОСТ 6709-72. С этой целью предлагается организовать разработку, согласование и внедрение стандарта организации на такую ДВ. Следовательно, необходимо продолжать получение и использование ДВ способом, обеспечивающим ее качество, в соответствии с требованиями отмененного ГОСТ 6709-72.

Более того, АО «РНЦ «Прикладная химия» – разработчик РЭ 301-02-208–2001 «Окислители на основе высококонцентрированного пероксида водорода» – выпустило извещение 46708974 от 30 декабря 2021 г. об изменении указанного РЭ, согласно п. 5.1.13 которого требуется применение при проведении технологических операций (промывка, приготовление водных растворов пероксида водорода и т.п.) ДВ, соответствующей показателям отмененного ГОСТ 6709-72.

Предложенные пути решения возникшей проблемы актуальны, поскольку ввод в действие нового ГОСТ 58144–2018 на ДВ и отмена ГОСТ 6709-72 произошли без учета последст-

**Таблица 1. Характеристики дистиллированной воды по разным стандартам**

Наименование показателя	ГОСТ 6709-72 [2]	ГОСТ Р 58144–2018 [3]	Химически обессоленная вода
Массовая концентрация аммиака и аммонийных солей, мг/дм <sup>3</sup>	0,02	Не более 0,2	Не определяют
Суммарная массовая концентрация нитратов и нитритов, мг/дм <sup>3</sup>	0,2	Не более 0,2	Не определяют
Массовая концентрация сульфатов, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	Не более 0,5	Не определяют
Массовая концентрация хлоридов, мг/дм <sup>3</sup>	0,02	Не более 0,5	0,02...0,12
Массовая концентрация алюминия, мг/дм <sup>3</sup>	0,05	Не более 0,05	Не определяют
Массовая концентрация железа, мг/дм <sup>3</sup>	0,05	Не более 0,05	0,023...0,005
Массовая концентрация кальция, мг/дм <sup>3</sup>	0,8	Не более 0,8	Не определяют
Массовая концентрация меди, мг/дм <sup>3</sup>	0,02	Не более 0,02	Не определяют
Массовая концентрация свинца, мг/дм <sup>3</sup>	0,05	Не более 0,05	Не определяют
Массовая концентрация цинка, мг/дм <sup>3</sup>	0,02	Не более 0,2	Не определяют
Массовая концентрация кислорода, восстанавливающего KMnO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,08	Розовая окраска	0,04...0,057
рН воды	5,4...6,6	От 5,0 до 7,0	6,2...7,59
Удельная электропроводность при 25 °С, См/м	5·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	0,53·10 <sup>-4</sup>
Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>	–	–	0,2
Содержание кремниевой кислоты, мкг/дм <sup>3</sup>	–	–	5,53...22,0
Содержание соединений натрия, мкг/дм <sup>3</sup>	–	–	0,6...6,6
Содержание нефтепродуктов, мг/дм <sup>3</sup>	–	Органический углерод 0,5	0,018
Массовая концентрация остатка после выпаривания, мг/дм <sup>3</sup> , не более	5	–	–

**Таблица 2. Характеристики питьевой воды**

Наименование показателя	Норматив	Метод испытания
Водородный показатель, рН	6,0...9,0	Измеряется при рН-метрии любой модели со стеклянным электродом с погрешностью измерений, не превышающей 0,1 рН
Железо (Fe), мг/дм <sup>3</sup> , не более	0,3	Согласно ГОСТ 4011
Жесткость общая, моль/м <sup>3</sup> , не более	7,0	Согласно ГОСТ 4151
Марганец (Mn), мг/дм <sup>3</sup> , не более	0,1	Согласно ГОСТ 4974
Медь (Cu <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup> , не более	1,0	Согласно ГОСТ 4388
Полифосфаты остаточные (PO <sup>3-</sup> ), мг/дм, не более	3,5	Согласно ГОСТ 18309
Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup> , не более	500	Согласно ГОСТ 4389
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup> , не более	1000	Согласно ГОСТ 18164
Хлориды (Cl <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup> , не более	350	Согласно ГОСТ 4245
Цинк (Zn <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup> , не более	5,0	Согласно ГОСТ 18293

вий этого решения для ракетно-космической техники, где сложилось достаточно твердое убеждение, что надежное функционирование двигателей ракет-носителей типа «Союз», в том числе с пилотируемыми космическими кораб-

лями, связано с использованием ДВ согласно устаревшему ГОСТ.

Остается открытым важный вопрос о получении ДВ из имеющейся исходной воды. Способ производства, обеспечивающий ее качество,

Таблица 3. Концентрация химических веществ в питьевой воде

Наименование химического вещества	Норматив	Метод испытания
Алюминий остаточный (Al), мг/дм <sup>3</sup> , не более	03	Согласно ГОСТ 18165
Бериллий (Be), мг/дм, не более	0,0002	Согласно ГОСТ 18294
Молибден (Mo), мг/дм <sup>3</sup> , не более	0,25	Согласно ГОСТ 18308
Мышьяк (As), мг/дм <sup>3</sup> , не более	0,05	Согласно ГОСТ 4152
Нитраты (NO <sub>3</sub> ), мг/дм <sup>3</sup> , не более	45,0	Согласно ГОСТ 18826
Полиакриламид остаточный, мг/дм <sup>3</sup> , не более	2,0	Согласно ГОСТ 19355
Свинец (Pb), мг/дм, не более	0,03	Согласно ГОСТ 18293
Селен (Se), мг/дм <sup>3</sup> , не более	0,01	Согласно ГОСТ 19413
Стронций (Sr), мг/дм <sup>3</sup> , не более	7,0	Согласно ГОСТ 23950
Фтор (F), мг/дм <sup>3</sup> , не более для климатических районов: I, II III IV	1,5 1,2 0,7	Согласно ГОСТ 4386

Таблица 4. Результаты измерений углеродсодержащих примесей в образцах воды

Образец	Общий углерод (ОУ), мг/дм <sup>3</sup>	Неорганический углерод (НУ), мг/дм <sup>3</sup>	Общий органический углерод (ООУ = ОУ – НУ), мг/дм <sup>3</sup>	Погрешность, %	Количество измерений ОУ	Количество измерений НУ
Вода дистиллированная	0,47	0	0,47	1,4	2	1
Вода дистиллированная 1	2,46	2,28	0,18	1,5	4	3
Вода дистиллированная 2	8,11	6,89	1,22	0,7	4	3
Вода питьевая	–	–	–	–	–	–
Вода техническая	35,21	27,82	7,66	0,8	4	4
Вода дистиллированная + Ац	126,09	0	126,09	1,1	5	2

соответствующий требованиям отмененного ГОСТ 6709-72, вызывает определенные сомнения. Механизм дистилляции хорошо известен как технологический процесс разделения заданной смеси. Качество дистиллята зависит от многих факторов: количества и природы примесей в исходной воде, возможности образования азеотропной смеси с примесями, кратности дистилляции и т.д. Возникает вопрос – из какой исходной воды можно получать дистиллированную воду с качеством, соответ-

ствующим требованиям ГОСТ 6709-72. Очевидно, что техническая вода ГОСТ 23732–2011 [5] для этой цели не пригодна, поскольку общее содержание в ней ионов натрия и калия в составе растворимых солей находится в пределах 1500 мг/л, а водородный показатель pH около 12,5. Допускается также наличие на поверхности технической воды следов (радужной пленки) нефтепродуктов, масел и жиров.

Следовательно, получение ДВ, качество которой соответствует требованиям согласно



**Таблица 5. Результаты измерений углеродсодержащих примесей в образцах штатного ВПВ**

Образец	Общий углерод (ОУ), мг/дм <sup>3</sup>	Неорганический углерод (НУ), мг/дм <sup>3</sup>	Общий органический углерод (ООУ = ОУ – НУ), мг/дм <sup>3</sup>	СКО, %	Количество измерений ОУ/НУ	Разбавление
ПВ-85 (24.11.2021)	0,35	0,35	0	1,1	3/1	1
ПВ-85 (15.02.2021)	0,56	0,56	0	0,2	3/1	1
ПВ-85 из куба ООО «Синтез ПВ»	0,24	0,24	0	0,8	3/1	1
ПВ-85 из куба ООО «Синтез ПВ»	0,15	0,15	0	0,9	3/1	1
ПВ-85 из 401/2 ООО «Синтез ПВ»	0,39	0,39	0	0,1	3/1	1

ГОСТ 6709-72, возможно из питьевой воды, состав и свойства которой определяются согласно ГОСТ 2874-82 [6]. Концентрации химических веществ, влияющих на органолептические свойства питьевой воды, встречающихся в природных водах или добавляемых к воде в процессе ее обработки, не должны превышать следующих значений (табл. 2):

для водопроводов, подающих воду без специальной обработки по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы, допускается сухой остаток до 1500 мг/дм<sup>3</sup>, общая жесткость до 10 моль/м<sup>3</sup>, железо до 1 мг/дм<sup>3</sup>, марганец до 0,5 мг/дм<sup>3</sup>;

сумма концентраций хлоридов и сульфатов, выраженных в долях предельно допустимых концентраций каждого из этих веществ в отдельности, не должна быть более 1;

концентрация химических веществ, встречающихся в природных водах или добавляемых к воде в процессе ее обработки, не должна превышать значений, приведенных в табл. 3.

Анализ характеристик питьевой воды показывает, что в ней присутствует органический углерод в виде полиакриламида в количестве 2 мг/дм<sup>3</sup>. Нет свидетельств о том, что в процессе дистилляции концентрацию этой примеси можно довести до уровня требований согласно

ГОСТ 6709-72, т.е. практически до нуля. По крайней мере, требование о концентрации неорганического или органического углерода здесь отсутствует, нет даже требования «Отсутствие». Это указывает на то, что данный параметр при разработке ГОСТ 6709-72 не рассматривался.

Означает ли это обстоятельство, что в ДВ, получаемой из питьевой воды, примеси органического углерода отсутствуют? Для ответа на данный вопрос в ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС» был проведен анализ образцов ДВ, а также различных образцов ВПВ на наличие в них неорганического и органического углерода.

Для опыта использовали анализатор углерода «ТОПАЗ С», который предназначен для измерения в воде массовой концентрации общего углерода (в составе углерода органических соединений, а также всех форм неорганического углерода, включая карбонаты, бикарбонаты, цианиды, цианаты, тиоцианаты, окись и двуокись углерода и элементарный углерод). С помощью данного анализатора определение общего углерода производят с использованием детектора инфракрасного излучения. Согласно ГОСТ Р 52991–2008 (ИСО 8245–1999) отдельно определяют содержания общего углерода и общего неорганического углерода с последующим вычислением содержания общего органического

углерода по разности между содержанием общего углерода и содержанием неорганического углерода, либо непосредственное определение общего органического углерода.

Диапазон измерений массовой концентрации общего, неорганического и органического углерода в воде (без разбавления пробы) составляет от 1,0 до 100 мг/дм<sup>3</sup>. Определение концентраций содержания углерода от 0,1 мг/дм<sup>3</sup> в растворах обеспечивается применением высокоочищенной деионизованной воды с показателем удельного электрического сопротивления до 18,2 МОм·см при 20 °С, полученной на аппарате Аквалаб AL-1 Plus.

Результаты измерений приведены в табл. 4 и 5.

Как следует из данных табл. 4, ДВ, полученная из питьевой воды, содержит от 0,47 мг/дм<sup>3</sup> до 1,22 мг/дм<sup>3</sup> углерода, что не соответствует требованиям отмененного ГОСТ 6709-72, т.е. процесс очистки питьевой воды не позволяет снизить величину этого параметра в дистилляте до нуля. Для подтверждения достоверности полученных результатов в ДВ добавляли заданное количество ацетона (125 мг/дм<sup>3</sup>), после чего определяли содержание углерода. Результат в пределах погрешности прибора соответствовал количеству добавленного ацетона.

Из результатов измерения содержания углерода в образцах отечественного высококонцентрированного пероксида водорода марки ПВ-85, приведенных в табл. 5, следует, что во всех образцах ВПВ органический углерод отсутствует,

однако общий (очевидно, неорганический) углерод присутствует. Вероятно, это связано с тем, что при хранении ВПВ длительное время в частично открытых емкостях происходит умеренное поглощение атмосферного углекислого газа.

## ВЫВОД

ДВ, полученная из питьевой воды, содержит примеси органического углерода. Необходимо разработать метод ее очистки от примесей органического углерода, либо внести изменения в соответствующую конструкторскую документацию на РКТ по использованию ДВ согласно ГОСТ 58144-2018.

## СПИЛОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. 1972.
2. ГОСТ Р 58144-2018. Вода дистиллированная. Технические условия. 2018.
3. РЭ 301-02-208-2001. Окислители на основе высококонцентрированного пероксида водорода. 2001.
4. Письмо АО «ГНЦ «Центр Келдыша» от 15.02.2022 № 5-05/164.
5. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. 2011.
6. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль качества. 1982.



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 661.726

ЭНЕРГИЯ КОГЕЗИИ  
И ПАРАМЕТРЫ РАСТВОРИМОСТИ НИТРОЭФИРОВ

Канд. хим. наук Д.В. ПЛЕШАКОВ

(ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»)

Оцениваются энергия когезии и параметры растворимости нитроглицерина, тетранитрата эритрита, гексанитрата сорбитола, динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля. Показано, что энергия концевых групп  $-O-NO_2$  составляет  $30772,0...37052,0$  Дж/моль. Энергия когезии средних групп  $-O-NO_2$  нитроглицерина, тетранитрата эритрита и гексанитрата сорбитола значительно меньше и составляет  $7705,0$  Дж/моль. Оценка параметров растворимости нитроэфиров показала, что величина  $\delta$  изменяется в диапазоне от  $19,9$  до  $24,0$   $(МДж/м^3)^{1/2}$ . Поэтому в качестве полимерной основы связующих, содержащих нитроэфиры, можно рекомендовать полиметилметакрилат ( $\delta = 20,0...21,3$ ), нитрат целлюлозы ( $\delta = 21,5...23,5$ ) или полиакрилонитрил ( $\delta = 25,6...31,5$ ).

**Ключевые слова:** НИТРОГЛИЦЕРИН; КОГЕЗИЯ; РАСТВОРИМОСТЬ; ТЕТРАНИТРАТ ЭРИТРИТА; НИТРАТ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ; ЭНЕРГИЯ КОНЦЕВЫХ ГРУПП.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена оценке энергии когезии и параметров растворимости нитроглицерина, тетранитрата эритрита, гексанитрата сорбитола, динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля. Для определения энергии когезии нитроэфира справедлива формула:

$$\Delta H_{исп} = RT + \Delta E = RT + n\Delta E_{cp} + l\Delta E_{кон}, \quad (1)$$

где  $\Delta H_{исп}$  – энтальпия испарения;  $\Delta E$  – энергия когезии нитроэфира;  $R$  – универсальная газовая

постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $n$  – количество средних групп  $-O-NO_2$  в молекуле нитроэфира;  $l$  – количество концевых групп  $-O-NO_2$  в молекуле нитроэфира;  $\Delta E_{cp}$  – энергия когезии средней группы в молекуле нитроэфира;  $\Delta E_{кон}$  – энергия когезии концевой группы в молекуле нитроэфира.

Для оценки параметров растворимости нитроэфиров использовалось уравнение:

$$\delta = (\Delta E/V_1)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $V_1$  – молярный объем нитроэфира [1].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе для измерения давления насыщенного пара тетранитрата эритрита и гексанитрата сорбитола был использован метод, основанный на модифицированном уравнении Ленгмюра. Применяли модуль термогравиметрического анализа (TGA фирмы Mettler) и уравнение, предложенное Фангом [2]. В нем  $p$ ,  $M$ ,  $m$ ,  $t$  – давление насыщенного пара нитроэфир, молекулярная масса нитроэфир, масса образца и время эксперимента соответственно. Индекс  $S$  относится к изучаемому образцу, индекс  $R$  к эталону:

$$p_S = p_R \sqrt{\frac{M_R \left( \frac{dm}{dt} \right)_S}{M_S \left( \frac{dm}{dt} \right)_R}}$$

В качестве эталона использовали динитрат диэтиленгликоля [3, 4].

Ранее в работе [3] для измерения давления насыщенного пара нитроглицерина, динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля использовали динамический метод, основанный на измерении содержания пластификатора в паровой фазе, находящейся в равновесии с изучаемым раствором. Отличительной особенностью этого метода было применение модифицирован-

Таблица 1. Давление насыщенного пара нитроэфиров, Па

Температура, °С	Нитроглицерин	Тетранитрат эритрита	Гексанитрат сорбитола	Динитрат диэтиленгликоля	Динитрат триэтиленгликоля
20	0,058	–	–	0,39	0,040
30	0,17	–	–	0,92	0,11
40	0,49	–	–	2,16	0,31
50	1,16	–	–	4,26	0,69
60	2,86	–	0,1082	9,03	1,72
70	–	0,4493	0,2640	–	–
80	–	1,0235	0,4444	–	–
90	–	2,2281	2,4088	–	–
100	–	4,6524	–	–	–

Таблица 2. Энтальпия испарения нитроэфиров

Нитроэфир	Энтальпия испарения, кДж/моль
Нитроглицерин	79,09
Тетранитрат эритрита	82,91
Гексанитрат сорбитола	98,32
Динитрат диэтиленгликоля	63,98
Динитрат триэтиленгликоля	76,54

Таблица 3. Параметры растворимости и энергия когезии средних и концевых групп –O–NO<sub>2</sub> нитроэфиров

Нитроэфир	Энергия когезии средних групп, Дж/моль	Энергия когезии концевых групп, Дж/моль	Параметр растворимости, (МДж/м <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
Нитроглицерин	7705,0	34474,5	24,0
Тетранитрат эритрита	7705,0	32532,0	21,3
Гексанитрат сорбитола	7705,0	32532,0	19,9
Динитрат диэтиленгликоля	–	30772,0	20,9
Динитрат триэтиленгликоля	–	37052,0	20,3

ного газового хроматографа (модель «Хром-5» с пламенно-ионизационным детектором) для количественного анализа паровой фазы. Это позволило сократить время эксперимента и избежать ошибок, связанных с изменением состава раствора в процессе измерений. Концентрацию  $c$  и парциальное давление пластификатора  $p$  рассчитывали по формулам:

$$c = (m/w\tau)(1 + \Delta p/p_a)(T_g/T_e); p = cRT_e,$$

где  $m$  – масса компонента, рассчитанная по площади хроматографического пика;  $w$  – объемная скорость газа носителя, усредненная по результатам измерений в начале и конце эксперимента;  $\tau$  – время газовой экстракции;  $T_g$  – температура газа-носителя, поступающего в хроматограф;  $T_e$  – температура образца и газа-носителя в экстракторе;  $\Delta p$  – перепад давления в колонке хроматографа;  $p_a$  – атмосферное давление. Полученные результаты приведены в работах [3, 4].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные о давлении насыщенного пара и энтальпии испарения нитроглицерина, тетранитрата эритрита, гексанитрата сорбитола, динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля представлены в табл.1 и 2.

Уравнение (1) для нитроглицерина можно записать в виде:

$$\Delta H_{исп} = RT + 2 \cdot \Delta E_{кон} + \Delta E_{ср}.$$

Для тетранитрата эритрита и гексанитрата сорбитола уравнение (1) примет следующий вид:

$$\Delta H_{исп} = RT + 2 \cdot \Delta E_{кон} + 2 \cdot \Delta E_{ср};$$

$$\Delta H_{исп} = RT + 2 \cdot \Delta E_{кон} + 4 \cdot \Delta E_{ср}.$$

Для динитрата диэтиленгликоля и динитрата триэтиленгликоля:

$$\Delta H_{исп} = RT + 2 \cdot \Delta E_{кон}.$$

Считая, что энергия когезии средних групп нитроглицерина тетранитрата эритрита и гекса-

нитрата сорбитола одинакова, после несложных преобразований получим результаты, представленные в табл. 3.

Результаты, представленные в табл. 2 и 3, рассчитаны для  $t = 20$  °С. Для тетранитрата эритрита и гексанитрата сорбитола такая температура соответствует переохлажденному расплаву.

Из табл. 3 следует, что энергия когезии концевых групп –O–NO<sub>2</sub> нитроэфиров в 4,0–4,8 раза выше, чем энергия когезии средних групп. Таким образом, именно концевые группы определяют когезионное взаимодействие нитроэфиров. Отметим, что на возможность концевых групп нитроглицерина и динитрата диэтиленгликоля образовывать водородные связи указывалось в работах [5–7].

Параметры растворимости нитроэфиров были рассчитаны согласно уравнению (2). Величина  $\delta$  изменяется в диапазоне от 19,9 до 24,0 (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup> (см. табл. 3). Поэтому в качестве полимерной основы связующих, содержащих нитроэфиры, можно рекомендовать полиметилметакрилат ( $\delta = 20,0...21,3$ ), нитрат целлюлозы ( $\delta = 21,5...23,5$ ) или полиакрилонитрил ( $\delta = 25,6...31,5$ ) [8].

### ВЫВОДЫ

Показано, что энергия концевых групп –O–NO<sub>2</sub> составляет 30772,0...37052,0 Дж/моль. Энергия когезии средних групп –O–NO<sub>2</sub> нитроглицерина, тетранитрата эритрита и гексанитрата сорбитола значительно меньше и составляет 7705,0 Дж/моль. Таким образом, именно концевые группы определяют когезионное взаимодействие нитроэфиров.

Оценка параметров растворимости нитроэфиров показала, что величина  $\delta$  изменяется в диапазоне от 19,9 до 24,0 (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup>. Поэтому в качестве полимерной основы связующих, содержащих нитроэфиры, можно рекомендовать полярные полимеры: полиметилметакрилат ( $\delta = 20,0...21,3$ ), нитрат целлюлозы ( $\delta = 21,5...23,5$ ) или полиакрилонитрил ( $\delta = 25,6...31,5$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarep A.A. Физикохимия полимеров. М.: Химия, 1978.
2. Phang P., Dollimore S.J., Evans S.J. A comparative method for developing vapor pressure curves based on evaporation data

obtained from a simultaneous TG-DTA unit // *Thermochim. Acta*. 2002. Vol. 392–393. P. 119.

3. Solvation effects and thermodynamics plasticization of cellulose nitrates / D.V. Pleshakov [et al.] // *Polymer Science*. 1999. Vol. 41. P. 364.

4. Pleshakov D.V., Lotmentsev Yu.M. Prediction of thermodynamic conditions for nitroesters vapor condensation on the surface of process apparatus during the production of energetic materials // *Proc. 7<sup>th</sup> International seminar «New trend in research of energetic materials»*. Czech Republic. 2004. P. 591.

5. Dubar J. Contribution a l' etude des interaction entre les nitrocelluloses et la nitroglycerine avec divers solvents. Deuxieme These. Paris: University de Paris, 1969.

6. Лотменцев Ю.М. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1978.

7. Lotmentsev Yu.M., Pleshakov D.V. Phase state of nitrocelluloses plasticized with trinitroglycerin // *Propellant, Explosives, Pyrotechnics*. 1997. Vol. 22. P. 203.

8. Энциклопедия полимеров / В.А. Каргин [и др.]. М.: Советская Энциклопедия, 1972. Т. 1. С. 1224.



УДК 54.057

## ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ω-МОРФОЛИН-4-МЕТОКСИ-АЦЕТОФЕНОНА

Канд. хим. наук Ю.А. ВЕЙЦ, П.А. ДОНЮШ (ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»), канд. хим. наук С.В. СИПИН (ФГУП «Научный центр «Сигнал»), канд. техн. наук М.В. МЕЛЕНТЬЕВ, канд. техн. наук И.В. ЕГОРОВ (ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»)

*Представлены результаты экспериментального получения ω-морфолин-4-метокси-ацетофенона в кристаллическом виде в результате трехстадийной синтетической последовательности с применением анизола в качестве исходного соединения. Усовершенствованы методики бромирования ароматического кетона и нуклеофильного замещения галогена при α-атоме. Структура полученного продукта подтверждена методом ядерного магнитного резонанса. Продукт может найти практическое применение в военной медицине или в качестве биорегулятора.*

**Ключевые слова:** АЛЬФА-ГАЛОГЕНКАРБОНИЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ; АЦИЛИРОВАНИЕ; КИСЛОТА ЛЬЮИСА; МОРФОЛИН; ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС.

### ВВЕДЕНИЕ

Альфа-галогенкарбонильные соединения широко используются в органическом синтезе. Эта группа веществ имеет очень большое значение в химии гетероциклических соединений. Можно привести такие примеры, как синтез индолов согласно Бишлеру–Мёлау, фуранов и пирролов согласно Ганчу [1], а также тиазолов, ядро которых входит во многие лекарственные препараты [2].

Кроме того, α-галогенкарбонильные соединения используются в реакциях нуклео-

фильного замещения, поскольку атом галогена очень подвижен, в 10 тыс. раз подвижней, чем в алифатических аналогах [3]. В 1940-х гг. группой американских учёных было показано, что при замещении атома брома в фенацилбромидах на различные амины и восстановлении кето-группы полученные аминспирты обладают противомаларийной активностью [4].

В исследовании авторами был изучен трехстадийный синтез аминокетона, не описанного в литературе, и проведено подтверждение его строения методом ядерного магнитного резонанса.

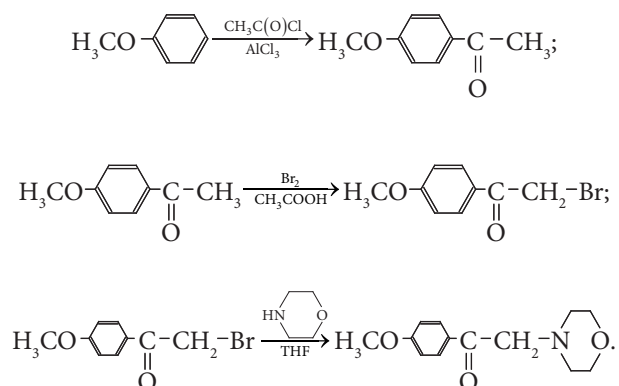
нанса (ЯМР). Подобные вещества уже давно не применяются для профилактики и лечения малярии, однако полученное вещество может представлять интерес в биохимических, химиотерапевтических (профилактических) и других направлениях исследования.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках данного исследования был осуществлен синтез ω-морфолин-4-метокси-ацетофенона с использованием трехстадийной синтетической последовательности. В качестве исходного соединения использовался анизол.

При анализе литературы был выбран не совсем стандартный подход к синтезу соответствующего α-галогенкарбонильного соединения – ω-бром-4-метокси-ацетофенона. В классической литературе [5] предложен синтез данного вещества из анизола и бромацетилбромида. Однако, как было показано в работе [6], при ацилировании ароматических соединений данным реагентом увеличивается доля орто-изомера, что снижает выход. Поэтому синтез фенацилбромида был проведен стандартным способом.

Для синтеза ω-морфолин-4-метокси-ацетофенона была выбрана трехстадийная последовательность, приведенная ниже:



На первой стадии синтеза был получен ароматический кетон – 4-метокси-ацетофенон. Этот этап оказался наиболее трудоемким в исследовании. Ацилирование проводилось в соответствии со стандартной методикой [7]. Согласно методике [7], синтез проводят при взаимодействии анизола с

ацетилхлоридом в тетрахлорметане. В качестве кислоты Льюиса использовался AlCl<sub>3</sub>, предварительно растертый в ступке для снятия пленки оксогалогенидов. После проведения реакции образовывался раствор комплекса хлорида алюминия с ароматическим кетоном кроваво-красного цвета. В методике было указано, что до проведения дальнейших операций смесь нужно оставить на несколько дней. В итоге, после вакуумной перегонки выход продукта составил несколько процентов. Вероятно, это было связано именно с тем, что смесь находилась в состоянии покоя длительный промежуток времени. Так как в реакционной смеси образовалась кислая среда (из-за образования HCl), то были созданы благоприятные условия для альдольной конденсации [8], которая в кислой среде протекает медленно.

При повторном проведении ацилирования смесь была оставлена на день и после перегонки получен 4-метокси-ацетофенон с выходом 83% в виде бесцветной жидкости с характерным запахом. Несмотря на табличную температуру плавления в 37...38 °С, полученное соединение оставалось жидким и закристаллизовалось лишь во время ввода его в следующую стадию. Это свидетельствует о высокой чистоте синтезированного кетона. Экспериментально определенная температура кипения при давлении 31...32 мм рт. ст. соответствовала значениям, определенным согласно номограмме [7].

На второй стадии было проведено бромирование полученного 4-метокси-ацетофенона, основываясь на методике, описанной в работах [4, 9]. В качестве растворителя был использован диэтиловый эфир. Бромирование проводилось в присутствии двукратного количества уксусной кислоты, использовавшейся в качестве катализатора. Как уже было отмечено ранее, щелочь для этой цели использовать крайне нежелательно, поскольку продолжается дальнейшее галогенирование, не говоря уже о возможной альдольной конденсации субстрата.

После проведения реакции необходимо было выделить ω-бром-4-метокси-ацетофенон из полученного эфирного раствора. В работе [4] было предложено для этого два пути. В первом случае при охлаждении эфирного раствора до температуры 0...5 °С образовавшийся осадок нужно промыть водой, высушить на воздухе и

перекристаллизовать из подходящего растворителя (обычно этанола). Если осадок не выпадал, то раствор нужно промыть водой, раствором кальцинированной соды, высушить над прокаленным сульфатом натрия и сконцентрировать. Далее продукт образуется либо в виде масла, либо в виде осадка.

В данном случае реакционная смесь была перелита в стакан с ледяной водой. Через некоторое время начал выпадать осадок и, кроме этого, возникали похожие на масло капли. После продолжительного трения стеклянной палочкой о стенки стакана закристаллизовалась значительная масса вещества, масла в растворе не осталось. После фильтрования и высушивания на воздухе  $\omega$ -бром-4-метокси-ацетофенон был получен с выходом 56% в виде белого кристаллического вещества.

Следует отметить, что работать с фенацилбромидом нужно очень осторожно, поскольку они являются лакриматорами.

Заключительная стадия работы – нуклеофильное замещение атома галогена на морфолин. Морфолин представляет собой гетероциклический вторичный амин и является хорошим нуклеофилом.

Реакция бимолекулярного нуклеофильного замещения проводилась в соответствии с методикой, описанной в работах [4, 10]. В качестве растворителя использовался тетрагидрофуран (ТГФ) – стандартный апротонный растворитель, не уменьшающий силу нуклеофильного агента. Морфолин был взят в 2,5-эквивалентном количестве для связывания образующегося  $\text{HBr}$ . Однако был изменен порядок внесения реагентов: к избытку амина прибавлялся по каплям раствор фенацилбромида в ТГФ. Это имеет существенные преимущества, поскольку можно избежать возможного образования четвертичной аммониевой соли. На ожидаемое протекание реакции указывало образование осадка гидробромида морфолина и заметное разогревание смеси. Осадок гидробромида был отфильтрован, высушен и взвешен, выход составил 90%.

Выделение конечного  $\omega$ -морфолин-4-метокси-ацетофенона проводилось по такой же схеме, как и выделение фенацилбромида. Продукт был выделен в виде белых кристаллов иглообразной формы.

Полученное соединение не описано в литературе. Подтверждение структуры  $\omega$ -морфолин-4-метокси-ацетофенона проводилось ЯМР-спектроскопией ( $\text{DMSO} - d_6$ ) на ядрах  $^1\text{H}$ .

В спектре ЯМР  $^1\text{H}$  полученного соединения присутствуют следующие сигналы:

синглет при м. д. 3,84 интегральной интенсивности 3H, свидетельствующий о наличии в молекуле метокси-группы;

синглет при м. д. 3,75 интегральной интенсивности 2H, соответствующий двум протонам при  $\alpha$ -углеродном атоме;

два триплета при м. д. 3,57 и 2,67 интегральной интенсивности 4H, соответствующие протонам в цикле морфолина;

два дублета при м. д. 7,97 и 7,03 интегральной интенсивности 2H, соответствующие протонам бензольного кольца.

На основе полученных спектральных данных можно утверждать, что структура соответствует  $\omega$ -морфолин-4-метокси-ацетофенону, и синтез проведен успешно.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все опыты проводили в абсолютных растворителях, очищенных согласно стандартным методикам. Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  получены на приборе Bruker WM-250 (250 МГц); химические сдвиги приведены относительно тетраметилсилана (ТМС) (внутренний стандарт); отнесение сигналов протонов проведено на основе данных двойного магнитного резонанса.

**Получение 4-метокси-ацетофенона [7].** В колбу помещают 14 г (0,105 моль) безводного  $\text{AlCl}_3$ , добавляют 60 мл  $\text{CCl}_4$ , перемешивают 10 мин, охлаждают в бане со льдом и при сильном перемешивании медленно прикапывают 8,6 г (0,109 моль) ацетилхлорида, а затем при охлаждении льдом с солью (0...5 °С) прикапывают 10 г (0,0926 моль) анизола. Реакционную смесь нагревают до комнатной температуры, перемешивают в течение часа и оставляют на ночь. Затем осторожно выливают в смесь 150 мл 2 М раствора  $\text{HCl}$  и 100 г льда. Тяжелый органический слой отделяют, промывают 2 М раствором  $\text{HCl}$  (2×25 мл), 1 М раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (2×25 мл) и водой. Растворитель отгоняют на роторном испарителе. Остаток перегоняют в вакууме. Получают



бесцветную жидкость с характерным ароматом, затвердевающую в беловатые кристаллы, массой 10,12 г (83%),  $T_{\text{кип}} = 158...159$  °С (при 31...32 мм рт. ст.). Данные номограммы  $T_{\text{кип}} = 156...157$  °С. Вещество используют на следующей стадии.

**Получение ω-бром-4-метокси-ацетофенона [4].** К раствору массой 10,12 г (0,0673 моль) 4-метокси-ацетофенона в 30 мл диэтилового эфира при перемешивании добавляют по каплям раствор 3,34 мл брома (0,0673 моль) в двукратном по объему количестве уксусной кислоты при температуре 10...20 °С, следя за обесцвечиванием смеси. После обесцвечивания реакционной массы, которое происходит с вводом последней порции брома, ее охлаждают до комнатной температуры и осторожно выливают в стакан с ледяной водой. Через некоторое время вещество выпадает (если в воде масло, следует затереть его стеклянной палочкой). Фильтруют вещество на стеклянном фильтре и сушат на воздухе. При необходимости можно перекристаллизовать его из этилового спирта. Получают 8,5 г (56%) белого кристаллического вещества. Его  $T_{\text{пл}} = 69...71$  °С (согласно литературным данным  $T_{\text{пл}} = 70...71$  °С). Посуду тщательно промывают раствором щелочи.

**Получение ω-морфолин-4-метокси-ацетофенона [4].** К раствору объемом 8 мл (0,0925 моль) морфолина, взятого в 2,5-кратном избытке, в 10 мл ТГФ при перемешивании добавляют по каплям раствор 8,5 г (0,037 моль) фенацилбромида в 30 мл ТГФ, поддерживая температуру смеси на уровне комнатной. После этого перемешивают смесь в течение часа. Отфильтровывают осадок гидробромида морфолина, собирают фильтрат и отгоняют растворитель и непрореагировавший морфолин на роторном испарителе. Перекристаллизовывают продукт из этилового спирта. Получают белые иглообразные кристаллы. Выход 8,7 г (90%).

Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  (ДМСО,  $D_6$ ): 2,67 (4H, т), 3,57 (4H, т), 3,75 (2H, с), 3,84 (3H, с), 7,03 (2H, д), 7,97 (2H, д).

## ВЫВОДЫ

1. ω-морфолин-4-метокси-ацетофенон получен в кристаллическом виде в результате трехстадийной синтетической последовательности с применением анизола в качестве исходного соединения.

2. Дополнены и улучшены описанные в литературе методики бромирования ароматического кетона и нуклеофильного замещения галогена при α-атоме.

3. Структура ω-морфолин-4-метокси-ацетофенона была подтверждена методом ЯМР.

4. Полученный продукт может найти практическое применение в военной медицине, а также представляет большой интерес в качестве биорегулятора или структурообразующего материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли Дж. Дж. Именные реакции. Механизмы органических реакций. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
2. Hantzsch // Ber. Dtsch. Chem. Ges. 1887. Vol. 20. P. 3118.
3. Сайкс П. Механизмы реакций в органической химии. М.: Химия, 2000. С. 17–35.
4. Journal of Organic Chemistry. 1947. Vol. 12. P. 617–703.
5. Бейльштейн Ф.Ф. Справочник по органической химии. Hamburg, LV. 1881. Vol. 8. P. 89.
6. Кери Ф., Сандберг Р. Углубленный курс органической химии. Кн. 2: Реакции и синтезы. М.: Химия, 1981. С. 228–240.
7. Практикум по органической химии / В.И. Теренин [и др.]. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. С. 282–283.
8. Смит В.А., Дильман А.Д. Основы современного органического синтеза. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. С. 203–232.
9. Boesekin, Hansen and Burckhard // Rec. Trav. Chem. 1915. Vol. 35. P. 311.
10. Mason and Ros // J. Am. Chem. Soc. 1940. Vol. 62. P. 2882.



УДК 623.451 + 536.46

# КОМПОЗИТЫ АІ/ФТОРОПЛАСТ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДЫМОВЫХ ЗАВЕС, ОСЛАБЛЯЮЩИХ ПРОПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВИДИМОМ, ИНФРАКРАСНОМ И МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Д-р техн. наук Ш.Л. ГУСЕЙНОВ, канд. хим. наук С.Г. ФЕДОРОВ, А.Ю. ТУЗОВ, В.А. ВАУЛИН  
(ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»),  
А.В. ИСТОМИН, В.В. РОМАНОВ, А.В. БАРЫШЕВ (АО «Институт прикладной физики»)

*Исследована возможность создания дымовых завес, ослабляющих электромагнитное излучение в видимом, инфракрасном и миллиметровом диапазонах, в результате образования графеновых структур в процессе горения пленок и композитов на основе микронных частиц алюминия и фторопласта.*

**Ключевые слова:** ФТОРОПЛАСТ; АЭРОЗОЛЬНОЕ ОБЛАКО; КОМПОЗИТ; МАКЕТ; УГЛЕРОД; ГРАФЕН.

## ВВЕДЕНИЕ

Конструкция головок самонаведения ракет различного класса постоянно совершенствуется, поэтому активно ведутся исследования по разработке композиций, создающих при горении аэрозольные образования, непрозрачные в видимом, инфракрасном (ИК) или миллиметровом диапазонах (МД) длин волн. Особенно это касается композиций, способных одновременно создавать существенное ослабление пропускания одновременно в видимой и ИК областях спектра и дополнительно в радиолокационном диапазоне спектра.

В последние годы в КНР проводятся работы по использованию разных форм углерода в качестве порошкового маскирующего состава, создающего при распылении в воздухе аэрозольную завесу, ослабляющую пропускание одновременно электромагнитных волн в видимом, ИК и миллиметровом диапазонах. Исследовано действие дымовых завес, образованных диспергированием угольных волокон (УВ) разного размера [1–4] в дальнем ИК и миллиметровом (3 и 8 мм) диапазонах. Оптимальный размер частиц составляет 0,015; 1,5 и 4 мм при определенном соотношении [2]. Ослабление пропускания является результатом как поглощения, так

и рассеяния. Довольно эффективно действуют завесы, созданные распылением частиц графита [4, 5]. Также представляется перспективным использование нанотрубок углерода и графена для создания помех [6–8].

Технологии получения расширенного графита, нанотрубок углерода и графена довольно сложны и недостаточно отработаны, что препятствует широким исследованиям их маскирующих способностей в ИК и МД.

Проведенное исследование реакции фторопласта Ф-42В (сополимер тетрафторэтилена и винилиденфторида) с алюминием показало, что при поджигании смеси этих порошков или полученного на ее основе композита Al/Ф-42В происходит бурная реакция, протекающая с высокой скоростью, в результате которой выделяется углерод. Причем при смешивании порошков образуется тонкодисперсный углерод в виде аэрозоля, а в случае композита – в виде легких хлопьев размером от частиц субмикронных частиц до агломератов размером 3...10 мм [9, 10]. Было установлено, что хлопья представляют собой структуру из нескольких слоев графена [9] и обладают электропроводностью ( $\sigma = 0,06 \text{ См/см}$ ), удельная поверхность составляет  $205 \text{ м}^2/\text{г}$ . Указанные свойства такого углерода позволят использовать композиты на основе фторопласта

и алюминия в качестве источника, способного при сгорании создать аэрозольное облако, экранирующее ИК излучение и радиоволны, как это происходит в случае графена или УВ [6, 7], или диполей на основе УВ длиной 1...30 мм, покрытых электропроводным слоем [11].

Целью исследования стало изучение возможности создания аэрозольного облака из графеновых структур, получаемых в результате диспергирования и горения композитных частиц на основе порошков алюминия и фторопласта Ф-42В.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве компонентов для получения пиротехнического состава использовали порошки алюминия АСД-4 (ТУ 48-5-226-82) и фторопласта марки Ф-42В (ГОСТ 25428-82).

Для исследований было изготовлено два типа макетов – источников дымообразования. В макет первого типа («Проза») помещали лепестки стеклоткани, пропитанной суспензией порошка алюминия АСД-4 в растворе фторопласта Ф-42В в ацетоне. Для наполнения второго типа макета («Просека») был изготовлен композит из порошков алюминия и фторопласта марки Ф-42В методом прессования стехиометрической смеси этих компонентов при температуре 200 °С.

**Изготовление композитного материала для макета «Проза».** В 7%-й раствор фторопласта марки Ф-42В в ацетоне добавляют при перемешивании стехиометрическое количество порошка алюминия АСД-4. Перемешивают в течение 3 ч. Пропитывание стеклоткани и сушку пропитанного полотна проводят при температуре 50 до 80 °С на пропиточной машине с протяжным механизмом. Из готового полотна нарезают лепестки прямоугольной формы размером 64×23 мм. Лепестки собирают в пакеты требуемой толщины и помещают в кассету, изгибая их по спирали, как это показано на рис. 1, а. Кассета представляет собой цилиндр, внутри которого проходит трубка для заряда. Размеры кассеты: внешний диаметр – 108,5 мм, внутренний диаметр – 45 мм, высота – 69,5 мм. Внешний вид кассеты изображен на рис. 2.

**Изготовление композитного материала для макета «Просека».** Макет «Просека» снаряжали

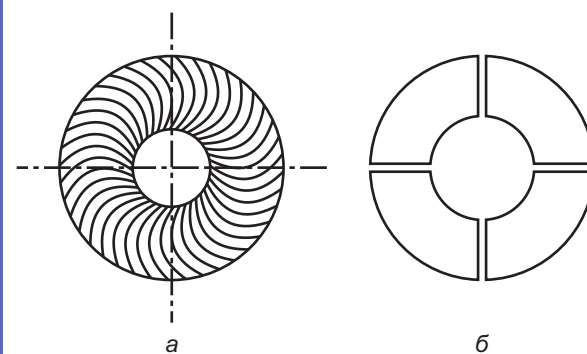


Рис. 1. Расположение дымообразующего материала в кассетах: а – укладка лепестков (вид сверху); б – укладка секторных элементов (вид сверху)



Рис. 2. Внешний вид кассеты

элементами, полученными из композитного материала на основе порошков фторопласта Ф-42В и алюминия АСД-4. Форма элементов и расположение их в кассете приведены на рис. 1, б.

Получение композита из порошков фторопласта Ф-42В и алюминия происходит следующим образом:

порошок фторопласта марки Ф-42В – 75 г и порошок алюминия – 25 г помещают в смеситель; перемешивают в течение 1 ч со скоростью 45 об./мин;

однородную смесь при периодическом уплотнении переносят в пресс-форму, которую затем помещают в термошкаф, предварительно нагретый до рабочей температуры 200 °С, и выдерживают в течение 30 мин;

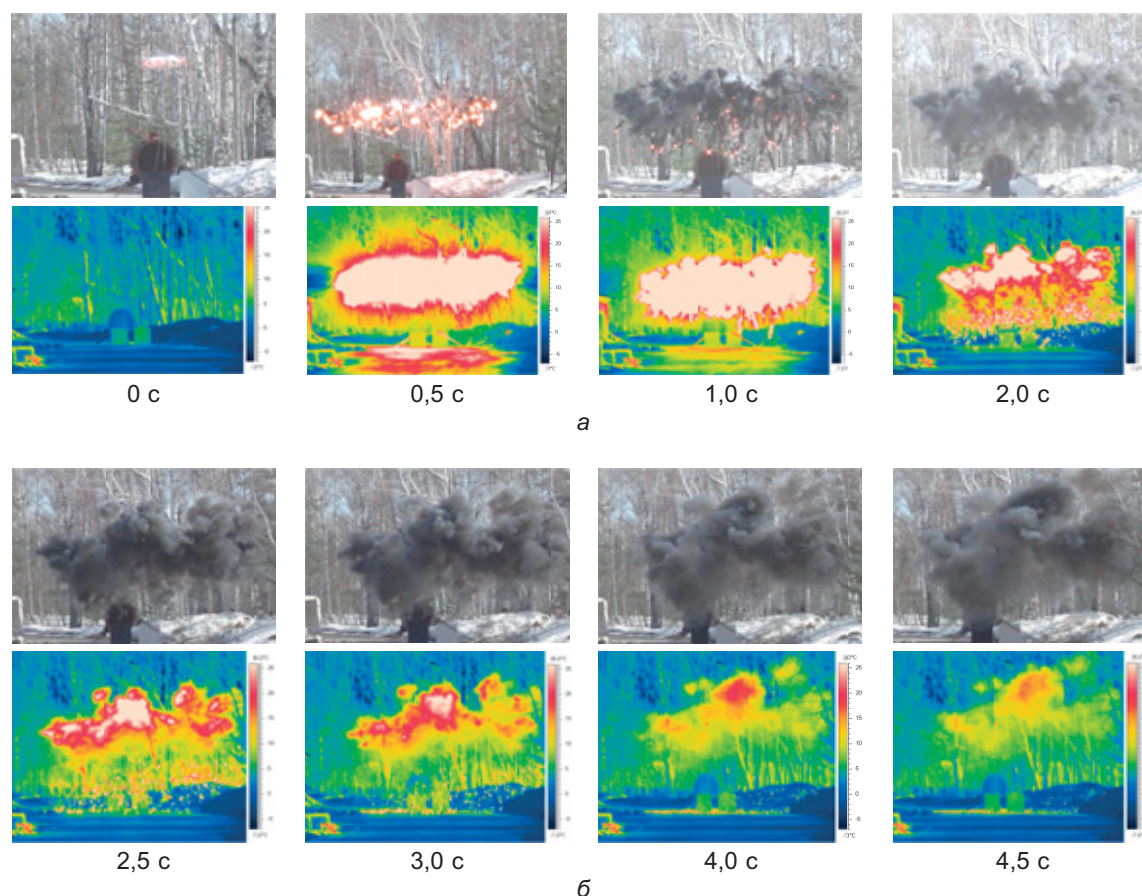


Рис. 3. Испытание состава «Проза»: а – горение от 0 до 2,0 с; б – горение от 2,5 до 4,5 с

далее смесь прессуют под давлением  $85 \text{ кгс/см}^2$  и полученную спрессованную заготовку оставляют на 30 мин в форме для остывания при комнатной температуре, после чего ее извлекают и подвергают при необходимости механической обработке для удаления облоя.

Полученный таким образом элемент представляет собой сектор круга с внешним диаметром 105 мм и внутренним – 45 мм, толщина – 5 мм, масса – 17 г (рис. 1, б). Кассета содержит пакет элементов, уложенных друг на друга. Внешний вид кассеты аналогичен внешнему виду кассеты «Проза» (см. рис. 2).

### ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ

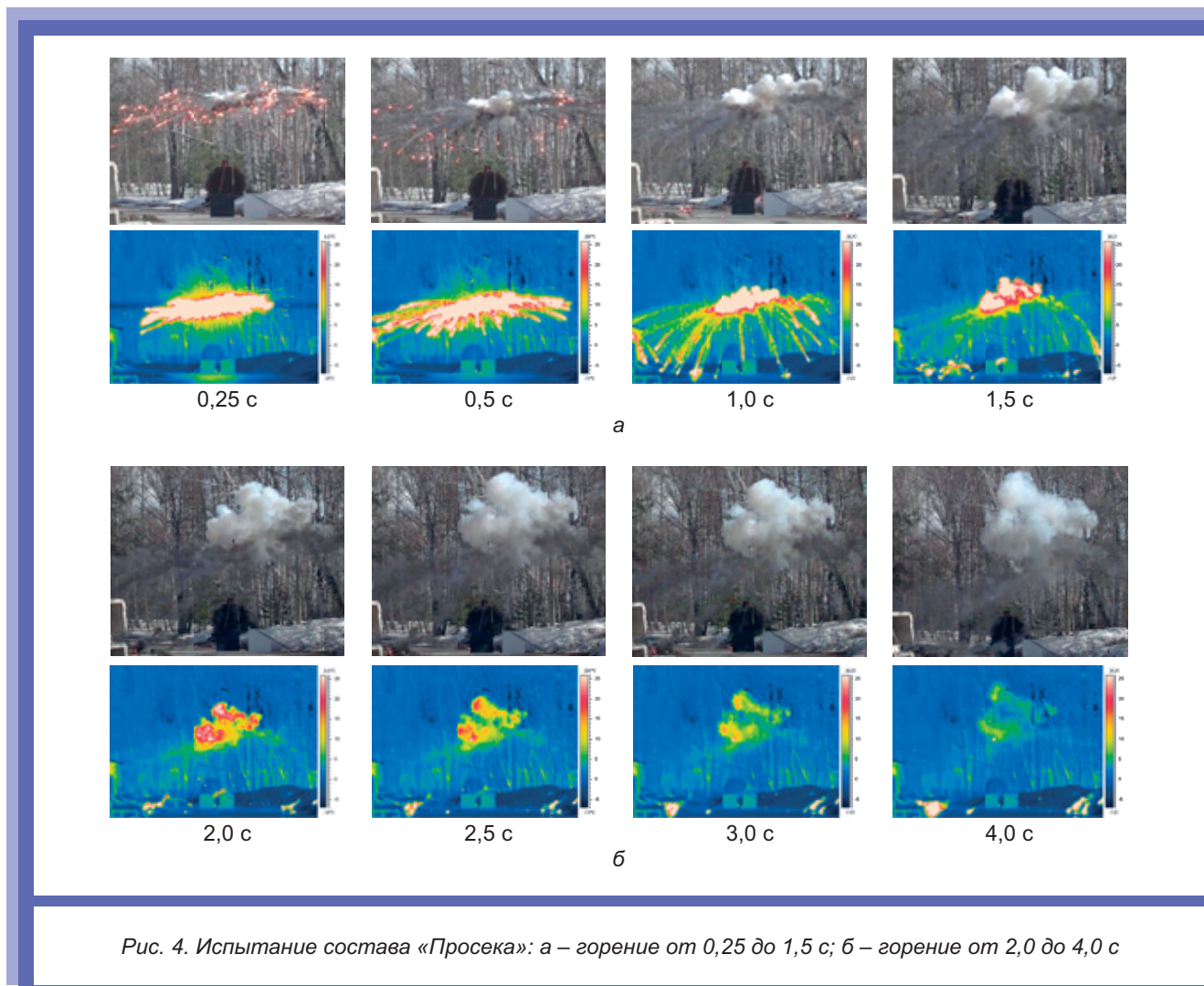
Испытания макетов «Проза» и «Просека» были проведены на экспериментальной базе АО «ИПФ» в целях оценки пространственно-

временных характеристик экспериментальных составов первого и второго типа и выяснения возможности образования аэрозоля из углерода типа графена при постановке завесы.

Макет устанавливался на шесте высотой 5 м. Срабатывание макета осуществлялось с помощью порохового заряда 2К-30 и электровоспламенителя МБЧ-1.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При испытании макета «Проза» (лепестки) произошло интенсивное горение состава с образованием густого чёрного дыма и сильной ИК засветкой в течение  $\sim 3$  с (рис. 3, а, б). В случае состава «Просека» (металлопласт) при срабатывании порохового заряда элементы воспламенялись, но вследствие высокой плотности и массы они, не успев сгореть, упали на землю с разбро-



сом в радиусе ~15 м, после чего продолжилось интенсивное горение в течение ~10 с (рис. 4, а, б) с образованием на земле углеродного материала в виде легких хлопьев разного размера (рис. 5).

В обоих опытах зафиксирован факт отражения лазерного излучения от образовавшихся аэрозольных облаков.

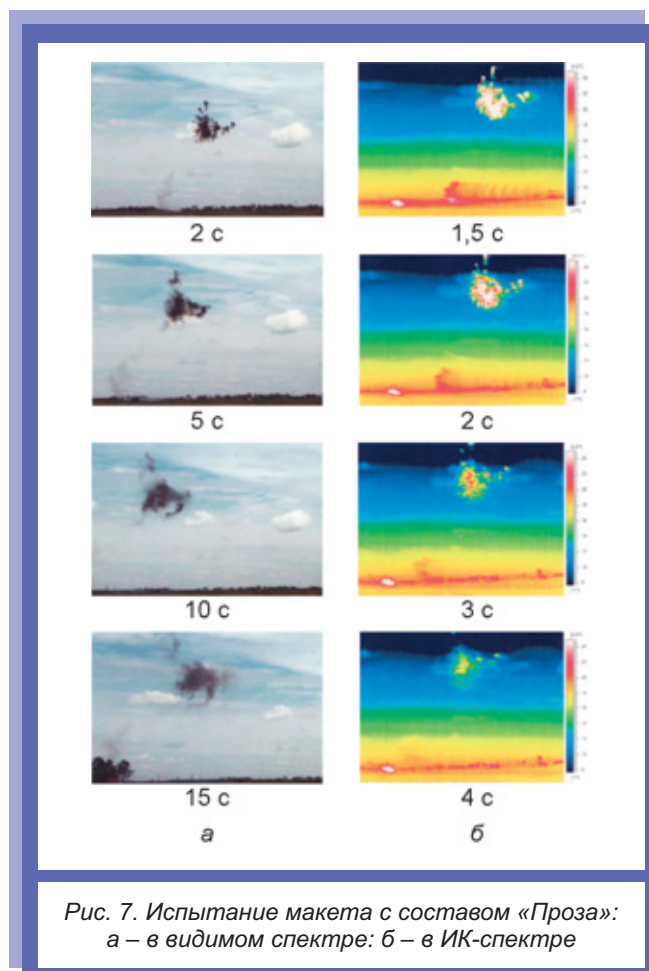


Рис. 7. Испытание макета с составом «Проза»: а – в видимом спектре; б – в ИК-спектре

Таким образом, подтверждено аэрозольное образование из частиц углерода (черный дым) при срабатывании состава «Проза». У состава «Просека» такое облако не образуется по причине недостаточно высокой скорости горения состава из-за его толщины и плотности, так как догорание элементов происходит на земле. Меньшей скоростью реакции можно объяснить образование белого дыма при горении состава «Просека». В этом случае часть алюминия взаимодействует с кислородом воздуха с образованием оксида алюминия, в результате чего выделяется меньше углерода. Было ожидаемо, что увеличение высоты инициирования состава позволит ему сгореть полностью в воздухе. Однако испытания, проведенные на полигоне ИПФ в штатных условиях со срабатыванием макета на высоте 35 м, дали отрицательный результат (рис. 6). Также хорошо видны черные трассы образующегося углерода из горящих падающих элементов состава «Просека». На второй секунде площадь разлета элементов составила  $90 \times 50 \text{ м}^2$ .

Отсутствие аэрозольного облака объясняется недостаточной скоростью горения элементов состава. Как показали исследования, скорость горения элементов может быть увеличена в 4–5 раз при замене алюминия АСД-4 на наноалюминий с размером частиц 150...200 нм, полученный электродуговым методом на установке АО «ГНИИХТЭОС». В тех же условиях при срабатывании макета с составом «Проза» максимальная величина площади аэрозольного образования в ИК и видимой области спектра равнялась  $\sim 150 \text{ м}^2$  и достигалась через 1,5 с (масса состава составляла 370 г). В видимой области значительный отрицательный оптический контраст плотного черного аэрозольного образования на фоне неба сохранялся более 15 с (рис. 7).

## ВЫВОДЫ

Проведенные предварительные испытания показали, что при горении композитного материала на основе порошка алюминия и фторопласта Ф-42, нанесенного на стеклоткань, происходит образование аэрозольного облака, состоящего из частиц электропроводящего углерода графеновой структуры.

В случае композитных элементов толщиной 5 мм из-за плотности материала горение происходит медленно и часть алюминия реагирует с кислородом воздуха с образованием белого дыма.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on infrared-millimeter wave composite interference characteristics of chopped carbon fiber / Z. Liu [at al.] // Proceedings. 2019. Vol. 11338.
2. Study on infrared/millimeter wave composite interference performance of carbon fiber particle size / Y. Sun [at al.] // Infrared and Laser Engineering. 2022. Vol. 51, № 3.
3. The effect of carbon nanofibers conductivity on the extinction properties to millimeter wave / H. Wang [at al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 382, № 2.
4. Study on millimeter wave interference property of carbon fiber and expanded graphite / W. Dong [at al.] // Proc. SPIE 11455. Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications. 2020. Vol. 114556T.

5. Study on the graphite smoke echo characteristics of pulsed laser fuze / L. Gao [at al.] // Proceedings of the SPIE. Advanced Laser Technology and Application. 2020. Vol. 11562.
6. Extinction Characteristic of graphene Smoke to Infrared and Laser Wave / S. Li [at al.] // Infrared Technology. 2010. Vol. 32, № 6.
7. Middle and Far Infrared Interference Properties of CNT/ Graphene/Carbon Composites Smoke Screen / H. Chen [at al.] // Chinese Journal of Energetic Materials. 2019. Vol. 27, № 3. P. 249–254.
8. Tuning of Graphene-Based Optical Devices Operating in the Near-Infrared / A.S. Vorobev [at al.] // Appl. Sci. 2021. № 11(18).
9. Синтез графена в реакции горения сополимера тетрафторэтилена и винилиденфторида с нанодисперсным алюминием / С.Г. Федоров [и др.] // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 58–63.
10. Способ получения графеновых структур: пат. 2631821 Рос Федерация № 2016102975 / Ш.Л. Гусейнов [и др.]; заявл. от 29.01.2016, Бюл. № 27.
11. Koch E.-C., Schneider J. Pyrotechnic smoke screen units for producing an aerosol impenetrable in the visible, infrared and millimetric wave range: пат. 6578492 В1 США.



УДК 629.7.08

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОМЕХА–СИГНАЛ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.В. КАЛИТАЕВ, канд. тех. наук П.П. ЛУКАШОВ

(ФГКВООУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации)

*Приведены расчётные выражения для коэффициента помеха–сигнал у поверхности земли при одном и четырех кабелях, проложенных в одной траншее с поврежденным, учитывающие различные электрические и геометрические параметры. Полученные значения могут быть использованы для обеспечения избирательности поисковой аппаратуры.*

**Ключевые слова:** КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ; НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ; МАГНИТНОЕ ПОЛЕ; КОЭФФИЦИЕНТ ПОМЕХА–СИГНАЛ; ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ.

Кабельные линии электропередачи подвержены повреждениям, которые могут быть вызваны различными факторами. При определении места повреждения важно учитывать, что существует большое разнообразие различных электрических и геометрических параметров, влияние которых сказывается на точности и чувствительности прибора. Индукционный кабелеискатель является основным средством обнаружения повреждений, который должен соответствовать высоким требованиям по чувствительности, диапазону регулирования входного сигнала и избирательности. Для обеспечения избирательности поисковой аппаратуры необходимо знать

соотношение между напряженностями магнитных полей, создаваемых поисковым током повышенной частоты в поврежденной линии и током нагруженных линий. Это соотношение вследствие различной конфигурации указанных полей будет разным для каждой точки пространства. Надежный поиск по максимальному уровню полезного сигнала обеспечивается отстройкой от максимального уровня помехи, что соответствует условному совпадению точек с указанными максимумами и дает запас в сторону отстройки.

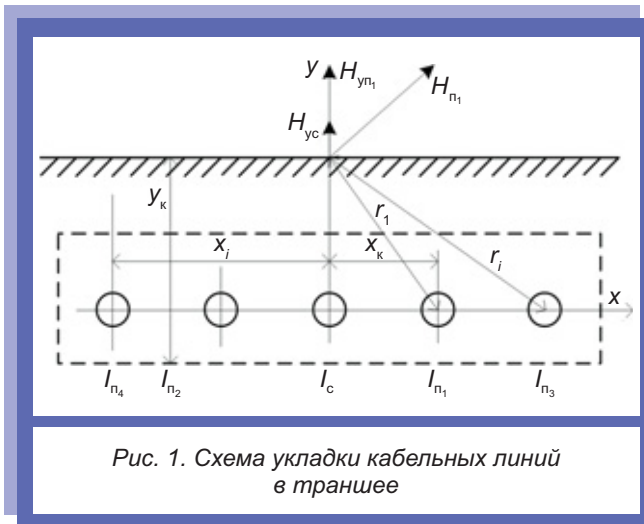
Соотношение между максимумами полей помехи и полезного сигнала характеризуется коэффициентом помеха–сигнал (КПС):

$$K_{п.с} = H_{п.маx} / H_{с.маx}, \quad (1)$$

$$z/\lambda = 3/16,$$

где  $H_{п.маx}$ ,  $H_{с.маx}$  – действующие или амплитудные значения максимумов напряженностей магнитных полей помехи и поискового сигнала, создаваемых соответственно токами нагрузки и поисковым током [1].

Коэффициент помеха–сигнал рассчитан у поверхности земли при одном и четырех кабелях, проложенных в одной траншее с поврежденным на глубине  $y_k$  при расстоянии между соседними кабелями  $x_k$  (рис. 1). Для упрощения расчета принято, что все кабели однотипны и расположены симметрично относительно поврежденного, что дает наибольший влияющий эффект.



Зависимость для расчета значения максимумов напряженностей магнитных полей имеет следующий вид:

$$H_{п.маx} = \frac{\sqrt{3}I_m}{\sqrt{2}\sqrt{\lambda}r^{3,5}} \times \sqrt{\left[ x^2 y^2 \left( 2 + \frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2 + \left( y^2 + \frac{y^2 2\pi r}{\lambda} - x^2 \right)^2 \right]} \exp\left( -\frac{2\pi r}{\lambda} \right) \sin\left( \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{\pi}{8} \right). \quad (2)$$

По значению  $K_{п.с}$  формируются характеристики избирательных фильтров.

Наибольшее значение вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, создаваемой нагруженной кабельной линией:

где  $z$  – полярная координата точки, в которой определяется напряженность магнитного поля;  $\lambda$  – шаг скрутки жил [2].

Подставив в формулу напряженности магнитного поля (2) и преобразовав в подкоренное выражение в соответствии с построениями

(рис. 1)  $r = r_i = \sqrt{x_i^2 + x_k^2}$ , получаем действующее

значение максимума напряженности магнитного поля помехи:

$$H_{уп\max}^{кл} = \frac{\sqrt{3}I_m}{\sqrt{2}\sqrt{\lambda}} \frac{y}{r_i^{2,5}} \times \sqrt{\left( 1 + \frac{2\pi r_i}{\lambda} \right)^2 + (x_i / y_i)^2} \exp\left( -\frac{2\pi r_i}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Наибольшее значение вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, создаваемой током  $I_c$  в поврежденной линии непосредственно над осью кабеля (рис. 1), определяется по формуле:

$$H_{yc\max}^{(кл)} = \frac{I_m c^a}{\sqrt{\lambda} y_k^{1,5}} \left( 1 + \frac{2\pi y_k}{\lambda} \right) \exp\left( -\frac{2\pi y_k}{\lambda} \right). \quad (4)$$

При одном влияющем кабеле КПС можно найти, подставляя формулы (3) и (4) в выраже-

ние (1), и одновременно учитывая различное экранирующее воздействие металлических оболочек кабеля на промышленной  $K_{э.п}$  и повышенной (полезный сигнал)  $K_{э.с}$  частотах. Исходя из указанного получено соотношение:



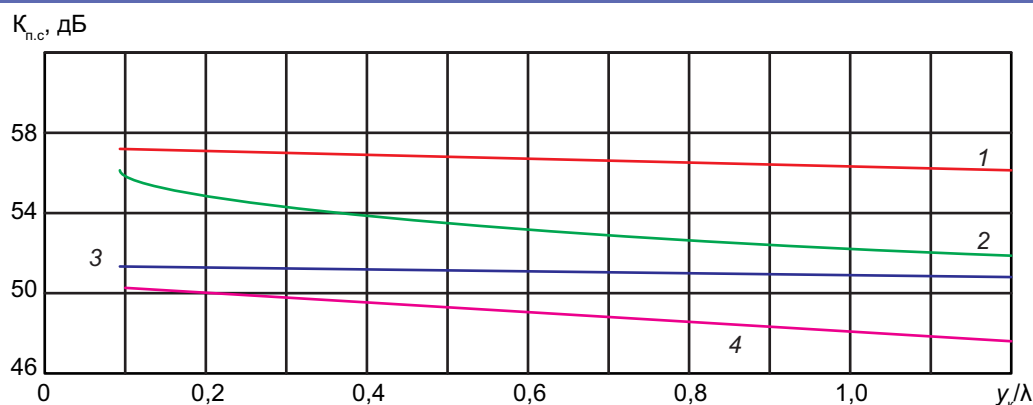


Рис. 2. Зависимость коэффициента помеха–сигнал от относительной глубины залегания кабеля: 1, 3 –  $x_k/y_k = 0,15$ ; 2, 4 –  $x_k/y_k = 0,3$

$$K_{п.с1}^{(кл)} = \frac{\sqrt{3}K_{э.п} I_m n \left(\frac{y_i}{r_1}\right)^{2,5}}{\sqrt{2}K_{э.с} I_m c \left(\frac{r_1}{r_1}\right)} \times \frac{\sqrt{(1+2\pi r_1/\lambda)^2 = (x_k/y_k)^2}}{1+2\pi y_k/\lambda} \times \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - y_k)\right), \quad (5)$$

где  $r_1 = r_i = \sqrt{(x_k)^2 + (y_k)^2}$  – расстояние от точки

измерения, расположенной над поврежденным кабелем, до оси мешающего кабеля.

При четырех влияющих нагруженных кабелях амплитуды и фазы токов в них, а также начальный угол поворота жил являются величинами случайными с равномерным законом распределения [3], поэтому КПС определяется формулой:

$$K_{п.с4}^{кл} = \frac{K_{э.п}}{K_{э.с} H_{yc \max}} \sqrt{\sum_{i=1}^4 H_{уп \max}^2}, \quad (6)$$

где расчетные напряженности магнитного поля определяются по выражениям (2) и (3), а расстояние  $x_i$  находится в соответствии с построениями рис. 1.

Рассчитанные по формулам (5) и (6) зависимости КПС при  $K_{э.п}/K_{э.с} = 10$  и  $I_{mн}/I_{mс} = 30$  от соотношения глубины залегания и шага скрутки жил кабеля приведены на рис. 2. Эти зависи-

мости даны для двух значений отношения  $x_k/y_k$ , равных 0,15 и 0,3, что соответствует типовым расстояниям между соседними кабелями, 0,1 и 0,2 м при нормируемой глубине залегания  $h_k = 0,7$  м. Здесь и в дальнейшем  $k_{п.с}$ , измеряемый в дБ, представлен в логарифмическом масштабе:

$$k_{п.с} = 10 \lg(P_{п}/P_{с}) = 101 \lg(I_{п}^2 / I_{с}^2) = 20 \lg(I_{п} / I_{с}) = 20 \lg(H_{п} / H_{с}). \quad (7)$$

Из рис. 2 следует, что при двух однопроводных кабелях в траншее КПС достигает 50 дБ и мало зависит от глубины залегания кабеля при  $x_k/y_k = 0,15$ . При пяти кабелях в траншее КПС увеличивается до 56 дБ. При увеличении расстояния между соседними кабелями наряду с общим уменьшением помехи проявляется ее снижение с увеличением глубины залегания кабеля. При увеличении шага скрутки жил влияющего кабеля помеха возрастает. Так, для кабелей 6 кВ при максимальном различии в сечениях (и шагах скрутки) поврежденного (25 мм<sup>2</sup>) и мешающего (240 мм<sup>2</sup>) кабелей коэффициент возрастает на 10 дБ.

## ВЫВОДЫ

При индукционном методе определения повреждения в условиях мешающих помех (промышленной частоты) наибольшие значения помехи и полезного сигнала в общем случае не совпадают в пространстве и во времени. На-

дежная избирательность поисковой аппаратуры будет обеспечена, если КПС определяется при условном совпадении точек с наибольшими значениями помехи и полезного сигнала.

Получены расчётные выражения для КПС, учитывающие глубину залегания и шаг скрутки жил кабеля, расстояние между соседними кабелями, их количество и расположение в траншее. При одинаковых кабелях влияние этих геометрических факторов не превышает 6...8 дБ, а определяющий вклад вносят соотношения токов и разные экранирующие эффекты для помехи и полезного сигнала.

Наибольший КПС будет при малой глубине залегания кабелей, их близком расположении

и размещении нескольких кабелей в траншее, а также при малом шаге скрутки жил поврежденного кабеля. В этом случае расчетный КПС достигает 66 дБ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. 11-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2012. 701 с.
3. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1984. 368 с.



УДК 621.313

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ АГРЕГАТОВ И СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Н.С. ГОНЧАРОВ, М.А. НИКИФОРОВ, д-р техн. наук А.В. НИКОЛАЕВ  
(ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»),  
М.В. МОТОВА (ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

*Рассмотрены структурные и конструктивные изменения электромашинных агрегатов и предложен способ улучшения их энергетических и массогабаритных характеристик.*

**Ключевые слова:** ЭЛЕКТРОМАШИНЫЙ АГРЕГАТ; ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА; СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР.

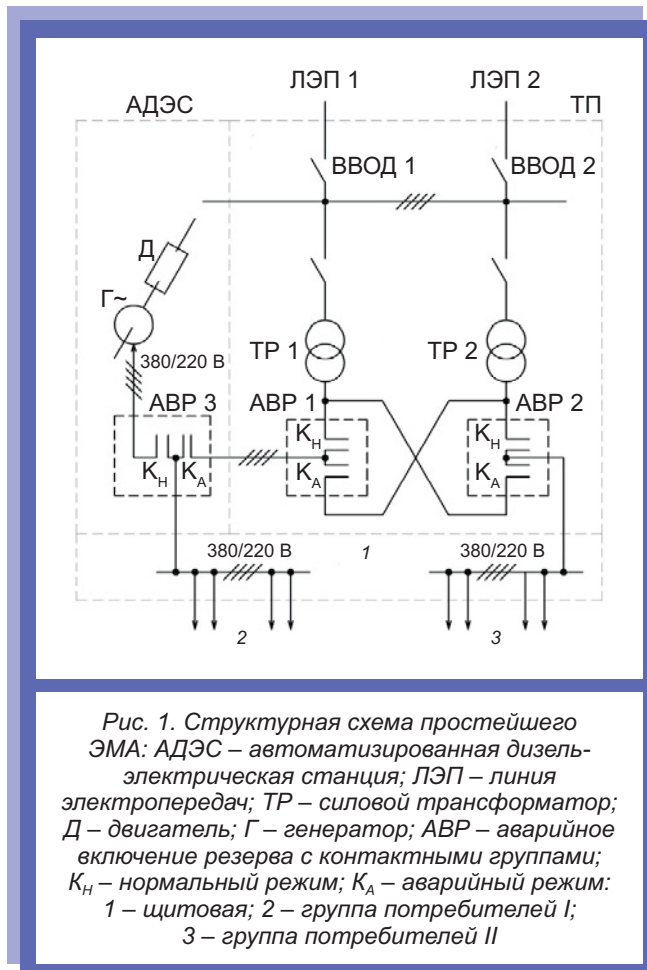
Устройства на основе электромеханического принципа преобразования электрической энергии используются в различных отраслях военной техники. Реализация этого принципа на предприятиях и в узлах связи различного назначения основана на электромашинных агрегатах (ЭМА) [1], развитие которых проходило в несколько этапов.

На первом этапе появился двухмашинный агрегат, в котором применялся двигатель постоянного тока (ДПТ) и синхронный генератор (СГ) или трёхфазный асинхронный

двигатель переменного тока (ТАД) и тот же СГ. Система электроснабжения, в которой использовался двухмашинный агрегат, изображена на рис. 1.

Двухмашинный агрегат отличается высоким качеством электрической энергии и простотой запуска, однако с остановкой двигателя напряжение на зажимах потребителей исчезало.

На втором этапе для увеличения общего интервала времени на общий вал двигателя-генератора стали устанавливать инерционный маховик (ИМ). Маховик при работе двигателя раскру-

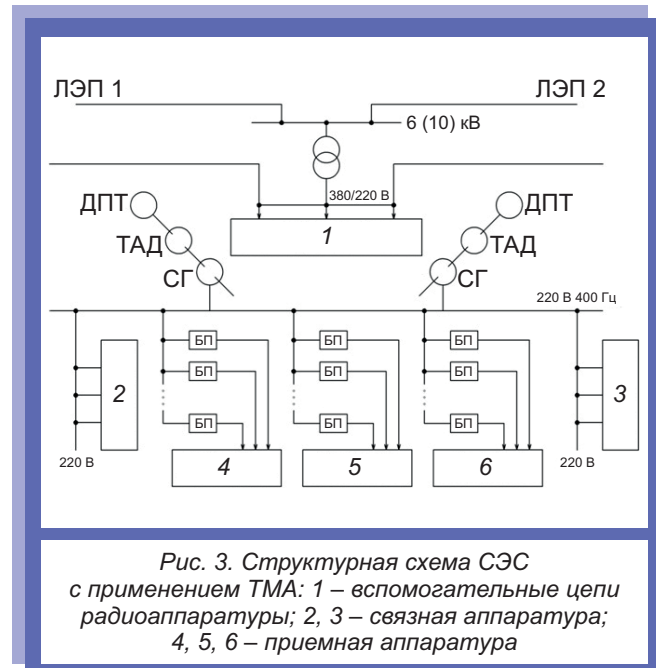
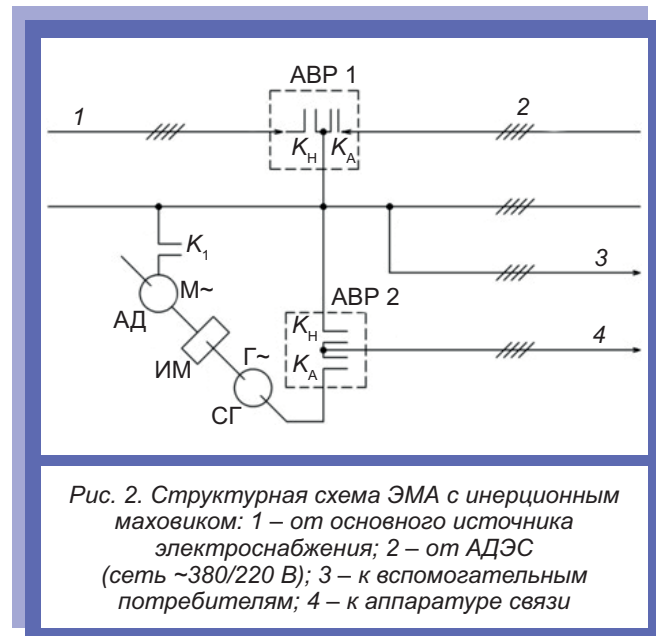


чивается и при остановке двигателя генератор некоторое время продолжает работать (рис. 2).

На третьем этапе увеличение интервала работы при наличии ИМ достигало 40...50 с, что, естественно, не устроило большинство потребителей и стало причиной создания трёхмашинного агрегата (ТМА), в котором при наличии напряжения в сети СГ вращался ТАД, а при отсутствии напряжения начинал работать ДПТ, автоматически подключаемый к аккумуляторной батарее. Структурная схема электроснабжения узла связи, где применены два ТМА, работающие поочередно, изображена на рис. 3.

Трёхмашинные агрегаты, серийно выпускаемые Вяземским электромеханическим заводом, нашли применение во всех СЭС, где потребители предъявляли повышенные требования к форме кривой напряжения питания.

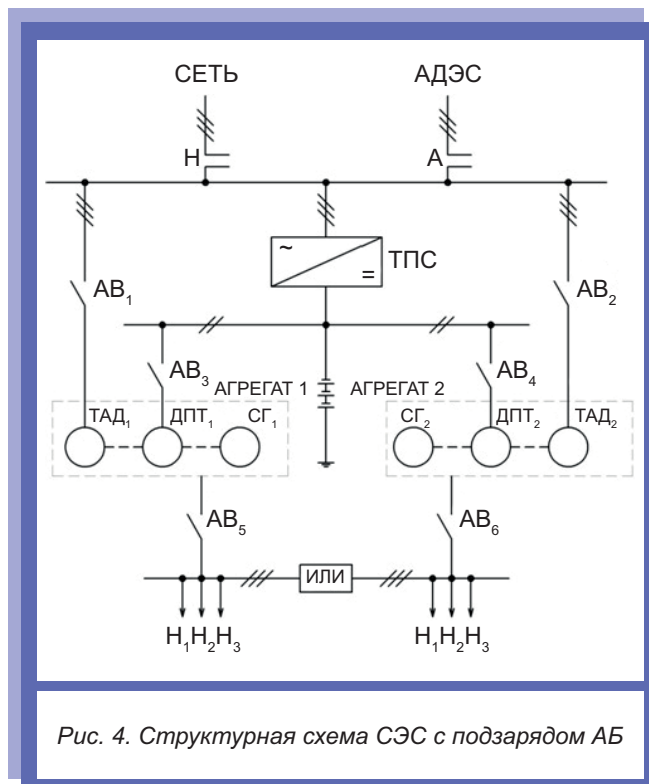
На четвертом этапе структурная схема системы электроснабжения, в которой применена подзарядка аккумуляторной батареи (рис. 4), соответствует системе гарантированного питания,



поскольку перерыв в электроснабжении очень мал и зависит только от времени срабатывания автоматических выключателей ( $АВ_1...АВ_6$ ).

ТМА содержит двигатель постоянного тока (ДПТ), трёхфазный асинхронный двигатель (ТАД) и синхронный генератор (СГ), на базе которого построены устройства гарантированного питания (УГП) узлов связи, командных пунктов высших звеньев, начиная с ракетной дивизии [2, 3].

УГП имеют два режима работы: в пункте постоянной дислокации (ППД) при наличии



напряжения промышленной сети работает ТАД и вращает общий вал, что позволяет СГ вырабатывать электроэнергию для питания средств связи, и на марше, когда от перевозимой аккумуляторной батареи (АБ) работает ДПТ и также вращает общий вал.

Поскольку переход от сети на АБ осуществляется за доли минуты УГП нашли широкое применение в авиации, морском флоте и на многих объектах, нормальные условия эксплуатации оборудования которых достигаются только при питании его синусоидальным напряжением.

Электрические машины, входящие в состав ТМА, также претерпели ряд значительных изменений, направленных на улучшение энергетических и массогабаритных характеристик как отдельных электрических машин, так и ТМА в целом. На смену обычным электрическим машинам постоянного тока пришло оборудование постоянного тока с постоянными магнитами (ДПТ ПМ и ГПТ ПМ), при этом в машинах постоянного тока КПД возрос почти на 10% и упростились обмотки (за счёт отсутствия обмотки возбуждения). Появился новый класс ДПТ, который называют бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ). Основное отличие БДПТ от обычных двигате-

лей заключается в том, что в них отсутствует коллекторно-щёточный узел. Введение в схему БДПТ полупроводниковой техники повысило стабильность частоты вращения вала за счёт применения полупроводниковых (электронных) коммутаторов – регуляторов.

Помимо электрических машин постоянного тока изменились конструкции и характеристики синхронных генераторов. Основным направлением их развития стало использование постоянных магнитов, т. е. замена в СГ электромагнитного возбуждения на магнитное [2, 4]. Применение СГ с постоянными магнитами (СПМ) увеличило КПД на 8...10%, уменьшило массу генератора и его размеры за счёт исключения пространства, занимаемого обмоткой возбуждения.

Для оценки эффективности применения новых электрических машин сравним технические характеристики устройства гарантированного питания мощностью 7,5 кВт УГП-7.5 и ТМА с аналогичными выходными параметрами, использующего БДПТ, синхронный двигатель и генератор с постоянными магнитами.

УГП-7.5 состоит из асинхронного короткозамкнутого двигателя типа А2-61-4 (масса 128 кг, КПД 88,5%), машины постоянного тока типа П-71 (масса 300 кг, КПД 84 %) и синхронного генератора типа ЕСС-62-4 (масса 238 кг, КПД 86%). Таким образом, масса УГП-7.5 составляет:

$$m_{\text{УГП-7.5}} = 128 + 300 + 238 = 666 \text{ кг}; \quad (1)$$

удельная мощность:

$$\gamma_{\text{УГП-7.5}} = 7500/666 = 11,26 \text{ Вт/кг}; \quad (2)$$

КПД устройства:

$$\eta_{\text{УГП-7.5}} = 88,5 \cdot 84 \cdot 86 = 63,96\%. \quad (3)$$

В качестве замены ТАД рассмотрим СД ПМ ЛСРПМ 100Л-13.7 (масса 26 кг, КПД 94,5%), в качестве ДПТ – НРМ-20КВ (масса 39 кг, КПД 91%), а вместо СГ применим СГ ПМ ЛСРПМ 100Л-12 (масса 24 кг, КПД 94,5%). Масса ТМА, состоящей из новых электрических машин, составит:

$$m_{\text{ТМА с ПМ}} = 26 + 39 + 24 = 89 \text{ кг}; \quad (4)$$

удельная мощность:

$$\gamma_{\text{ТМА с ПМ}} = 7500/62 = 84,27 \text{ Вт/кг}; \quad (5)$$

КПД устройства:

$$\eta_{\text{ТМА с ПМ}} = 94,5 \cdot 91 \cdot 94,5 = 81,26\%. \quad (6)$$

### ВЫВОД

Таким образом, применение новых электрических машин позволяет поднять КПД ТМА на 17%, при том, что масса оборудования существ-

венно снижается, а удельная мощность возрастает в 7,5 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электропитание устройств связи / под ред. Ю.Д. Козляева. М.: Радио и связь, 1998. 328 с.
2. Ефименко Е.И. Новые методы исследования машин переменного тока и их применения. М.: Энергоатомиздат, 1993. 288 с.
3. Колодеев И.Д. Системы автономного электроснабжения. М.: Министерство обороны, 1987. 374 с.
4. Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности. М.: МЭИ, 2006. 216 с.



УДК 004.4

## СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Д-р техн. наук, проф. М.Н. ЕРОФЕЕВ, М.В. МУКОМЕЛА, М.В. МОТОВА  
(ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

*Рассмотрена схема построения и исследования моделей сложных систем, обусловленная необходимостью повышения эффективности принимаемых решений на основе научно обоснованного прогноза ожидаемых последствий воздействия современных и перспективных средств поражения.*

**Ключевые слова:** ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС; СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; СЛОЖНАЯ СИСТЕМА.

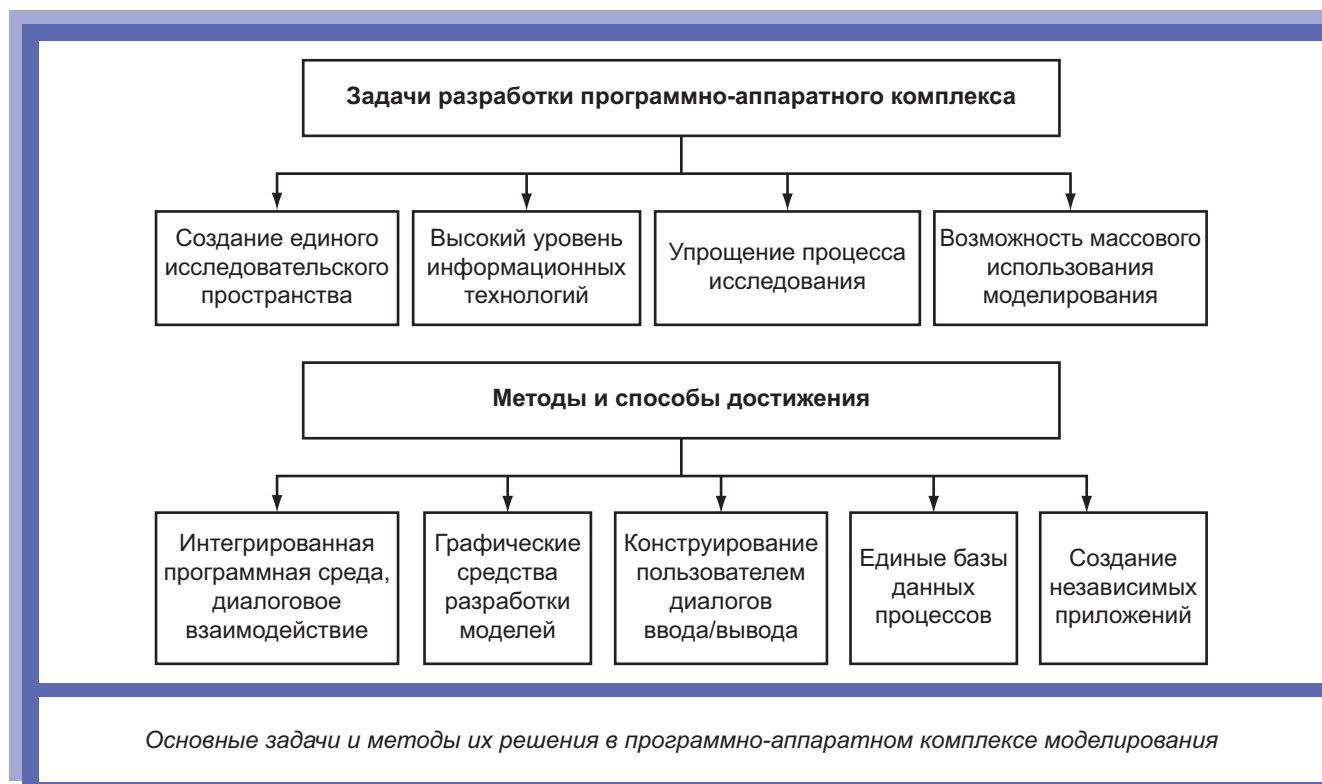
Высокая точность и боевая эффективность современных средств поражения различного базирования и диапазонов дальностей, а также высокая стоимость их производства привели к появлению существенной особенности их боевого применения. Они используются для нанесения ударов не по площадям и большим территориям, а по конкретно выбранным малоразмерным, но критически значимым целям военной и административно-промышленной структуры [1].

Актуальность проведения исследований в области формирования основ создания программно-аппаратного комплекса (ПАК),

предназначенного для оценки живучести специальных объектов графическими методами информационного моделирования, обусловлена необходимостью повышения эффективности принимаемых решений на основе научно обоснованного прогноза ожидаемых последствий воздействия современных и перспективных средств поражения.

Процесс построения модели сложной системы можно представить в виде последовательно выполнения трех основных этапов:

построение концептуальной модели (КМ) системы и ее формализация;



алгоритмизация и машинная реализация модели системы;

получение и интерпретация результатов моделирования системы [2–4].

На первом этапе исследуется и описывается объект моделирования, строится КМ системы, определяющая цели, задачи, исходные данные, стратегии, условия, показатели качества моделирования на предметно-содержательном уровне. КМ – это абстрактная модель, определяющая состав и структуру системы, свойства элементов и причинно-следственные связи, присущие анализируемой системе и существенные для достижения целей моделирования.

На втором этапе математическая модель, уже изложенная выше, воплощается в конкретную машинную (программную) модель. Здесь происходит уточнение или выбор программного пакета моделирования с учетом ряда критериев и непременным условием – достаточность и полнота средств для реализации концептуальной модели. Среди других критериев – доступность, простота и легкость освоения, скорость и корректность создания программной модели. После выбора среды моделирования концептуальная модель, сформулированная на первом этапе, воплощается в компьютерную модель, т.е.

решается задача алгоритмизации и детализации модели. Завершается этап составлением технической документации.

Третий этап состоит из планирования и проведения машинных экспериментов с моделью системы, статистической обработки полученных экспериментальных данных. Далее анализируются и интерпретируются полученные результаты, подводятся итоги моделирования, выдаются рекомендации по поводу использования разработанной модели и решения поставленных задач моделирования, составляется техническая документация.

Основные задачи, которые необходимо решить при разработке ПАК, предназначенного для исследования живучести специальных объектов графическими методами информационного моделирования, и способы их реализации приведены на рисунке.

## ВЫВОДЫ

Исходя из поставленных задач, основополагающими принципами, положенными в основу создания ПАК, являются: единое исследовательское пространство (автоматизация действий пользователя на протяжении всего процесса

исследования в рамках единого программного комплекса); высокий уровень информационных технологий при проведении исследования (интерактивное взаимодействие модели и пользователя, хранение и обработка данных о модели и результатах экспериментов, коллективная разработка и т.д.); упрощение взаимодействия с моделью в процессе исследования (предоставление удобных, наглядных и настраиваемых на предметную область интерфейсов взаимодействия с моделью при проведении исследования; использование графического представления, визуализации процессов и результатов моделирования); возможности повторного и массового использования моделей (на основе разработанных интерфейсов взаимодействия создание простого и понятного конструктора моделей; а далее, на основе построенной модели создание

независимого от среды разработки приложения, позволяющего рядовому пользователю самостоятельно проводить исследования).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольцов Б.И., Лапшин Г.А., Ставров Г.Н. СФС и их комплексы / ВИ(ИТ). СПб.: ВИ(ИТ), 2017. 427 с.
2. Штофф В.А. Моделирование и философия. М. – Л.: Наука, 1966. 302 с.
3. Данков А.А. Моделирование – как важнейшая составная часть процесса разработки и модернизации перспективного вооружения. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 76 с.
4. СП 328.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели» [Электронный ресурс]. Официальный сайт Минстроя России.



## ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ. ПИРОТЕХНИКА

УДК 623.451 + 536.46

### КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТОВ И АЛЮМИНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БОЕВЫХ ЧАСТЯХ БОЕПРИПАСОВ И ПИРОТЕХНИКЕ

Д-р техн. наук Ш.Л. ГУСЕЙНОВ, канд. техн. наук С.Г. ФЕДОРОВ, В.И. АПУХТИНА, А.Ю. ТУЗОВ,  
С.А. КОНДРАТЬЕВ, В.А. ВАУЛИН (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»)

*В обзоре литературы за 2016–2022 гг. представлены результаты исследований влияния на механические и реакционные свойства композитных реакционных материалов, полученных на основе алюминия и политетрафторэтилена, параметров технологического процесса их изготовления, а также характеристик исходных компонентов, в том числе добавок вольфрама. Анализ литературы за указанный период показывает, что на прочность композитов и порог инициирования реакции большое влияние оказывает дисперсность частиц и соотношение компонентов, а также давление формования и температура спекания. Исследованные реакционные материалы представляют интерес в качестве наполнителей для боеголовок и вкладышей кумулятивных зарядов.*

**Ключевые слова:** КОМПОЗИТНЫЕ РЕАКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ; БОЕПРИПАС; ПОРАЖАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ; ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние 20 лет в США и Китае, а также в РФ довольно интенсивно ведутся исследования по созданию высокоплотных реакционно-активных материалов (РМ), которые при использовании в боеприпасах позволяют повысить поражающее действие последних (кинетическое, кумулятивное, осколочное и осколочно-фугасно-зажигательное) [1–9].

РМ содержат два или более компонента, способных реагировать между собой в особых усло-

виях. Они инертны при нормальных условиях и отличаются низкой чувствительностью к трению, удару, нагреванию, запалу и детонатору. Однако экстремальная сила удара может заставить компоненты реагировать друг с другом и выделять больше энергии, чем высоко взрывчатые вещества, такие как тротил, гексоген и другие.

РМ рассматриваются в качестве возможной альтернативы взрывчатым веществам (ВВ) или в комбинации с ними для использования в военных целях. Когда снаряд, содержащий РМ, сталкивается с мишенью со скоростью в диа-



пазоне от 200 до 5000 м/с, то в РМ происходит ряд физико-химических превращений. Сначала он подвергается пластической деформации и процессу течения или разрыва, при этом происходит увеличение поверхности контакта компонентов и возникает более тесный контакт между ними. Затем протекает экзотермическая реакция и возгорание при скоростях нагревания в диапазоне от  $10^4$  до  $10^8$  К/с [6, 10]. Таким образом, к кинетической энергии добавляется энергия экзотермической реакции между компонентами РМ, что приводит к резкому усилению поражающего действия одиночного кинетического боеприпаса, воздействующего множественными осколками или кумулятивной струей из РМ (образуемой в том числе в результате химического взаимодействия с материалами цели (или преграды) и кислородом воздуха) [3, 11].

К РМ относятся некоторые термиты, интерметаллиды, смеси металлов и полимеров. Литературные и патентные источники показывают, что в настоящее время активно исследуются в качестве РМ смеси фторопластов с алюминием и некоторыми другими металлами [7, 11–13].

РМ, изготовленные из алюминия (Al) и политетрафторэтилена (ПТФЭ), обладают умеренной прочностью и плотностью ( $\sim 2$  г/см<sup>3</sup>), высокой калорийностью (8850 кДж/кг) и наиболее эффективны при применении по слабозащищенным целям [5]. В процессе удара такие РМ деформируются и разрушаются, что вместе с взрывоподобной реакцией приводит к увеличению пробойн и многофакторному (термобарическому) фугасно-зажигательному эффекту в запреградном пространстве. Эти РМ находят применение там, где не требуется большая глубина проникания, но необходим мощный запреградный эффект (кумулятивные заряды).

Кроме высокого энергетического потенциала, реакционные композиты Al/ПТФЭ имеют такие преимущества, как низкая гигроскопичность, высокая стабильность, высокая степень безопасности при производстве или обращении, простота получения (легко гранулируются, таблетуются или прессуются), небольшая зависимость скорости горения от температуры и давления, стабильность горения при низких давлениях и температуре. Взаимодействие

между фторопластами и алюминием в условиях быстрого нагрева или сильного удара протекает очень бурно с высокой скоростью и большим энерговыделением. Адиабатическая температура горения превышает 3000 °С [14–16].

Сравнительно недавно сотрудниками МГТУ имени Баумана и АО «ГосНИИМаш» опубликованы обзорные статьи [4, 5], в которых рассмотрены результаты зарубежных экспериментальных исследований РМ как поражающего компонента боеголовок и определены перспективные направления использования РМ в боеприпасах различного назначения. Следует отметить, что большинство работ посвящено боеприпасам и РМ на основе алюминия и ПТФЭ. Однако в этих обзорах описаны в основном результаты поражающего действия различных боеприпасов. Вопросам получения РМ и процессам инициирования в них экзотермической реакции уделено мало внимания.

Поэтому авторам казалось целесообразным собрать имеющиеся за последние годы данные о методах получения РМ на основе Al и ПТФЭ и провести анализ влияния их технологических параметров на механические свойства РМ и механизм разрушения при сжатии и ударе.

Для определения возможности использования композитных материалов на основе ПТФЭ и алюминия или других активных металлов в боеголовках весьма важными характеристиками являются:

- время задержки воспламенения (или инициирования);
- время горения;
- максимальное давление горения;
- теплота реакции;
- температура пламени;
- скорость горения;
- порог чувствительности к удару;
- механическая прочность;
- стойкость к кинетическому нагреву.

#### ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ПРЕССОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ AL/ПТФЭ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ И УДАРЕ

**Изготовление прессованных образцов композитов Al/ПТФЭ. В научной и патентной**

литературе описано множество методов получения композитов на основе алюминия и фторопластов [17–26].

Процесс изготовления прессованных образцов в большинстве работ состоит из четырех основных стадий:

получение однородной физической смеси порошков алюминия и фторопласта методом физического смешения или смешения методом механоактивации;

заполнение пресс-формы смесью порошков; прессование смеси в форме при разных давлениях, что позволяет получать образцы различной плотности;

термообработка прессованных образцов по определенной программе, включающей в себя их нагревание с заданной скоростью до определенной температуры, выдерживание образцов при этой температуре и охлаждение с заданной скоростью (как правило, весь процесс протекает в течение 17...24 ч).

В качестве примера можно привести процесс получения прессованного композита, изложенный в работах [18, 19].

Порошки Al и ПТФЭ (массовое соотношение 26/74) суспендируют в этаноле и перемешивают в смесителе в течение 20 мин. Затем суспензию подвергают ультразвуковой обработке в течение 10 мин для того, чтобы разрушить агломераты. После смешения влажную смесь сушат при 50 °С в течение 48 ч. Давление формования составляет от 72 до 182 МПа (в некоторых случаях больше 200 МПа). Таким образом, получают образцы с различной плотностью и пористостью. Затем их помещают в вакуумный термошкаф и нагревают до температуры спекания, выдерживают при этой температуре несколько часов и охлаждают. Температура спекания ( $T_{\text{спек}}$ ) в работах [18, 19] составляет от 310 до 380 °С (чаще всего 370...380 °С).

**Методы исследования образцов на иницирование.** Механические свойства композитов Al/ПТФЭ, их плотность и чувствительность к изостатическому сжатию, к удару, способность к иницированию экзотермической реакции и полнота реакции существенно зависят от технологических параметров процесса изготовления (температуры спекания, давления, времени, размеров частиц порошков компонентов и др.). Чувствительность образцов и способность к

иницированию реакции определяют, главным образом, методами изостатического сжатия, падающего груза, на копре с разделенным стержнем Хопкинсона и др.

**Определение прочности и порога иницирования сжатием.** При исследовании композитов Al/ПТФЭ методом квазиизостатического сжатия образец помещают между двумя наковальнями из закаленной стали и прессуют с определенной скоростью опускания плунжера до достижения нагрузки, при которой образец разрушится или прореагирует [18, 19]. Следует отметить, что иницирование всегда начинается с образования трещин. Затем в течение 3...4 с происходит бурная экзотермическая реакция, сопровождаемая звуком взрыва [27].

**Иницирование ударом.** Иницирование реакции в композитах Al/ПТФЭ ударом отражено в сравнительно большом количестве работ [6, 8, 18–20, 28–34]. Одним из методов исследования является метод падающего груза, который аналогичен методу определения чувствительности вещества к удару (ГОСТ 4545–88). Груз определенной массы падает на помещенный на наковальню образец композита Al/ПТФЭ с определенной высоты. За начало реакции принимается вспышка света или звук взрыва, за порог иницирования принимается высота, при которой происходит 50% иницирования из числа проведенных тестов. Энергию иницирования ударом вычисляли согласно уравнению:

$$E_{ad} \approx E_p = mgh,$$

где  $E_{ad}$  – вычисленная энергия;  $E_p$  – потенциальная энергия падающей массы (груза);  $m$  – масса падающего груза;  $h$  – высота падения.

Для исследования характеристик дефляции и определения порога ударного иницирования реакции в композитах Al/ПТФЭ используется также копер Хопкинсона (стержень давления Хопкинсона или метод SHPB (Split-Hopkinson pressure bar)) [28, 31, 32]. Из композитов, полученных согласно обычной схеме, готовят цилиндрические прутки диаметром 8...10 мм и длиной от 10 до 50 мм. Стержни из композита выстреливают из газовой пушки под действием высокого давления. Выстрел производят по стальной или алюминиевой пластине.

После пробития пластины осколки стержня попадают в камеру, где происходит их горение.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ИХ СВОЙСТВА

**Влияние соотношения компонентов композитов на инициирование и на полноту реакции.** Стехиометрическое соотношение реагентов в реакции между алюминием и ПТФЭ составляет 26,5:73,5% масс. В большинстве работ при изготовлении композитов Al/ПТФЭ используется именно это соотношение. Однако в реальных условиях трудно ожидать, что реакция за короткое время пройдет в соответствии со стехиометрией. Поэтому в ряде работ было исследовано влияние соотношения реагентов на инициирование и полноту реакции.

В ходе исследования влияния содержания алюминия в композитах, полученных при давлении 60 МПа и температуре спекания 350 °С, было установлено, что при падении груза на композит реакция происходит в образцах с содержанием Al от 16 до 36%, но наиболее полно реакция протекает при содержании Al, близком к стехиометрическому [19]. Когда масса алюминия увеличивается до 46%, реакция не происходит.

Эксперименты на копке Хопкинсона [34, 35] показали, что с увеличением содержания Al предельная прочность на сжатие РМ Al/ПТФЭ сначала увеличивается, а затем уменьшается. Считается, что избыток частиц алюминия нарушает сплошность матрицы ПТФЭ и вызывает уменьшение механической прочности и снижение реакционности.

**Влияние размера частиц компонентов на инициирование и характеристики реакции при квазистатическом сжатии и ударе.** Известно, что размер частиц компонентов существенно влияет на протекание реакций в энергетических конденсированных системах и, в частности, в композициях на основе алюминия и фторопластов [36–38].

В. Feng и др. [19] и J. Wu [20] подробно исследовали влияние размера частиц алюминия на инициирование реакции в композитах Al/ПТФЭ (соотношение 24/76) при квазиста-

тическом сжатии и ударе падающим грузом и обнаружили, что реакционная активность композитов, полученных при давлении 60 МПа и  $T_{\text{спек}} 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , уменьшается с увеличением размера частиц от 0,05 до 14 мкм (табл. 1). Вероятно, существует критический размер частиц, менее которого композит Al/ПТФЭ легко инициируется при сжатии. Инициирование происходит только в случае реакции композитов с размером частиц в интервале от 3 до 14 мкм. При большем размере частиц инициирование в условиях эксперимента не происходит. Для композита с размером частиц 50 нм не только высока степень полноты реакции, но и заметно возрастает ее скорость. Это можно объяснить увеличением поверхности контакта между частицами и уменьшением диффузного расстояния. С уменьшением размера частиц увеличивается реакционность и прочность композита Al/ПТФЭ [19]. Для этого композита отмечена также 100%-я полнота реакции, однако содержание активного алюминия в частицах размером 50 нм не превышает 60%, поэтому использование его для практических целей вряд ли целесообразно. Большой интерес представляет алюминий с размером частиц 150...200 нм, в котором содержание активного алюминия составляет 88...92%. В экспериментах по квазистатическому сжатию в работе [20] было показано, что бурная реакция происходит с образцами 1, 2 и 3 (табл. 1) и никакой реакции нет с образцами 4, 5 и 6.

Таким образом, эксперименты авторов работ [18–20] показали, что с увеличением размера частиц прочность и чувствительность материала при исследовании методом сжатия уменьшаются и активировать реакцию Al и ПТФЭ становится все труднее. Образцы Al/ПТФЭ, которые прошли через особую тепловую обработку, могут быть инициированы при квазистатическом прессовании.

В работе [20] было также исследовано влияние размера частиц алюминия на чувствительность композитов Al/ПТФЭ (26/74) к удару. Результаты приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что все 6 образцов Al/ПТФЭ могут реагировать при ударе падающим грузом, а высота падения груза  $H_{50}$  и энергия воспламенения  $E_i$  образца 1 – наименьшие, в то время как для образца 6 – наибольшие. Отсюда можно сделать вывод о том, что чувстви-

Таблица 1. Механические свойства образцов АІ/ПТФЭ (26/74) при квазистатическом сжатии [20]

Образец	Размер частиц АІ, мкм	Модуль эластичности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упрочнения, МПа	Разрушающее напряжение, МПа	Ударная вязкость, МДж/м <sup>3</sup>
1	0,05	410,6	22,7	33,3	79,3	74,37
2	1...2	400,7	19,8	29,5	92,8	106,38
3	6...7	352,6	14,8	26,4	89,7	116,42
4	12...14	344,9	14,1	25,3	85,6	108,98
5	22...24	340,2	14,3	25,2	82,9	97,18
6	32...34	322,4	13,6	25,0	76,4	90,47

Таблица 2. Характеристическая высота падения и энергия воспламенения образцов 1–6 [20]

Образец	Размер частиц алюминия, мкм	$H_{50}$ , см	$E_i$ , Дж
1	0,05	31,07	30,45
2	1...2	44,50	43,61
3	6...7	63,75	62,48
4	12...14	71,25	69,83
5	22...24	78,06	76,50
6	32...34	85,00	83,30

Таблица 3. Результаты испытаний на квазистатическое сжатие и испытаний падающим грузом спеченных и не спеченных композитов АІ/ПТФЭ (26,5:73,5; АІ 6...7 мкм, ПТФЭ – 25 мкм)

Давление прессования, МПа	Плотность*, г/см <sup>3</sup>	Модуль эластичности, МПа	Предел текучести, МПа	Энергия инициирования ударом, Дж
36	2,26 (2,09)	256 (108)	19,4 (12,3)	96,34 (68,75)
72	2,29 (2,25)	269 (135)	19,2 (13,1)	91,43 (70,95)
108	2,30 (2,28)	324 (146)	19,1 (15,8)	89,37 (75,36)
144	2,31 (2,29)	333 (153)	20,2 (16,1)	83,24 (79,51)
182	2,31 (2,30)	336 (160)	19,3 (17,1)	77,81 (83,56)

\* Теоретическая плотность смеси – 2,317 г/см<sup>3</sup>.

В скобках представлены результаты для не спеченных образцов [29].

тельность к удару композитов АІ/ПТФЭ уменьшается, а энергия воспламенения увеличивается по мере увеличения размера частиц алюминия. Кроме того, изменения более заметны для композитов с частицами алюминия менее 10 мкм, в то время как изменения прогрессивно уменьшаются с ростом частиц на величину более 10 мкм. Такой же вывод можно сделать из сравнения фактов отсутствия реакции в образцах 4, 5 и 6 при квазистатическом сжатии.

После удара падающим грузом в образцах 1, 2 и 3 происходит бурная экзотермическая реакция. Образцы реагируют полностью. Реак-

ции после удара в образцах 4, 5 и 6 протекают частично. С увеличением размера частиц интенсивность реакции уменьшается. Композит АІ/ПТФЭ способен к инициированию ударом, даже в случае его изготовления из порошка АІ с размером частиц 120 мкм [39].

Таким образом, в отличие от экспериментов с квазистатическим сжатием в опытах с падающим грузом реагируют все шесть образцов. Высота падения груза и энергия воспламенения увеличиваются с ростом размера частиц. Частично реагируют даже композиты, в которых размер частиц алюминия превышает 12 мкм.

В работах [31, 32, 37, 39, 40] исследовалось инициирование ударом стержней из композитов Al/ПТФЭ путем выстреливания их из газовой пушки по преграде. Исследования реакционной способности композитов Al/ПТФЭ (26,5/73,5), полученных с использованием нано- и микронных порошков компонентов, показали, что при ударе скорость выделения энергии у наноразмерных реакционных материалов выше, чем у микронных, а энергия, необходимая для зажигания, меньше [40].

Для композитов Al/ПТФЭ (28/72) с частицами алюминия размером 9 и 120 мкм порог воспламенения составил 73 и 260 МПа соответственно [32, 39]. При увеличении скорости выстреливаемого стержня с 492 до 969 м/с и силе удара с 268 до 639 МПа время задержки воспламенения уменьшается с 12 до 5 мкс для образца с размером частиц 9 мкм и с 74 до 14 мкс для образца с размером частиц алюминия 120 мкм. Световая вспышка значительно интенсивнее для композита с 9-микронным алюминием в сравнении со 120-микронным алюминием. Образцы на воздухе легче инициируются и реагируют более бурно, чем в вакууме.

Испытания также показали, что уровень энергии, требуемый для инициирования материала, был одинаковым при квазистатическом сжатии (88...100 Дж) и динамическом ударе (77...91 Дж) [18].

Весьма активно реагируют при ударе композиты Al/ПТФЭ (30/70) с размером частиц алюминия 40 и 50 нм [33, 41]. Скоростной порог инициирования для композита с частицами алюминия 40 нм составил 0,6 ( $\pm 0,1$ ) км/с, а с частицами 50 нм – 1,0 ( $\pm 0,1$ ) км/с.

Влияние размера частиц алюминия на механические свойства и реакционные характеристики материала Al/ПТФЭ при квазистатическом сжатии необходимо учитывать при оценке безопасности его изготовления.

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ Al/ПТФЭ**

Подробное исследование влияния температуры спекания на механические свойства композитов и инициирование реакции было проведено в работах [19, 20].

Анализ кривых напряжение–деформация композитов Al/ПТФЭ перед и после спекания [20] показал, что образцы после спекания имеют значительно большую прочность, чем до спекания. Feng и другие [19] считают, что изменение механических свойств РМ в зависимости от температуры спекания может быть связано с межфазными переходами ПТФЭ от кристаллической фазы до аморфной во время термообработки. Перед спеканием кристалличность ПТФЭ может превышать 90%. При температуре выше 320 °С частицы ПТФЭ начинают переходить из кристаллической фазы в аморфную и сплавляются вместе в сплошную матрицу. Это подтверждается данными сканирующей электронной спектроскопии. Перед спеканием существует много пустот и пор между частицами алюминия и ПТФЭ. После спекания, благодаря рекристаллизации ПТФЭ, частицы алюминия были очень плотно внедрены в матрицу ПТФЭ без пустот, что привело к существенному повышению прочности образца.

При квазистатическом сжатии композитов, спеченных при температурах ниже 310 °С, реакция в них не происходит. Наиболее полно реакция протекает в композитах, спеченных при температурах 330...360 °С. При температуре спекания 360 °С образец полностью реагирует.

Скорость высвобождения энергии при инициировании реакции у спеченных композитов выше, чем у не спеченных. Возможно, это связано с большей площадью контакта между частицами Al и ПТФЭ в спеченных композитах, что делает реакцию более эффективной [40].

На механические свойства композитов и их инициирование влияет также скорость охлаждения, от которой зависит переход от хрупкости к пластичности [42].

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СПЕКАНИЯ НА АКТИВНОСТЬ КОМПОЗИТОВ ПРИ УДАРЕ**

В работах [18, 19, 29] исследовали поведение композитов Al/ПТФЭ (26,5/73,5), полученных прессованием микронных порошков при давлениях от 72 до 182 МПа при воздействии на них падающего груза.

В табл. 3 приведены механические свойства образцов, полученных холодным прессованием

ем при давлениях от 36 до 182 МПа до и после спекания [29]. Для них был вычислен модуль эластичности и предел текучести.

Когда давление формования возрастает с 72 до 182 МПа, требуется в среднем на 15% меньше энергии для того, чтобы инициировать реакцию в спеченном композите Al/ПТФЭ. У образцов, не подвергнутых спеканию, увеличение давления приводит к повышению энергии, необходимой для инициирования ударом. Спекание приводит к небольшому увеличению плотности, к значительному возрастанию модуля эластичности и повышению энергии инициирования (табл. 3).

Однако в работе [43] для подобных спеченных композитов при определении минимальной энергии их воспламенения методом разделенных стержней была получена другая зависимость. С возрастанием давления формования композитов от 30 до 80 МПа минимальная удельная энергия, вызывающая воспламенение образцов, увеличивается с 97,5 до 101 Дж/см<sup>2</sup>. При дальнейшем повышении давления формования до 100 МПа энергия воспламенения уменьшается до 83,3 Дж/см<sup>2</sup>. Время воспламенения находится в пределах 600...700 мкс.

Для композитов со сравнительно небольшой плотностью (1,8 г/см<sup>3</sup>, 79% от теоретической плотности) и не подвергнутых спеканию было определено, что при скорости нагружения в несколько сотен паскалей в миллисекунду критическое давление инициирования составляет около 1,44 ГПа. Образцы с более высокой плотностью имеют близкие значения. Образцы бурно реагируют под ударной нагрузкой, а длительность реакции составляет  $\approx 1...3$  мс [8].

Исследование чувствительности к удару композитов Al/ПТФЭ с меньшей плотностью (30% от теоретической), содержанием алюминия 60% и с размерами частиц 50 нм и 10 мкм показало, что уровень энергии, требуемой для инициирования таких малоплотных образцов, существенно ниже и составляет для композита с микронным алюминием – 4,02 Дж, а для композита с наноразмерным алюминием – 3,92 Дж [6].

Работами Н. Ren с сотрудниками [43] и С. Ge [44] было подтверждено, что на порог воспламенения композитов и его задержку оказывают большое влияние размеры дефек-

тов (поры, трещины), образующихся в них при формовании. Предварительное формирование в изготовленных образцах композита зон сдвига (трещин) путем ударного нагружения способствует их инициированию и разрушению [44].

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ НА ПОРОГ ИХ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ, УДАРЕ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ**

Чувствительность образцов к инициированию в их реакции зависит также и от температуры. Например, при квазистатическом сжатии образцов композита Al/ПТФЭ (26,5/73,5) в условиях низких температур (–18, 0 и 16 °С) они разрушались с образованием трещин, но инициирования реакции при этом не происходило. При повышении температуры (22, 35 и 80 °С) во всех испытанных образцах наблюдалась бурная реакция [45].

Исследования чувствительности к удару на копре Хопкинсона такого же композита при температурах 65, 125 и 205 °С также показали, что чувствительность материала постепенно увеличивается с ростом температуры [46].

С. Ge с сотрудниками [31, 47] пришел к выводу, что давление удара и скорость деформации ответственны за инициирование реакции в композитах Al/ПТФЭ. Только тогда, когда давление удара и скорость деформации превышают критические значения одновременно, материал может быть инициирован. В данном исследовании порог давления удара и порог скорости деформации при перпендикулярном ударе стержней из композита Al/ПТФЭ составляют 735 МПа и 6500 с<sup>-1</sup> соответственно.

### **МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ Al/ПТФЭ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ И УДАРЕ**

При инициировании ударом возможны два основных механизма инициирования активных материалов, а именно – механохимический и термохимический. Возможно, что работают оба одновременно. На основе результатов экспериментов некоторые исследователи – R. Ames [48], В. Feng [49] и J. Lee и другие [50] – полагают, что реакции в композите Al/ПТФЭ при квазистати-

ческом сжатии инициируются механохимическим процессом, в результате которого происходит образование и распространение быстро развивающихся трещин в полимере. Подъем температуры в трещинах может составлять от 300 до 1000 °С. Высокая температура может способствовать предвоспламенительной реакции и разложению ПТФЭ.

О возможности термохимического процесса сообщали E. Hunt и другие [6], которые считают, что механическая нагрузка вызывает большие напряжения и повышает скорость сдвига, переводя механическую энергию в термическую, стимулирующую возгорание. X. Zhang и другие [30] также полагают, что механизмы инициирования реакции контролируются подъемом температуры от воздействия ударной волны.

В результате удара пластическая деформация и трение частиц приводят к образованию горячих точек, ответственных за инициирование [34, 35, 51].

### КОМПОЗИТЫ Al/ПТФЭ В БОЕПРИПАСАХ И В КАЧЕСТВЕ ВКЛАДЫШЕЙ ДЛЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

Использование реакционных композитов Al/ПТФЭ в качестве наполнителя (сердечника) для боеголовок, а также в качестве конструкционного материала для оболочек боеприпасов описано в ряде работ [3–5, 13, 17, 52, 53].

В бронебойном снаряде, состоящем из корпуса высокоплотного металла и внутреннего композитного сердечника, часть осевой кинетической энергии может преобразовываться в радиальную кинетическую энергию за счет различия свойств материалов корпуса и сердечника [54]. Эксперименты по проникновению снаряда подобного типа через многослойные пластины показали, что корпус снаряда генерирует большое число фрагментов из-за повышенной побочной эффективности в процессе проникновения через броню [9]. Снаряд с РМ при столкновении с алюминиевой пластиной создает комбинированный ущерб за счет кинетической и химической энергии, при этом средний диаметр перфорации в 4–19 раз превышает диаметр снаряда [55].

В последнее время повысился интерес к использованию композитов Al/ПТФЭ в качестве реакционных вкладышей (см. рисунок) для усиления поражающего действия кумулятивных зарядов [56–62]. Как правило, кумулятивный заряд реакционного вкладыша создает реактивную струю, которая проникает в желаемую цель в основном за счет своей кинетической энергии, а затем вызывает значительные эффекты взрыва за броней за счет соответствующего выделения химической энергии и газообразных продуктов [61]. Схема боевой части такого снаряда приведена на рисунке.

Результаты исследования разрушения боеприпасом многослойной мишени показали, что реакционный вкладыш создает сопутствующий ущерб благодаря выделению химической энергии в результате реакции компонентов композита. При этом тротильный эквивалент составляет 3,41–7,77, а задержка воспламенения композита – около 0,8 мс [56]. В работах [59, 60] исследовался процесс формирования реактивной струи от вкладыша с реакционным материалом Al/ПТФЭ при ударе по стальной плите, а также комбинированный эффект поражения от кинетической и химической энергии. Результаты показывают, что вкладыш из РМ может формировать почти непрерывную и прямую струю, которая формируется за более короткое время, чем струя, формируемая обычным медным вкладышем.

При исследовании влияния массы кумулятивного заряда из композита Al/ПТФЭ и времени задержки инициирования на диаметр и глубину проникновения реактивной струи в толстые стальные пластины было установлено, что по сравнению с традиционным кумулятивным снарядом снаряд с вкладышем из Al/ПТФЭ образует относительно более широкий диаметр отверстия. При этом он проникает на меньшую глубину и образует больше осколков [63, 64]. Глубина проникновения во многом зависит от времени задержки инициирования реактивной струи. С увеличением времени задержки инициирования глубина проникновения увеличивается.

В целях усиления кумулятивного действия предложен двухслойный вкладыш, состоящий из внутреннего медного вкладыша, соединенного с внешним реакционным материалом из Al/ПТФЭ

(73,5/26,5) [57]. Схема кумулятивного заряда приведена на рисунке (позиция б).

По сравнению со струей, образующейся только от реакционного вкладыша кумулятивного заряда, струя вкладыша из РМ и меди проникает глубже. Такой кумулятивный заряд соединяет в себе пенетрационную способность медной реактивной струи и выделяемую РМ химическую энергию. В то же время пенетрационная эффективность и масса РМ, проникающего в мишень, во многом зависят от толщины реакционного вкладыша и расстояния от заряда до мишени [57].

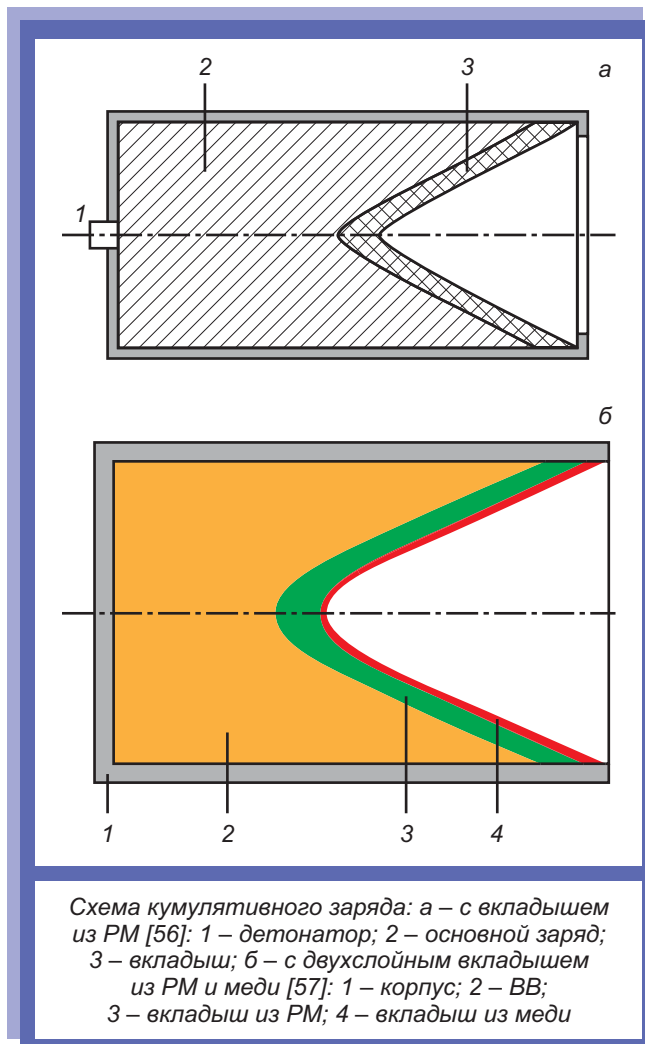
Кумулятивный боеприпас с двухслойным вкладышем, в котором медный слой является внутренним, предложен для разрушения бетонных конструкций [65]. В сравнении с кумулятивным зарядом с обычным медным вкладышем, этот заряд образует отверстие, диаметр и площадь разрушения бетона которого увеличиваются в 2–4 раза. Кроме того, РМ внутри бетонного замкнутого пространства создавал значительное избыточное давление [65].

### КОМПОЗИТЫ Al/W/ПТФЭ

Хотя композиты Al/ПТФЭ обладают высокой скоростью выделения энергии, их плотность и прочность относительно низки по сравнению с аналогичными характеристиками таких металлов, как сталь или вольфрам, что приводит к образованию слабой кинетической энергии и низкой проникающей способности.

В связи с этим в последнее время интенсивно развиваются исследования в области повышения плотности и прочности РМ, в которых в качестве основы присутствуют ПТФЭ и алюминий при сохранении энергетической эффективности и безопасности обращения с ними. Высокая плотность может повысить кинетическую энергию и способность проникания снаряда в мишень, а высокая прочность будет способствовать сохранности композита при выстреле снаряда и обеспечивать возможность разрушения РМ после пробития мишени боеголовкой, а также действие осколков в запреградном пространстве.

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов повышения плотности РМ является ввод в композит Al/ПТФЭ вольфра-



ма (W). Плотность РМ Al/W/ПТФЭ в этом случае может быть повышена до плотности стали (7,8 г/см<sup>3</sup>) или более за счет увеличения содержания вольфрама. При этом, также как и в композитах Al/ПТФЭ, в композитах Al/W/ПТФЭ при сжатии или при ударе происходит экзотермическая реакция.

Эксперименты показали, что снаряд с реакционным композитом Al/W/ПТФЭ плотностью 7,8 г/см<sup>3</sup> при ударах по алюминиевым пластинам толщиной 3 и 12 мм со скоростями от 289 до 956 м/м обладает не только аналогичной стальному снаряду проникающей способностью, но и повышенной поражающей эффективностью за счет инициирования в канале проникания дефлаграции с большим выделением энергии [66, 67].

По теплоте сгорания композиты Al/W/ПТФЭ превосходят ТНТ. Например, для композита с массовым соотношением Al/W/ПТФЭ, равном



15:50:35, экспериментально определенная теплота реакции в кислороде составила 9182 Дж/г или 38258 Дж/см<sup>3</sup>. Теплота реакции ТНТ составляет 4320 Дж/г и 7200 Дж/см<sup>3</sup>. Таким образом, массовая энергия композита более чем 2 раза больше энергии ТНТ и в 5 раз больше объемной энергии. В аргоне теплота реакции Al/W/ПТФЭ составила 3689 Дж/г [68]. Меньшая теплота реакции в аргоне и отсутствие в продуктах реакции фторидов вольфрама свидетельствуют о том, что вольфрам не реагирует с фтором. Но в продуктах реакции найдены карбиды вольфрама W<sub>2</sub>C и WC, образование которых объясняется реакцией вольфрама и углерода, активированной высокой температурой реакции фторирования алюминия [68].

Технология получения композитов Al/W/ПТФЭ в основном аналогична технологии получения композитов Al/ПТФЭ. Смесь порошков алюминия, вольфрама и ПТФЭ подвергают формованию под давлением, нагревают с определенной скоростью до температуры спекания, спекают и постепенно охлаждают [47, 68–78]. При нагревании композиты Al/ПТФЭ/W стабильны до температуры 773 К [68].

Так же, как и в случае композитов Al/ПТФЭ, на физико-химические, механические свойства композитов Al/W/ПТФЭ и порог инициирования в них экзотермической реакции оказывают большое влияние размер частиц порошков [56, 73] и соотношение компонентов [68, 71, 79, 80], давление формования, температура спекания [47, 78] и другие факторы.

Для исследования механических свойств композитов Al/W/ПТФЭ при инициировании в них экзотермической реакции в результате сжатия и удара используются те же методы, что и случае анализа композитов Al/ПТФЭ.

Композиты Al/W/ПТФЭ, содержащие мелкие частицы, имеют более высокую предельную прочность на сжатие по сравнению с композитами, содержащими крупнозернистые частицы W [56, 69, 73, 74].

Массовое соотношение компонентов играет важную роль в определении динамического поведения и режимов разрушения композитов [47, 69, 70, 73, 74]. Композиты Al/W/ПТФЭ, содержащие 5 и 14% W, деформируются при очень низкой нагрузке как при квазистатическом, так и динамическом сжатии. Результаты эксперимен-

тов с падающим грузом показали, что чувствительность к инициированию ударной нагрузкой увеличивается с увеличением содержания W [47]. До 50%-го содержания вольфрама они являются эластопластичными материалами, характеризующимися повышенным пределом текучести при увеличении скорости деформации. Однако композиты Al/W/ПТФЭ (5,5/77/17,5) с высоким содержанием вольфрама являются хрупким материалом, который демонстрирует хрупкое разрушение при относительно низкой деформации [70].

В работе [77] исследовали механические свойства, характеристики и критерии разрушения реакционных композитов Al/W/ПТФЭ с содержанием W от 20 до 80% при растяжении и сжатии. Оказалось, что прочность материалов с содержанием W от 20 до 80% колеблется от 10 до 20 МПа. Для композитов, содержащих 50% W, динамическая прочность на сжатие повышается с 60,2 до 105,6 МПа при увеличении скорости деформации в 2 раза и повышении температуры окружающей среды.

С увеличением содержания W в композитах от 50 до 80% критическая энергия инициирования реакции и нечувствительность к ударной нагрузке увеличиваются [68, 71, 81]. В то же время у композитов, изготовленных при гораздо более низкой температуре спекания и гораздо более короткой продолжительности процесса, чувствительность к ударной нагрузке повышается с увеличением содержания W [47].

Экспериментами по определению механических свойств композитов Al/W/ПТФЭ методом падающего груза при скорости удара 3,5...5 м/с (что обеспечивало скорость деформации около 4·10<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>) было установлено, что разрушению предшествует экстенсивная пластическая деформация, сконцентрированная первоначально в частицах ПТФЭ. На прочность влияет также пористость композитов. Была обнаружена очень высокая прочность 55 МПа пористых композитов (плотность 5,9 г/см<sup>3</sup>) с небольшими частицами W <1 мкм в сравнении с прочностью 32 МПа плотных композитов 7,1 г/см<sup>3</sup> с большими частицами W 44 мкм при одинаковом содержании компонентов [74].

Так же, как и в случае композитов Al/ПТФЭ, на чувствительность композитов Al/W/ПТФЭ

оказывает значительное влияние температура исследуемых образцов. Было установлено, что энергия инициирования реакции в композите с содержанием W 76,5% при ударе более чем удваивается при повышении температуры образца с 25 до 350 °С (с 74 до 153,6 Дж), особенно в интервале температур 127 и 327 °С, но почти не меняется после того, как температура достигает 327 °С [79].

В целях определения порога инициирования композитов Al/W/ПТФЭ (18,55/30/51,45), вызванного ударом, были проведены эксперименты с использованием газовой пушки и стальной мишени [82]. Было установлено, что инициирование происходит только тогда, когда ударное давление и скорость деформации одновременно превышают критические значения. В данном исследовании пороговое значение ударного давления и скорости деформации Al/W/ПТФЭ составляет 600 МПа и 5100 с<sup>-1</sup>. Стержни Al/W/ПТФЭ начинают разрушаться тогда, когда давление удара превышает 590 МПа. Стержни Al/ПТФЭ начинают разрушаться тогда, когда давление удара превышает 560 МПа. Предел текучести и ударопрочность композитов Al/W/ПТФЭ выше, чем у композитов Al/ПТФЭ.

Увеличение скорости удара является наиболее действенным способом повышения эффективности реакции, но при заданной скорости удара эффективность реакции определяется совокупным влиянием на нее содержания вольфрама и начальной пористости композита. Если скорость удара относительно низка, то увеличение содержания вольфрама и повышение пористости композита может повысить эффективность реакции. Добавление вольфрама несколько снижает теплоту реакции из-за инертности W, но существенно повышает давление удара [83].

Исследование влияния плотности реакционного материала Al/W/ПТФЭ и скорости удара на создание избыточного давления в герметичной камере после пробития тонкой алюминиевой пластины макетом снаряда с этим РМ выявило необычный эффект – рост избыточного давления за пластиной по мере увеличения плотности снаряда с 6,43 до 7,58 г/см (при увеличении содержания вольфрама с 57,4 до 76%). Хотя общая химическая энергия композита уменьшается, создается более высокое избыточное давление за мишенью при меньшей скорости удара [84].

В работе [80] было исследовано влияние содержания алюминия (от 5 до 30% при содержании W от 56 до 76%) в композитах Al/ПТФЭ/W с высокой пористостью (плотность – около 0,98 г/см<sup>3</sup>) на температуру воспламенения, скорость, температуру горения и инициирование ударной волны. Показано, что все композиции системы Al/ПТФЭ/W воспламеняются в режиме теплового взрыва на воздухе, в аргоне и вакууме. Несмотря на низкую плотность, инициируются ударом только композиты с 10...20%-м содержанием Al, так как при 5%-м содержании Al инициированию реакции препятствовал большой избыток ПТФЭ, а при 30 %-м – недостаток Al.

### ПОИСК ДРУГИХ ДОБАВОК, УЛУЧШАЮЩИХ ПРОЧНОСТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ Al/ПТФЭ

В последние годы в КНР начато интенсивное исследование эффекта добавок термитов к композитам Al/ПТФЭ. В частности, описано применение термитов алюминия с оксидами железа [85–88], меди [40, 89], висмута [86, 90], молибдена [86, 88, 91]. Было исследовано влияние добавок оксидов и соотношения компонентов на прочностные свойства композитов Al/ПТФЭ/оксид на скорость горения и пороги инициирования реакции.

Результаты показывают, что Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является наиболее эффективным окислителем для повышения эффективности реакции в системе ПТФЭ/Al, что создает наибольший факел горения. Кроме того показано, что композит ПТФЭ/Al/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (соотношение компонентов 59:23:18) обладает наилучшими характеристиками пенетрации при скорости удара 1200 м/с благодаря высокой скорости газообразования по сравнению с другими системами [86].

Исследователи считают, что композиты ПТФЭ/Al/оксид металла являются перспективным РМ, который может экзотермически реагировать как за счет реакции между алюминием и ПТФЭ, так и за счет термитной реакции между алюминием и оксидом металла. Это может расширить области применения ПТФЭ/Al, если удастся инициировать реакцию Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Однако описанный способ изготовления этих

композитов приводит к случайному распределению частиц компонентов, что препятствует полноте реакций.

В связи с тем, что добавка вольфрама не улучшает энергетические характеристики композитов Al/W/ПТФЭ, а только повышает плотность и прочность, продолжаются поиски добавок, которые, наряду с повышением плотности, не снижали или даже увеличивали бы энергосодержание композитов. В качестве такой добавки были предложены магний [92], никель [93], гидриды титана [94] и циркония [95].

### ВЫВОДЫ

Как показывает обзор литературы, на физические, механические, химические, термические и огневые свойства композитов на основе алюминия и фторопластов большое влияние оказывают размер частиц компонентов, их соотношение, условия смешения порошков, а также процесс прессования и спекания образцов.

Проведенными исследованиями было установлено, что с увеличением содержания Al предельная прочность при сжатии реакционных композитов Al/ПТФЭ сначала увеличивается, а затем уменьшается. На прочность и порог инициирования реакции большое влияние оказывает дисперсность частиц. С увеличением их размера (от 0,05 до 14 мкм) прочность и чувствительность материала при сжатии уменьшаются и активировать реакцию Al и ПТФЭ становится все труднее. В то же время при ударе реагируют и композиты с частицами алюминия размером больше 14 мкм. Скорость выделения энергии в РМ с субмикронными частицами выше, чем с микронными, а энергия, необходимая для зажигания, меньше. Прочность и порог инициирования реакции существенно зависят от температуры спекания и давления формования композитов Al/ПТФЭ. Образцы после спекания имеют значительно большую прочность, чем до спекания. Оптимальной для спекания является температура 360...370 °С. Когда давление формования возрастает с 72 до 182 МПа, требуется в среднем на 15% меньше энергии для того, чтобы инициировать реакцию в спеченном композите Al/ПТФЭ. Для образцов, не подвергнутых спеканию, увеличение давления приводит к повышению энергии, необхо-

димой для инициирования ударом. Найденные зависимости могут позволить изготавливать РМ на основе алюминия и ПТФЭ с требуемыми свойствами для боеприпасов, действующих по легкобронированной технике, бетону, обладающим запреградным действием. Как следует из анализа литературы, особый интерес представляют эти композиты в качестве вкладышей для кумулятивных боеприпасов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hastings D.L., Dreizin E. Reactive Structural Materials: Preparation and Characterization // *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 20. P. 1700631.
2. Valluri S.K., Schoenitz M., Dreizin E. Fluorine-containing oxidizers for metal fuels in energetic formulations // *Defence Technology*. 2019. Vol. 15, № 1. P. 1–22.
3. О направлениях разработки новых высокоплотных материалов для перспективных боеприпасов различного назначения / Н.А. Имховик [и др.] // *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*. 2017. Вып. 2. С. 108.
4. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия / Н.А. Имховик [и др.] // *Вооружение и экономика*. 2014. № 1 (26). С. 53–63.
5. Об исследованиях, проводимых за рубежом, по созданию новых высокоплотных реакционных материалов для перспективных боеприпасов различного назначения / Н.А. Имховик [и др.] // *Горение и взрыв*. 2017. Т. 10, № 1. С. 93–101.
6. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials / E.M. Hunt [et al.] // *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36, № 6. P. 842–846.
7. Valluri S.K., Shoenitz M., Dreizin E. Metal-rich aluminum-polytetrafluoroethylene reactive composite powders prepared by mechanical milling at different temperatures // *Journal of material Science* 2017. Vol. 52, № 12. P. 7452–7465.
8. Экспериментальное исследование ударного инициирования смеси алюминий/политетрафторэтилен / М.Х. Чжан [и др.] // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53, № 3. С. 110–114.
9. Experimental study on penetration of PELE with active core against multi-layered plates / S. Wang [et al.] // *Proceedings of the Modern Mathematics and Mechanics*; Chengdu, China. 2010. P. 182–185.
10. Losada M., Chaudhuri S. Theoretical Study of Elementary Steps in the Reactions between Aluminum and Teflon

Fragments under Combustive Environments // *Journal of Physical Chemistry A*. 2009. Vol. 113, № 20. P. 5933–5941.

11. Sorensen B. High-Velocity Impact of Encased Al/PTFE Projectiles on Structural Aluminum Armor // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 569–576.

12. Селиванов В.В., Колпаков В.И., Клименко А.В. Высокоскоростное взаимодействие фторопластовых ударников с преградами из титанового и алюминиевого сплавов // *Химическая физика*. 2008. Т. 27, № 2. С. 66–74.

13. Имховик Н.А., Свидинский А.В. Об исследованиях по разработке высокоплотных реакционных материалов и их применению в боеприпасах различного назначения // *Передача, прием, обработка и отображение информации в быстропротекающих процессах*. Сочи, 2011. С. 225–234.

14. Bošković G., Negoić D. Propellant Pyrotechnic Mixtures Based on Polytetrafluorethylene (PTFE) // *Scientific Technical Review*. 2009. Vol. 59, № 1. P. 70–76.

15. Долгобородов А.Ю., Махов М.Н., Стрелецкий А.Н. О возможности детонации в механоактивированных композициях алюминий-фторопласт // *Химическая физика*. 2004. Т. 23, № 9. С. 85–88.

16. Денисаев А.А., Штейнберг А.С., Берлин А.А. Исследование чувствительности к удару слоевых композиций алюминий-тефлон // *ДАН* 2007. Т. 414, № 5. С. 636–639.

17. Nielson D.B., Truitt R.M., Ashcroft B.N. Reactive material enhanced projectiles and related methods: пат. 9103641 США; заявл. 14.02.2012; опублик. 11.04.2015.

18. Reactions of Al-PTFE under Impact and Quasi-Static Compression / B. Feng [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015.

19. A Mechanism of Hot-spots Formation at the Crack Tip of Al-PTFE under Quasi-static Compression / B. Feng [et al.] // *Prop. Explos. Pyrotech.* 2017. Vol. 42, № 12. P. 1366–1372.

20. Investigation on Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites with Different Al Particle Size / J. Wu [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 7, № 3. P. 1–10.

21. Joshi V.S. Process for making polytetrafluorethylene-aluminum composite and product made: пат. 6547993; заявл. 09.05.2001; опублик. 15.04.2003.

22. Nielson D.B., Truitt R.M., Rasmussen N. Low temperature, extrudable, high density reactive materials: пат. 6962634 США; заявл. 08.11.2005; опублик. 12.03.2003.

23. Nielson D.B., Tanner R.L., Lund G.K. High strength reactive materials: пат. 6593410 США; заявл. 23.02.2001; опублик. 15.07.2003.

24. Nielson D.B., Tanner R.L., Lund G.K. High strength reactive materials and methods of making: пат. 7307117 США; заявл. 16.06.2003; опублик. 11.12.2007.

25. Nielson D.B., Truitt R.M., Ashcroft B.N. Reactive material compositions, shot shells including reactive materials, and a method of producing same: пат. 7977420 США; заявл. 23.02.2000; опублик. 12.07.2011.

26. Nielson D.B., Truitt R.M., Ashcroft B.N. Reactive material enhanced projectiles and related methods: пат. 8122833 США; заявл. 04.10.2005; опублик. 22.02.2012.

27. An initiation phenomenon of Al-PTFE under quasi-static compression / B. Feng [et al.] // *Chem. Phys. Lett.* 2015. Vol. 637. P. 38–41.

28. Reaction Behavior of Polytetrafluoroethylene/Al Granular Composites Subjected to Planar Shock Wave / J. Guo [et al.] // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2017. Vol. 42, № 3. P. 300–307.

29. Influence of Processing Techniques on Mechanical Properties and Impact Initiation of an Al-PTFE Reactive Material / B. Feng [et al.] // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 2016. Vol. 13, № 4. P. 989–1004.

30. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials / X.F. Zhang [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113, № 8.

31. Experimental Study on Impact-induced Initiation Thresholds of Polytetrafluoroethylene/Aluminum Composite / C. Ge [et al.] // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2017. Vol. 42, № 5. P. 514–522.

32. Mock W. Jr., Holt W.H. Impact Initiation of Rods of Pressed Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Aluminum Powders // *Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter*. 2006. P. 1097–1100.

33. Shock Initiation of Nano-Al Plus Teflon: Time-Resolved Emission Studies / X. Zheng [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. 2013. Vol. 117, № 9. P. 4866–4875.

34. Mesoscale study on the shock response and initiation behavior of Al-PTFE granular composites / L. Tang [et al.] // *Materials and Design*. 2021. Vol. 200.

35. Force chains based mesoscale simulation on the dynamic response of Al-PTFE granular composites / L. Tang [et al.] // *Def. Technol.* 2021. Vol. 17. P. 56–63.

36. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в энергетических конденсированных системах. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 256 с.

37. Osborne D.T., Pantoya M.L. Effect of Al particles size on the thermal degradation of Al/Teflon mixtures // *Combust. Sci. Tech.* 2007. Vol. 179. P. 1467–1480.

38. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение гетерогенных наноструктурных систем: обзор // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46, № 3. С. 3–30.

39. Mock W., Droter J.T. Effect of aluminum particle size on the impact initiation of pressed PTFE/Al composite rods. *AIP Conf. Proc.* 2007. Vol. 955. P. 971–974.
40. Impact Energy Release Characteristics of PTFE/Al/CuO Reactive Materials Measured by a New Energy Release Testing Device / L. Ding [et al.] // *Polymers*. 2019. Vol. 11, № 1. P. 149–172.
41. Wang J., Basset W.P., Dlott D.D. Shock initiation of nano-Al/Teflon: High dynamic range pyrometry measurements // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 121, № 8.
42. The effect of sintering and cooling process on geometry distortion and mechanical properties transition of PTFE/Al reactive materials / H.-F. Wang [et al.] // *Def. Technol.* 2020. Vol. 16. P. 720–730.
43. The Influence of Initial Defects on Impact Ignition of Aluminum/Polytetrafluoroethylene Reactive Material / H. Ren [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. 2019. Vol. 22, № 3.
44. On dynamic response and fracture-induced initiation characteristics of aluminum particle filled PTFE reactive material using hat-shaped specimens / Ch. Ge [et al.] // *Materials and Design*. 2020. Vol. 188. P. 108472.
45. Wang H.X., Fang X., Feng B. Influence of temperature on the mechanical properties and reactive behavior of Al-PTFE under quasi-static compression // *Polymers*. 2018. Vol. 10, № 1. P. 56.
46. Ren H., Li W., Ning J. Effect of temperature on the impact ignition behavior of the aluminum/polytetrafluoroethylene reactive material under multiple pulse loading // *Materials and Design*. 2020. Vol. 189. P. 108522.
47. A Study on the Mechanical Properties and Impact-Induced Initiation Characteristics of Brittle PTFE/Al/W Reactive Materials / C. Ge [et al.] // *Materials (Basel)*. 2017. Vol. 10, № 5. P. 452.
48. Ames R. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials // *In Proceedings of the 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2005.
49. A crack-induced initiation mechanism of Al-PTFE under quasi-static compression and the investigation of influencing factors / B. Feng [et al.] // *Mater. Des.* 2016. Vol. 108. P. 411–417.
50. Reactive materials studies / J. Lee [et al.] // *In Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Shock Compression of Condensed Matter*. 2006. Vol. 845. P. 169–174.
51. Losada M., Chaudhuri S. Theoretical Study of Elementary Steps in the Reactions between Aluminum and Teflon Fragments under Combustive Environments // *Journal of Physical Chemistry A*. 2009. Vol. 113, № 20. P. 5933–5941.
52. Параметры взрыва зарядов из тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций / В.Б. Яшин [и др.] // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. № 1 (13).
53. Research on the Impact Induced Deflagration Behavior by Aluminum/Teflon Projectile / J. Xiao [et al.] // *Crystals*. 2022. Vol. 12. P. 471–489.
54. Research on the Crushing Process of PELE Casing Material Based on the Crack-Softening Algorithm and Stochastic Failure Algorithm / L. Ding [et al.] // *Materials*. 2018. Vol. 11, № 9. P. 1561.
55. Interval rupturing damage to multi-spaced aluminum plates impacted by reactive materials filled projectile / S. Liu [et al.] // *Int. J. Impact Eng.* 2019. Vol. 130. P. 153–162.
56. Demolition mechanism and behavior of shaped charge with reactive liner / J. Xiao [et al.] // *Propellants, Explos. Pyrotech.* 2016. Vol. 41. P. 612–617.
57. Application of PTFE/Al Reactive Materials for Double-Layered Liner Shaped Charge/ H. Wang [et al.] // *Materials*. 2019. Vol. 12, № 17. P. 2768.
58. Mesoscale study on explosion-induced formation and thermochemical response of PTFE/Al granular jet / Y. Zheng [et al.] // *Defence Technology*. 2022.
59. Formation and Penetration of Jets by Shaped Charges with Reactive Material Liners / Y. Wang [et al.] // *Propell. Explos. Pyrotech.* 2016. Vol. 41, № 4. P. 618–622.
60. Wang H. Damage mechanism of PTFE/Al reactive charge liner structural parameters on a steel target / X.P. Zhang [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, № 13. P. 3701.
61. Behind-target rupturing effects of sandwich-like plates by reactive liner shaped charge jet / Y.F. Zheng [et al.] // *Propellants, Explos Pyrotech.* 2019. Vol. 44. P. 1400–1409.
62. Enhanced Damage Effects of Multi-Layered Concrete Target Produced by Reactive Materials Liner / J. Xiao [et al.] // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2018. Vol. 43, № 9. P. 955–961.
63. Penetration behavior of reactive liner shaped charge jet impacting thick steel plates / H. Guo [et al.] // *Int. J. Impact Eng.* 2019. Vol. 126. P. 76–84.
64. Penetration Behavior of High-Density Reactive Material Liner Shaped Charge / H. Guo [et al.] // *Materials*. 2019. Vol. 12, № 21. P. 3486.
65. Penetration and internal blast behavior of reactive liner enhanced shaped charge against concrete space / H. Zhang [et al.] // *Defence Technology*. 2022. Vol. 18, № 6. P. 952–962.
66. Damage effects of aluminum plate by reactive material projectile impact / F.Y. Xu [et al.] // *Intern. J. of Impact Engineering*. 2017. Vol. 104. P. 38–44.

67. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate / F.Y. Xu [et al.] // *Int. J. Impact Eng.* 2016. Vol. 95. P. 125–132.
68. Insensitive high-energy energetic structural material of tungsten-polytetrafluoroethylene-aluminum composites / L. Wang [et al.] // *AIP Advances*. 2015. Vol. 5.
69. Mechanical and microstructural properties of PTFE/Al/W system / J. Cai [et al.] // *Shock Compression of Condensed Matter. AIP Conference Proceedings*. 2007. Vol. 955, № 1. P. 723–726.
70. Experimental study of the compression properties of Al/W/PTFE granular composites under elevated strain rates / X.F. Zhang [et al.] // *Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 581, №1. P. 48–55.
71. Investigation on Reaction Energy, Mechanical Behavior and Impact Insensitivity of W-PTfE-Al Composites With Different W Percentage / L. Wang [et al.] // *Mater. Des.* 2016. Vol. 92. P. 397–404.
72. The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE / B. Feng [et al.] // *Polymers*. 2016. Vol. 8, № 10. P. 356.
73. Particle size effect on strength, failure and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials / E.B. Herbold [et al.] // *J. Appl. Physics*. 2008. Vol. 104, № 10.
74. Xu S., Yang Sh., Zhang W. The mechanical behaviors of polytetrafluoroethylene/Al/W energetic composites // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2009. Vol. 21, № 28. P. 285401.
75. Density Homogenization and Impact Initiation Characteristics of Porous PTFE/Al/W Reactive Materials / B. Geng [et al.] // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 10. P. 2271.
76. Quasi-static compression properties and failure of PTFE/Al/W reactive materials / F.Y. Xu [et al.] // *Adv. Eng. Mater.* 2017. Vol. 19. P. 1600350.
77. Mechanical Properties, Constitutive Behaviors and Failure Criteria of Al-PTFE-W Reactive Materials with Broad Density / T. Sun [et al.] // *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15. P. 5167.
78. Experimental study on fabrication and impact characteristics of PTFE/Al/W reactive materials with different molding pressures / B. Geng [et al.] // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1507: The 2020 Spring International Conference on Defence Technology. 2020.
79. Impact-Initiation Sensitivity of High-Temperature PTFE-Al-W Reactive Materials / T. Sun [et al.] // *Crystals*. 2022. Vol. 12, № 1. P. 30.
80. Seropian S., Saikova G., Denisov I., Petrov E. Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions / I. Saikov [et al.] // *Metals*. 2021. Vol. 11, № 9.
81. Reaction behaviors of Al/PTFE materials enhanced by W particles / H.L. Ren [et al.] // *Acta Armamentarii China*. 2016. Vol. 37. P. 872–878.
82. Experimental study on impact-induced initiation thresholds of Al/PTFE/W composite / T. Xu [et al.] // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1507, № 3.
83. Investigation on impact initiation characteristics of fluoropolymer-matrix reactive materials / J. Zhou [et al.] // *Propellants, Explos. Pyrotech.* 2017. Vol. 42. P. 603–615.
84. Behind-plate overpressure effect of steel-encased reactive material projectile impacting thin aluminum plate / Q. Yu [et al.] // *Defence Technology*. 2022. Vol. 18, № 5. P. 723–734.
85. The Mechanical and Reaction Behavior of PTFE/Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under Impact and Quasi-Static Compression / J. Huang [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 2017.
86. Influence of multi-oxidants on reaction characteristics of PTFE-Al-XmOY reactive material / J. Lan [et al.] // *Materials & Design*. 2020. Vol. 186. P. 108325.
87. Preparation and performances of the reactive Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PTFE material / Z.-M. Tao [et al.] // *Chinese Journal of Explosives and Propellants*. 2016. Vol. 41, № 4. P. 352–358.
88. A comparative study on the mechanical and reactive behavior of three fluorine-containing thermites / J. Wu [et al.] // *RSC Advanced*. 2020. Vol. 10. P. 5533–5539.
89. Experimental Study of Mechanical Properties and Impact-Induced Reaction Characteristics of PTFE/Al/CuO Reactive Materials / J. Zhou [et al.] // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 1. P. 66–84.
90. Impact-Induced Reaction Characteristic and the Enhanced Sensitivity of PTFE/Al/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites / Y. Yuan [et al.] // *Polymers*. 2019. Vol. 11, № 12. P. 2049.
91. Mechanical response and shear-induced initiation properties of PTFE/Al/MoO<sub>3</sub> reactive composites / J. Huang [et al.] // *Materials*. 2018. Vol. 11, № 7. P. 1200.
92. Effects of multi-component co-addition on reaction characteristics and impact damage properties of reactive material / S. Zhang [et al.] // *Materials Design*. 2018. Vol. 153. P. 1–8.
93. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle / J. Wu [et al.] // *Materials*. 2018. Vol. 11, № 9. P. 1741–1751.
94. Mechanical and Reaction Properties of Al/TiH<sub>2</sub>/PTFE under Quasi-Static Compression / Z.S. Yu [et al.] // *Adv. Eng. Mater.* 2018. Vol. 20, № 7.
95. Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-ZrH<sub>2</sub>-PTFE Composites under Quasi-Static Compression / J. Zhang [et al.] // *Metals*. 2019. Vol. 9. P. 421.

---

---

## ЭКОЛОГИЯ. УТИЛИЗАЦИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

УДК 623.451.083.37

### ФОСФОРСОДЕРЖАЩИЕ БОЕПРИПАСЫ И ИХ УТИЛИЗАЦИЯ

Канд. техн. наук *Н.М. ВАТУТИН*, канд. техн. наук *В.В. КОЛТУНОВ*  
(ФКП «Национальное испытательное объединение

«Государственные боеприпасные испытательные полигоны России»),

д-р техн. наук, проф. *А.Б. ТЕРЕНТЬЕВ* (Пензенский филиал ФГКУ ВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва» МО РФ),

канд. техн. наук *Д.О. ТЮКИН* (127 Центр экспертизы и испытаний средств поражения ГРАУ МО РФ)

*В работе представлены результаты многолетних исследований вопроса утилизации фосфорсодержащих боеприпасов. Приводятся анализ физико-химических свойств фосфора и конструктивных особенностей боеприпасов, а также результаты проведённых экспериментальных исследований. Предлагается безопасная, ресурсосберегающая технология термической утилизации фосфорсодержащих боеприпасов, обеспечивающая их стопроцентную переработку с получением красного фосфора, лома чёрных и цветных металлов, корпусов боеприпасов.*

**Ключевые слова:** БОЕПРИПАС; БЕЛЫЙ ФОСФОР; УТИЛИЗАЦИЯ; ПРЕОБРАЗОВАНИЕ; КРАСНЫЙ ФОСФОР; ВЫМЫВАНИЕ; СУШКА; ПРОДУКТЫ УТИЛИЗАЦИИ.

Проблема утилизации устаревших боеприпасов (БП) в настоящее время на территории России практически решена. Однако вопрос утилизации фосфорсодержащих дымовых и зажигательных БП сохраняет свою актуальность.

Существующие современные технологии утилизации БП основного назначения (осколочных, фугасных, осколочно-фугасных, кумулятивных, бронебойных, подкалиберных и др.) основаны на извлечении содержащихся в них пожаро- и

взрывоопасных веществ. Извлечение производится различными методами в зависимости от физико-химических свойств содержащихся в них веществ (плавкие и неподдающиеся плавлению) и способов снаряжения (вкладные, пресованные, литые). Указанные методы не применимы для утилизации БП, снаряженных жёлтым фосфором из-за его специфических свойств. По этой причине вопрос утилизации БП, снаряженных жёлтым фосфором, не рассматривался. Од-

Таблица 1. Подлежащие утилизации БП

Наименование	Индекс
45-мм дымовой снаряд	53-Д-240
76-мм дымовой снаряд	53-Д-350
76-мм дымовой снаряд	53-Д-350А
82-мм дымовая мина	53-Д-832С
82-мм дымовая мина	53-Д-832
82-мм дымовая мина	53-Д-832ДУ
85-мм дымовой снаряд	3-Д-2
85-мм дымовой снаряд	53-Д-367
100-мм дымовой снаряд	3-Д-3
100-мм дымовой снаряд	53-Д-412
120-мм дымовая мина	53-Д-843
122-мм дымовой снаряд	3-Д-4
122-мм дымовой снаряд	53-Д-462
122-мм дымовой снаряд	53-Д-462А
130-мм пристрелочно-целеуказательный снаряд	ЗДЦ1
152-мм дымовой снаряд	53-Д-540

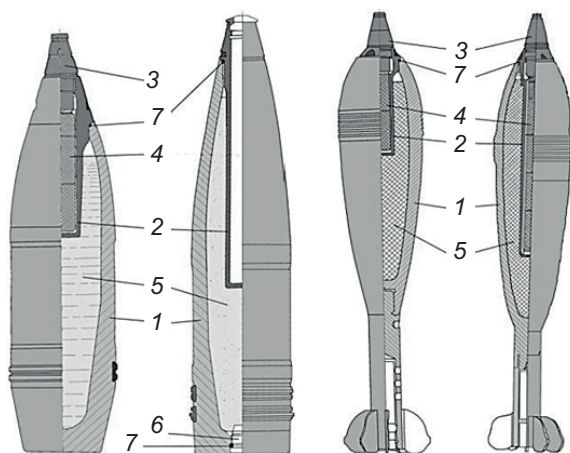


Рис. 1. Схема устройства различных типов дымовых БП: 1 – корпус; 2 – запальный стакан; 3 – взрыватель; 4 – разрывной заряд; 5 – дымообразующее вещество; 6 – пробка; 7 – свинцовая прокладка

нако номенклатура таких БП достаточно широка и включает в себя БП калибра от 45 до 152 мм, а также ручные гранаты. Учитывая, что БП в таком снаряжении, да и ещё с истекшими сроками хранения, представляют собой реальную угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций в местах их хранения [1], проблема утилизации

БП, снаряженных жёлтым фосфором, является чрезвычайно важной и актуальной.

Сложность решаемой задачи обусловлена такими специфическими физико-химическими свойствами жёлтого фосфора, как способность самопроизвольного воспламенения на воздухе, высокая токсичность как самого фосфора, так и продуктов его горения. Поэтому важнейшим условием при разработке методов утилизации фосфорсодержащих БП является соблюдение особых мер предосторожности, обеспечивающих требуемый уровень безопасности проводимых работ.

В этой связи потребовалось доскональное изучение как конструктивных особенностей БП, так и физико-химических свойств дымообразующего вещества – фосфора.

Перечень подлежащих утилизации дымовых и зажигательных фосфорсодержащих БП приведён в табл. 1.

К БП, снаряженным жёлтым фосфором, относятся дымовые, зажигательные и пристрелочно-целеуказательные. Конструкция основных типов таких БП представлена на рис. 1.

БП состоит из корпуса 1, запального стакана 2 и взрывателя 3. В запальном стакане помещается разрывной заряд 4, масса которого составляет



от 1 до 1,5% от массы всего БП. Заполнение камеры дымообразующим веществом 5 может производиться как через специальное наливное отверстие в донной части, закрываемое затем резьбовой пробкой 6 с четырёхгранной головкой, которая самосрезается в процессе её затягивания, так и через очко корпуса, закрываемое затем запальным стаканом со специальными шлицами или отверстиями для его вворачивания с помощью специального ключа. Использование самосрезающейся пробки делает её практически неизвлекаемой.

Камера заполняется дымообразующим веществом на 95...98%, что составляет от 10 до 15% от массы БП. Во всех случаях для обеспечения герметичности и предупреждения просачивания дымообразующего вещества наружу детали корпуса свинчиваются на суриковой (свинцовой или железной) замазке с установкой специальных свинцовых прокладок 7.

Корпуса БП, предназначенные для снаряжения фосфором через донное отверстие, отличаются тем, что запальный стакан устанавливается непосредственно на механическом заводе без использования свинцовой прокладки только на суриковой замазке, но с последующей закаткой стыка между запальным стаканом и корпусом [2].

Следует обратить внимание на то, что наряду с БП, снабжёнными длинным запальным стаканом, т. е. имеющими длину, близкую к глубине камеры (для большего дымообразования), встречаются и БП с коротким запальным стаканом (для повышения зажигательного действия).

Конструкции запальных стаканов бывают двух типов – цельные и сборные. Если цельный запальный стакан представляет собой глухой стальной стакан, изготовленный из одного куска металла методом штамповки с последующим обтачиванием и нарезкой резьбы, то сборные запальные стаканы представляют собой составную конструкцию из корпуса в виде стальной трубы, к верхней части которой приварена головка с наружной и внутренней резьбами, а в нижнюю часть через прокладку вставлено стальное дно и обжато на прессе. В некоторых сборных запальных стаканах в качестве материала прокладки вместо свинца используется резина. Недостатком этой конструкции является то, что при длительном хранении возможно

старение резины с потерей эластичных свойств. Хотя наличие механической закатки стыка и обжатие соединения на прессе должны обеспечивать необходимую герметичность данного соединения при хранении и проведении работ по утилизации БП.

Таким образом, конструкция снаряда обеспечивает герметичность, а если рассматривать корпус БП как сосуд, работающий под давлением, то с учётом его толстостенности и малого внутреннего диаметра он может выдерживать достаточное внутреннее давление. Учитывая, что температура плавления свинца, используемого для изготовления уплотнительных прокладок, составляет 600,5 К (327,5 °С), можно сделать вывод о том, что БП способны обеспечить герметичность при температурах до 573 К (300 °С).

Из-за высокой взрывоопасности дымовых БП в арсеналах, на базах и складах Минобороны России они хранятся в неокончательно снаряженном виде. Поэтому на утилизацию БП, снаряженные жёлтым фосфором, поступают без взрывателя и разрывного заряда. Но даже при получении БП в окончательно снаряженном виде, удаление взрывателя и разрывного заряда не составляет особых трудностей, так как разрывной заряд свободно вкладывается в запальный стакан и поджигается хвостовиком взрывателя.

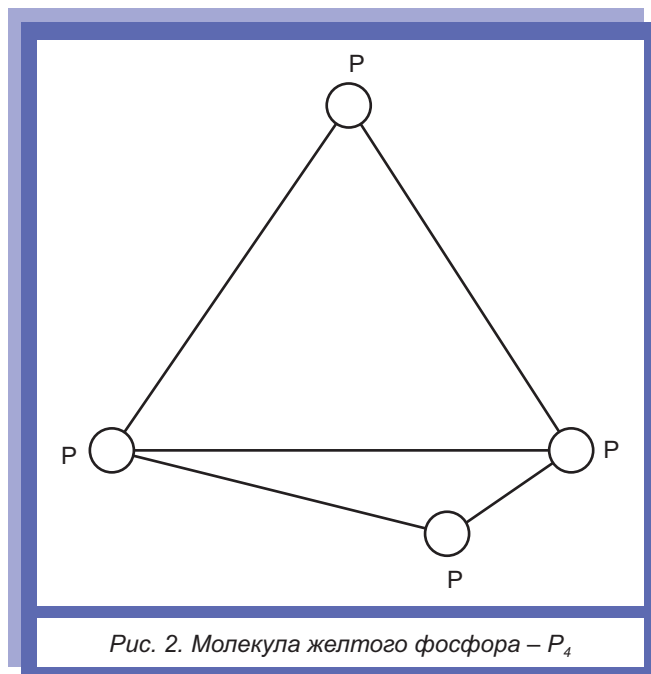
Проведённый анализ конструктивных особенностей БП показал возможность извлечения из них дымообразующего состава. Для этого могут быть использованы следующие методы:

разборка БП посредством вывинчивания запального стакана по имеющемуся резьбовому соединению с использованием для этого штатных мест для фиксации специального ключа;

разрушение корпуса БП посредством надрезания стенки с последующим разламыванием корпуса по ослабленному сечению;

просверливание сквозных отверстий в стенке корпуса БП по кратчайшему направлению в нижней части камеры БП.

Рассмотрим основные физико-химические свойства дымообразующего вещества, в данном случае – жёлтого фосфора. Жёлтым фосфором называется неочищенный белый фосфор, который в присутствии примесей – следов красного фосфора, мышьяка, железа и т.п. – окрашивается



в жёлтый цвет, поэтому товарный белый фосфор и называется жёлтым [3]. Белый (жёлтый) фосфор является одной из аллотропических модификаций элементарного фосфора.

Фосфор – химический элемент V группы периодической системы Д.И. Менделеева, имеющий атомный номер 15 [4]. Из-за высокой химической активности в свободном состоянии в природе фосфор не встречается. Элементарный фосфор в обычных условиях представляет собой несколько устойчивых аллотропических модификаций. Обычно выделяют четыре модификации простого вещества – белый, красный, черный и металлический фосфор. Иногда их ещё называют главными аллотропными модификациями, подразумевая при этом, что все остальные являются разновидностью указанных четырёх. В обычных условиях существует только три первых аллотропических модификации фосфора – белый, красный и чёрный. Все модификации различаются по цвету, плотности и другим физическим характеристикам, также существует тенденция к резкому убыванию химической активности при переходе от белого к чёрному фосфору.

Наиболее распространён белый (желтый) фосфор. Он имеет молекулярную решетку, в узлах которой находятся тетраэдрические молекулы P<sub>4</sub> (рис. 2).

Белый фосфор представляет собой вещество белого цвета (из-за примесей может иметь жел-

товатый оттенок) со специфическим чесночным запахом. Температура плавления 317 К (44 °С). Плотность белого фосфора из всех его модификаций наименьшая и составляет около 1,82 г/см<sup>3</sup>. Белый фосфор не только активен химически, но и ядовит – он вызывает поражение костей, костного мозга, некроз челюстей. Летальная доза белого фосфора составляет 0,05...0,15 г. ПДК паров фосфора в воздухе рабочей зоны производственных помещений составляет 0,03 мг/м<sup>3</sup>. Технический белый фосфор называют жёлтым. Из-за наличия примесей удельный вес желтого фосфора составляет 1,83 г/см<sup>3</sup>, плавится он при 307 К (34 °С), кипит – при 553 К (280 °С). В воде практически не растворяется – растворимость при 25 °С составляет менее 3,3·10<sup>-4</sup>%, что позволяет осуществлять его безопасное хранение под водой. На воздухе жёлтый фосфор легко окисляется и самовоспламеняется. При нагревании жёлтого фосфора в течение нескольких часов без доступа воздуха при температуре порядка 523...573 К (250...300 °С) из него может быть получен красный фосфор. Этот переход является экзотермическим и может быть ускорен ультрафиолетовыми лучами, а также такими примесями, как йод, натрий, селен.

Горит жёлтый фосфор ослепительным ярко-зеленым пламенем с выделением густого белого дыма – мелких частичек декаоксида тетрафосфора P<sub>4</sub>O<sub>10</sub>, который сушит слизистые оболочки, вызывает кашель, удушье, отёк лёгких, ожоги на коже, поэтому сжигание фосфора является опасной операцией, проведение которой требует соблюдения особых правил техники безопасности. Сжигание фосфора можно производить на открытой площадке, окопанной канавой, в радиусе не менее 1 км от которой не должно быть жилых помещений, общественных зданий, дорог и зелёных насаждений, ничего живого [5]. Известны случаи, когда с целью снижения вредного воздействия перед сжиганием жёлтый фосфор перемешивают с сырой глиной. Но во всех случаях проведение данного процесса без использования специального технологического оборудования, обеспечивающего герметичность и полное улавливание продуктов сгорания, наносит значительный ущерб окружающей природе и является абсолютно неприемлемым.

Для тушения фосфора с целью снижения температуры очага возгорания и перевода фосфора в твердое состояние используют воду в больших количествах или раствор сульфата меди (медного купороса). После гашения фосфор засыпают влажным песком, при этом насыщенный раствор сульфата меди связывает фосфор в безопасные соединения. Для предохранения от самовозгорания желтый фосфор хранится и перевозится под слоем воды (при отрицательных температурах – в растворах хлористого кальция или хлористого натрия).

Название «красный фосфор» относится к нескольким модификациям, различающимся по плотности и окраске. Окраска колеблется – от оранжевой до темно-красной и даже фиолетовой. Красный фосфор, образующийся при нагревании белого до 320 °С без доступа воздуха, является рентгеноаморфным, при дальнейшем нагревании до 560 °С переходит в кристаллическое состояние за счет разрыва одной связи Р–Р в тетраэдре  $P_4$  и дальнейшего связывания оставшихся групп в цепи, кольца и трубки (рис. 3). Такая полимеризация приводит к упрочнению связи Р–Р, увеличению плотности и температуры плавления до 600 °С и уменьшению реакционной способности.

Красный фосфор – более термодинамически стабильная модификация элементарного фосфора, его химическая активность значительно ниже, чем у белого [6]. Он нерастворим в воде, после замачивания может быть высушен и использован по назначению. Красный фосфор на воздухе не самовоспламеняется, вплоть до температуры 513...523 К (240...250 °С) при переходе в белую форму во время возгонки, но самовоспламеняется от трения или удара. Его ядовитость в тысячи раз меньше, чем у белого, поэтому он находит широкое применение в промышленности, в том числе и в пиротехнике.

Таким образом, выполненный анализ физико-химических свойств дымообразующего вещества позволил установить, что:

уничтожение БП, снаряженных жёлтым фосфором, методом сжигания с соблюдением экологических требований без использования мощных очистных установок, обеспечивающих герметичность, сбор и улавливание образующихся продуктов горения, не представляется возможным;

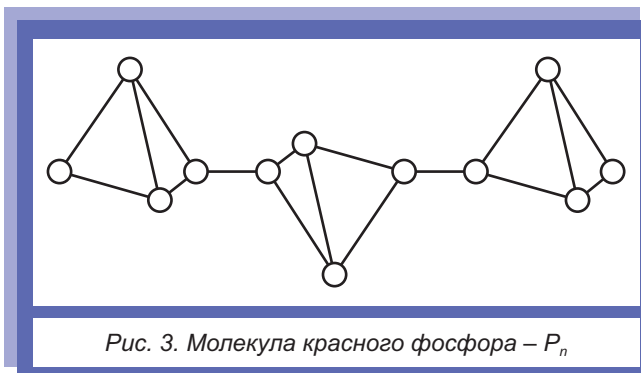


Рис. 3. Молекула красного фосфора –  $P_n$

для изоляции жёлтого фосфора от атмосферного воздуха может быть использована при положительных температурах вода, а при отрицательных температурах – водные солевые растворы.

На основании проведённого анализа были сделаны предположения о принципиальной возможности организации безопасной утилизации дымовых и зажигательных БП, снаряженных жёлтым фосфором, при соблюдении следующих условий:

для исключения контакта извлекаемого жёлтого фосфора с воздухом развинчивание, разламывание или сквозное просверливание корпуса, а также слив и хранение жёлтого фосфора должны проходить под водой на глубине не менее 0,3 м;

извлечение жёлтого фосфора из каморы БП должно производиться методом слива при температуре, превышающей температуру его плавления, т.е. не менее 308 К (35 °С), но не выше температуры кипения воды 373 К (100 °С). Оптимальной можно считать температуру, при которой проходило снаряжение БП фосфором  $346 \pm 5$  К ( $73 \pm 5$  °С);

наличие вытяжной вентиляции над местом проведения работ;

пустой корпус после слива из него жёлтого фосфора с целью исключения возможности сохранения в нём остатков фосфора и обеспечения полной безопасности должен в обязательном порядке промываться нейтрализующим раствором, представляющим собой насыщенный водный раствор медного купороса [7];

хранение извлечённого жёлтого фосфора должно осуществляться в металлических бочках вместимостью до 250 л, толщиной стенки не менее 0,002 м (2 мм) с герметически закрывающей-

ся пробкой под водным раствором хлористого кальция или хлористого натрия с плотностью  $1,16...1,18 \text{ г/см}^3$ , исключающей возможность замерзания раствора при отрицательных внешних температурах.

Наиболее распространенным способом утилизации снаряженных жёлтым фосфором БП является слив фосфора под водой, технологический процесс которого можно описать следующим образом [8, 9]:

предварительно прогретый до температуры  $338 \pm 278 \text{ К}$  ( $65 \pm 5 \text{ °С}$ ) корпус БП без взрывателя и разрывного заряда погружается в обогреваемую технологическую емкость, заполненную горячей водой при температуре  $338...343 \text{ К}$  ( $65...70 \text{ °С}$ );

в емкости БП надежно закрепляется в таком положении, чтобы предполагаемое выходное отверстие находилось в нижней части камеры;

сверлом в корпусе делается сквозное отверстие. В связи с тем, что плотность фосфора больше плотности воды, после образования сквозного отверстия расплавленный жёлтый фосфор под собственным весом вытекает из камеры в технологическую емкость и собирается в ее нижней части;

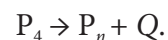
пустой корпус после вытекания фосфора не вынимается из воды и передается на операцию нейтрализации, которая обеспечивает абсолютную безопасность при дальнейшем обращении с ним.

Собранный под водой в емкостях для хранения жёлтый фосфор может храниться неограниченное время. При работе со сливом необходимо соблюдать специальные меры безопасности.

Более перспективным и безопасным является метод превращения жёлтого фосфора в красный непосредственно в корпусе снаряда с последующим его извлечением.

Данный метод основан на процессе образования красного фосфора из жёлтого (белого) при длительном нагревании жидкого жёлтого фосфора в закрытом сосуде без доступа воздуха при температуре порядка  $523...533 \text{ К}$  ( $250...260 \text{ °С}$ ).

В этих условиях происходит переход из одной аллотропной модификации фосфора (белый фосфор) в другую (красный фосфор), осуществляемый по следующему химическому уравнению:



Для протекания химической реакции жёлтый фосфор должен находиться в закрытом сосуде. В таком случае закрытым сосудом (химическим реактором) может быть сам корпус БП. Он остаётся герметичным, так как температура плавления свинцовой прокладки (в месте крепления запального стакана) составляет  $600 \text{ К}$  ( $327 \text{ °С}$ ).

Технологический процесс получения красного фосфора может быть организован следующим образом:

корпус снаряда без взрывателя и разрывного заряда помещается в муфельную печь, где на протяжении нескольких часов выдерживается при температуре  $523...533 \text{ К}$  ( $250...260 \text{ °С}$ );

в результате реакции полимеризации, протекающей в камере снаряда, происходит преобразование жёлтого фосфора в красный;

по истечении установленного периода корпус снаряда вынимается из муфельной печи и охлаждается;

извлекается красный фосфор.

Данный метод обеспечивает полную утилизацию БП, конечным продуктом которой является технический красный фосфор. В дальнейшем он может быть вторично использован в пиротехнике, спичечном производстве, для изготовления новых дымовых БП и т.п.

Были проведены экспериментальные исследования данного метода. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.

Подготовленный корпус БП 1 без взрывателя, разрывного заряда и пластмассовой пробки устанавливается вертикально в муфельную печь 2. В печи за счёт электрических нагревательных элементов 3 происходит разогрев БП до температуры  $523...533 \text{ К}$  ( $250...260 \text{ °С}$ ), достаточной для протекания реакции перехода. Поддержание температуры на постоянном уровне в течение заданного периода времени обеспечивается автоматическим регулятором 4 через термодатчик 5. Регулятор включает или выключает нагревательные элементы, а в случае превышения заданной температуры (за счёт тепла выделяющегося в процессе проведения реакции перехода) дополнительно включает воздушный вентилятор 6 для подачи воздуха и принудительного снижения температуры.

Для определения оптимальных режимов перехода фосфора была использована партия 122-мм БП (индекс 3-Д-4) в количестве 600 штук. В муфельную печь загружалось одновременно по 20 корпусов и через каждые 2 часа производился забор одного корпуса БП. Таким образом, был исследован диапазон режимов – от 10 до 48 часов и по температурным режимам – от 453 К (180 °С) до 573 К (300 °С) с шагом в 293 К (20 °С).

После извлечения из печи и охлаждения БП до температуры окружающей среды, его корпус разрезался на дистанционно управляемом станке для исследования процесса перехода жёлтого фосфора в красный (рис. 5, а, б, в).

На разломе дымообразующего состава (рис. 5, б, в) хорошо видна степень процесса преобразования фосфора и его послойный характер.

В результате проведённых экспериментальных исследований были подтверждены выдвинутые ранее предположения:

конструкция корпуса БП выдерживает без разгерметизации внутреннее давление паров желтого фосфора, которое в процессе проведения реакции перехода может достигать 133,3 кПа (1,36 кгс/см<sup>2</sup>);

температура плавления свинца, используемого для изготовления уплотнительных прокладок, больше требующейся для проведения процесса перехода, что обеспечивает требуемую герметичность корпуса в процессе проведения реакции перехода.

Предположение о том, что увеличение плотности фосфора в процессе проведения реакции перехода может привести к уменьшению его объёма и, следовательно, к появлению зазора между запальным стаканом и образовавшимся брикетом красного фосфора, не подтвердилось.

Кроме того, проведенные исследования доказали возможность безопасного обращения с увлажнённым до 5 % красным фосфором.

Предложенная технология термической утилизации фосфорсодержащих БП, основанная на проведённых исследованиях, состоит из следующих основных этапов [10, 11]:

- подготовительные операции;
- термическое преобразование желтого фосфора в красный;
- удаление запального стакана;
- извлечение красного фосфора;

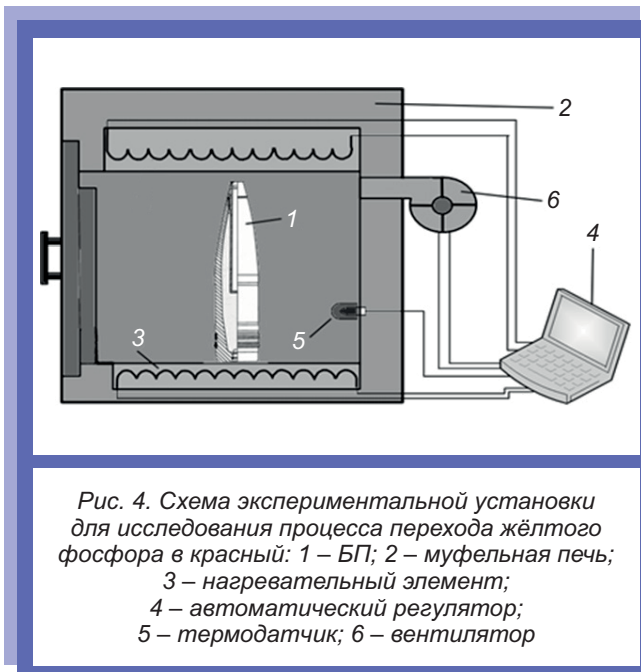


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования процесса перехода жёлтого фосфора в красный: 1 – БП; 2 – муфельная печь; 3 – нагревательный элемент; 4 – автоматический регулятор; 5 – термодатчик; 6 – вентилятор



Рис. 5. Процесс разрезки корпуса 122-мм снаряда (а) и вид разлома дымообразующего состава (б, в) в ходе изучения преобразования фосфора

сушка красного фосфора;  
подготовка полученных продуктов утилизации к отгрузке потребителям.

Подготовительные операции включают в себя извлечение подлежащих утилизации БП из укупорки, удаление консервационной смазки и транспортировочных пробок.

Перевод желтого фосфора в красный в целях обеспечения безопасности последующих работ с БП проводят путем их прогрева в течение нескольких часов при температуре до 573 К (300 °С) в электрической низкотемпературной камерной печи (рис. 6). Изделия, прошедшие предварительную подготовку, укладываются на выкатную этажерку, входящую в состав комплекта печи. Заполненная этажерка помещается в печь. Температура в печи поддерживается автоматически и регулируется по трем точкам с целью предотвращения перегрева.



Рис. 6. Камерная печь с выдвигаемым подом

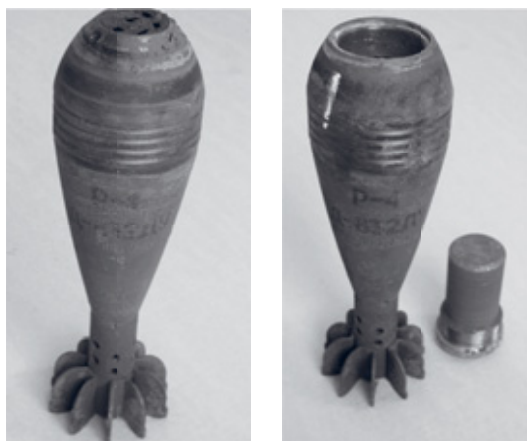


Рис. 7. 82-мм мина, снаряженная фосфором через окошко до (а) и после (б) вывинчивания короткого запального стакана

Удаление запального стакана является опасным процессом в связи с повышенной чувствительностью красного фосфора к механическим воздействиям и поэтому проводится дистанционно. Как показано на рис. 7, запальные стаканы БП, снаряженные через окошко, удаляются методом вывинчивания.

У БП, снаряженных через специальное наливочное отверстие (рис. 8), требуется предварительно срезать закатанную на механическом заводе после установки запального стакана часть оживала корпуса снаряда, а уже затем производить дистанционное извлечение самого запального стакана.



Рис. 8. 122-мм снаряды, снаряженные через наливочное отверстие до и после срезания закатанной части для последующего извлечения запального стакана

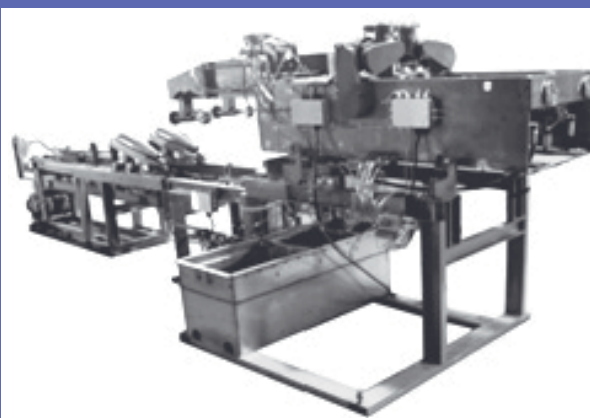


Рис. 9. Общий вид установки гидрокавитационного вымывания ГKM 4 (шибер и насосы высокого давления не показаны)

В связи с тем, что красный фосфор чувствителен к трению и нерастворим в воде, его извлечение из камеры БП производится наиболее безопасным методом гидрокавитационного вымывания струей воды высокого давления на установке гидрокавитационного вымывания ГKM 4 (рис. 9). Этот метод обеспечивает высокую степень безопасности извлечения фосфора, так как исключает сухое трение.

Основные технические характеристики установки ГKM 4 указаны в табл. 2.



Рис. 10. Станция механической очистки отработанной воды OPAL



Рис. 11. Общий вид установки сушки красного фосфора в псевдокипящем слое

Таблица 2. Технические характеристики установки ГKM 4

Параметр	Значение
Производительность по вымытому продукту, кг/ч	20...40
Мощность, кВт	120
Калибр обрабатываемых изделия, мм	76...152
Объем заправляемой воды, м <sup>3</sup>	4,3
Рабочее давление воды, МПа	25...30
Габаритные размеры, м	6,4×2,0×1,7

На данной установке под действием кавитирующих водяных струй воды высокого давления производится разрушение полученных в результате термического преобразования брикетов красного фосфора и его вымывание из камеры. Под воздействием кавитирующих струй твёрдая масса полученного красного фосфора измельчается и вместе с отработанной водой выходит из камеры БП в виде водной суспензии. При этом сама установка работает по замкнутому водооборотному циклу.

Отделение красного фосфора из отработанной водяной суспензии производится с помощью вакуумной центрифуги [12], а окончательная очистка фильтрата до оборотной воды осуществляется на автоматической станции механической очистки OPAL 2» DOROT Valve, PP Manifold (рис. 10).

Очищенная таким образом вода через отстойник-охладитель и насосы высокого давления возвращается на установку ГKM 4.

Извлеченный красный фосфор в виде увлажненной массы передаётся на установку сушки в псевдокипящем слое (рис. 11).

Высушенный таким образом красный фосфор упаковывается и отправляется потребителям.

После извлечения красного фосфора пустые корпуса БП и запальных стаканов подлежат обжигу. При необходимости у артиллерийских снарядов производится операция по снятию медного ведущего пояска. Полученный таким образом лом чёрных и цветных металлов в установленном порядке сдаётся на вторичную переработку. Корпуса БП в хорошем состоянии могут использоваться для повторного снаряжения с целью использования в качестве практических БП.

На основании разработанной технологии термической утилизации фосфорсодержащих БП в рамках реконструкции и технического перевооружения испытательных комплексов на ФКП «НИО «ГБИП России» завершаются

работы по созданию соответствующего опытно-промышленного производства.

Создаваемое ресурсосберегающее производство в пересчёте на 122-мм дымовой снаряд должно обеспечивать в год:

утилизацию до 300 тыс. шт. снарядов;

получение до 5,4 тыс. т лома чёрных и до 30 т цветных металлов;

получение до 1,08 тыс. т красного фосфора.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана безопасная, ресурсосберегающая технология термической утилизации фосфорсодержащих БП, которая позволяет обеспечить их стопроцентную переработку и получение продуктов утилизации (красный фосфор, корпуса боеприпаса, чёрный лом и цветные металлы).

2. Предложенная технология имеет высокую степень промышленной и экологической безопасности.

3. По разработанной технологии создаётся опытно-промышленное производство утилизации фосфорсодержащих БП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисейчиков Н.И. Методологические аспекты прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций в местах хранения взрывчатых материалов. СПб.: Наука и военная безопасность, 2007. № 1. С. 38–41.

2. Третьяков Г.М. Боеприпасы артиллерии. М.: Военное Издательство Министерства Вооруженных Сил Союза ССР, 1947. 268 с.

3. Везер В.-Дж. Фосфор и его соединения. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 690 с.

4. Реми Г. Курс неорганической химии. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. Т. 1. 922 с.

5. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. издание / А.Н. Баратов [и др.]. В 2-х кн. М.: Химия, 1990. Кн. 2. 384 с.

6. ГОСТ 8655–75 Фосфор красный технический. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 12 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018928> (дата обращения: 12.04.2022).

7. Правила безопасности химически опасных производственных объектов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573171533> (дата обращения: 12.04.2022).

8. Способ расснаряжения боеприпасов: пат. 2493537 Рос. Федерация № 2012106470 / Н.М. Ватутин [и др.] // ФКП «НИИ «Геодезия». 7 с.; заявл. 24.02.2012; опублик. 20.09.2013.

9. Поэтапное изучение термического метода утилизации фосфорсодержащих боеприпасов / Н.М. Ватутин [и др.] // Сб. тр. XI Всерос. конф. «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» (ICOS'2017). М.; Ижевск: ИМ УрО РАН, 2017. С. 89–91.

10. К вопросу о разработке способа преобразования желтого фосфора в красный непосредственно в камере дымовых боеприпасов / А.В. Касаткин [и др.] // Известия Тульского государственного университета «Технические науки». Тула, 2017. Вып. 11, ч. 3. С. 9–22.

11. Способ расснаряжения боеприпасов, снаряженных желтым фосфором: пат. 2550894 Рос. Федерация № 2014100783 / А.В. Вагин [и др.] // ФКП «НИИ «Геодезия». 8 с.; заявл. 14.01.2014; опублик. 20.05.2015.

12. Вакуумная центрифуга: пат. 2631951 Рос. Федерация № 2017101647 / В.В. Колтунов [и др.] // ФКП «НИИ «Геодезия». 12 с.; заявл. 19.01.2017; опублик. 29.09.2017.





---

---

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

---

УДК 623.451.746.1

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ SIMINTECH ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АВТОНОМНОГО ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ПЛАНИРУЮЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Канд. техн. наук А.С. ДЗЮБА (АО «Научно-производственное объединение «Базальт»),  
Ф.Д. ТРОФИМОВ  
(ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»)

*Рассматриваются условия для создания отечественных математических моделей в области беспилотных планирующих летательных аппаратов. Проводится анализ возможностей интерфейса, а также точности вычислений и сопоставление с существующей верифицированной математической моделью и результатами натурной работы.*

**Ключевые слова:** СРЕДА ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ; БЕСПИЛОТНЫЙ ПЛАНИРУЮЩИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ; ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.

### ВВЕДЕНИЕ

Среда динамического моделирования технических систем SimInTech разработана отечественной компанией ООО «ЗВ Сервис» и является аналогом известной программной среды моделирования MATLAB американской компании MathWorks.

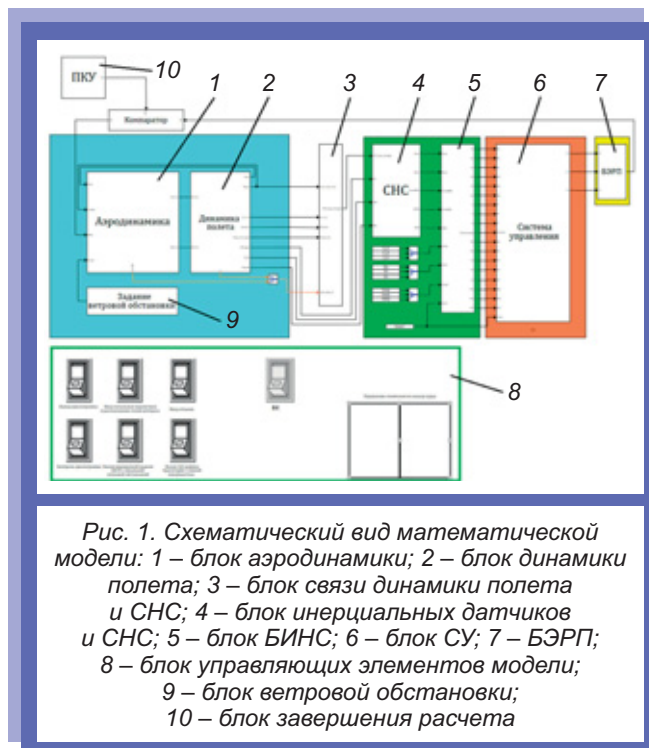
Разработчиком SimInTech предоставляется широкая номенклатура стандартных элементов для синтеза математических моделей применительно к различным областям науки и техники, например, систем управления, динамики движе-

ния в атмосфере и вне ее и т. д. Эта номенклатура постоянно совершенствуется и пополняется.

В статье обобщается опыт применения среды динамического моделирования SimInTech в области беспилотных планирующих летательных аппаратов (БППЛА), предназначенных для точной доставки полезной нагрузки в заданную точку пространства.

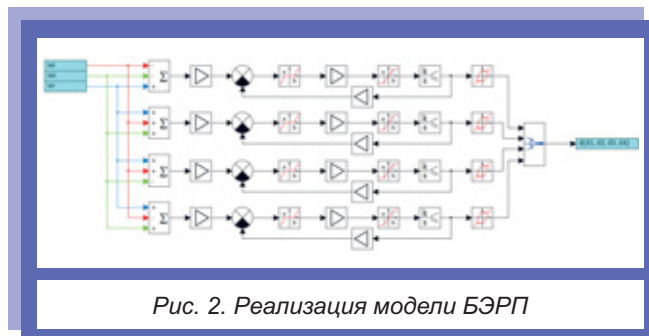
### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БППЛА

В SimInTech комплексные математические модели создаются путем разработки, настрой-

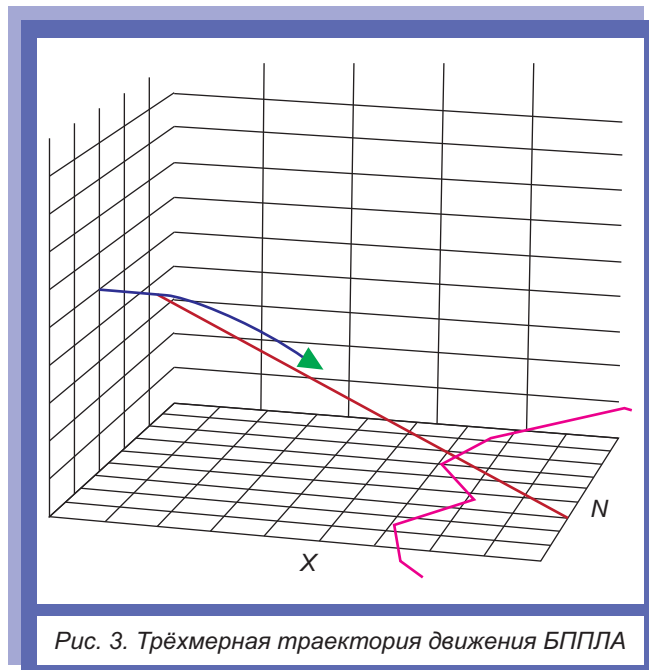


ки и сопряжения некоторых элементарных или стандартных блоков, их свойств, сигналов и связей, которые функционируют в общем модельном пространстве. Модель БППЛА на главном (верхнем) уровне была составлена из образцов (и соответствующих блоков) аэродинамики, динамики полета, системы управления (СУ), бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), блоков инерциальных датчиков линейных ускорений и угловых скоростей, модели спутниковой навигационной системы (СНС), блока электрических рулевых приводов (БЭРП), а также ряда других составляющих элементов для удобного управления процессом моделирования. На рис. 1 показан верхний уровень математической модели БППЛА, как он сформирован в среде SimInTech.

В представленной модели каждый из блоков имеет свою собственную структуру, которая «раскрывается» при перемещении на уровень «вглубь». Например, БЭРП имеет довольно объемную и сложную структуру, отражающую практически все значимые функциональные свойства и особенности этого устройства (рис. 2).



Важной особенностью SimInTech стала возможность динамической визуализации графиков в трехмерном виде. На рис. 3 показана траектория движения БППЛА. В самой среде моделирования этот график можно отображать в реальном времени, а также вращать и масштабировать, получая максимум информации о протекающем моделировании.



Управление процессом моделирования осуществляется специальными элементами, которые задают начальные и конечные параметры, управляющие узлами и системами, а также позволяют регистрировать события и выводить циклограммы моделирования.

Среда SimInTech имеет в своём составе инструменты по созданию графических интерфейсов к разрабатываемым моделям. Примером может служить окно ввода начальных данных (рис. 4), в составе которого панели ветровой обстановки и окна ввода отказов.

### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

В рамках разработки математической модели БППЛА была произведена верификация,

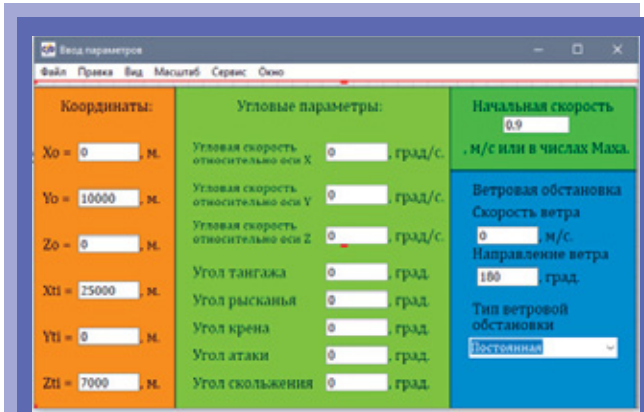


Рис. 4. Внешний вид окна ввода начальных данных и ветровой обстановки

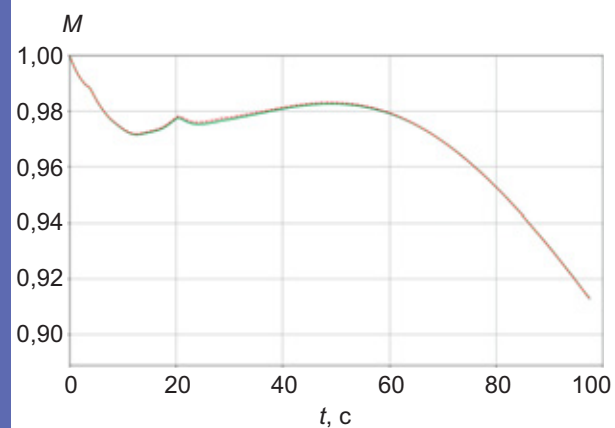


Рис. 6. Изменение числа Маха полета БППЛА по времени: ———— – MATLAB; - - - - - SimInTech

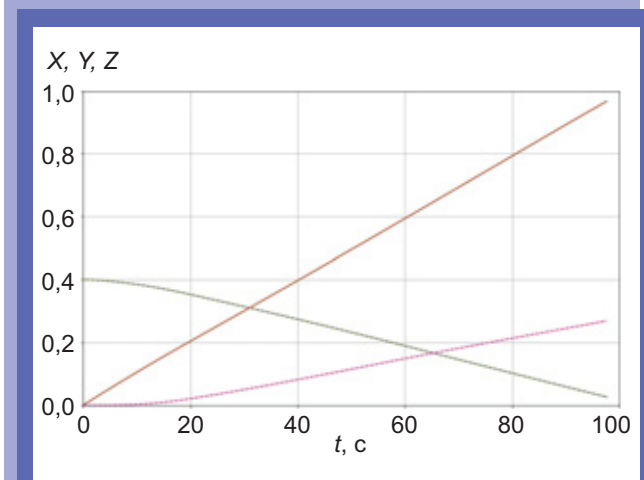


Рис. 5. Изменение координат центра масс БППЛА в пространстве в ЗСК: ———— – MATLAB; - - - - - SimInTech

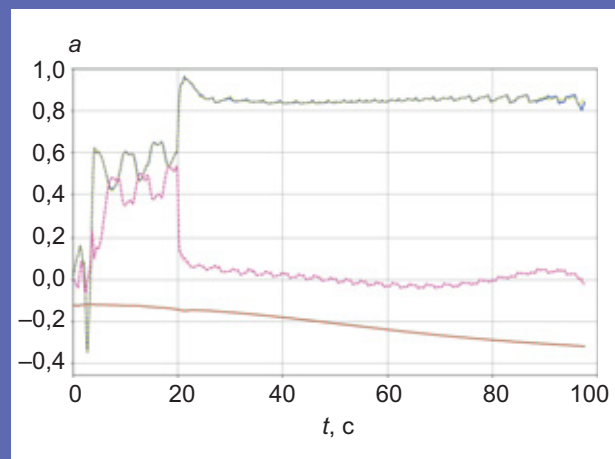


Рис. 7. Изменения линейных ускорений БППЛА в ЗСК: ———— – MATLAB; - - - - - SimInTech

основанная на сравнении результатов расчета с моделью динамики полета, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB.

Для тестирования был произведен математический эксперимент в обеих средах динамического моделирования с одинаковыми исходными данными и расположением точки интереса, а также настройками внешней среды. В качестве метода интегрирования был выбран метод Эйлера с шагом 0,004 с.

Результаты моделирования после проведения нормировки данных представлены на рис. 5–10 в виде сводных графиков изменения положения центра масс моделируемого БППЛА в пространстве в земной системе координат (ЗСК), ветровой скорости, выраженной в числах Маха,

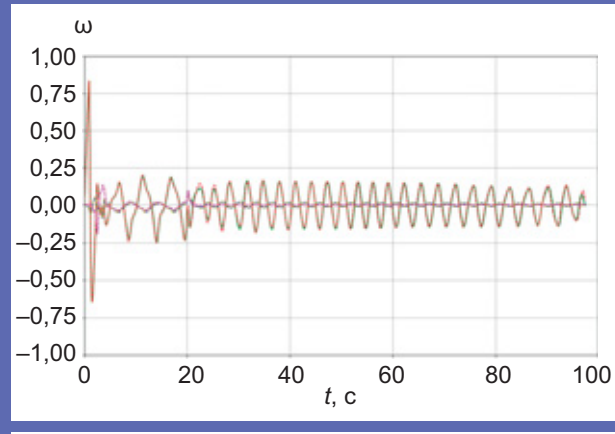


Рис. 8. Изменение угловых скоростей БППЛА в ЗСК: ———— – MATLAB; - - - - - SimInTech

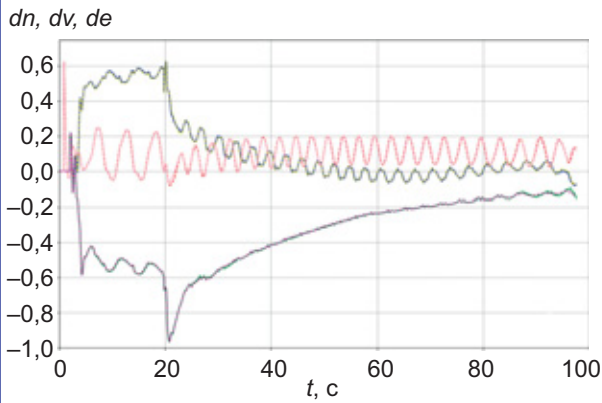


Рис. 9. Изменение управляющих сигналов:  
 ———— — MATLAB; - - - - - SimInTech

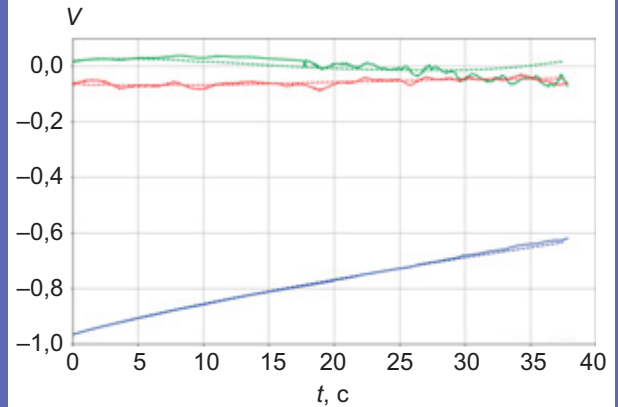


Рис. 12. Проекция скорости БППЛА на оси ЗСК:  
 ———— — натурные испытания;  
 - - - - - SimInTech

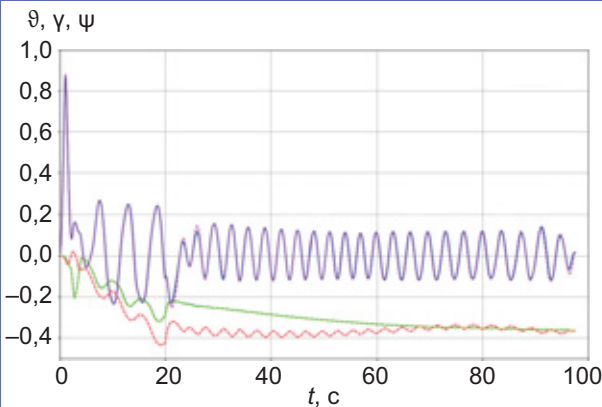


Рис. 10. Изменение углов Эйлера:  
 ———— — MATLAB; - - - - - SimInTech

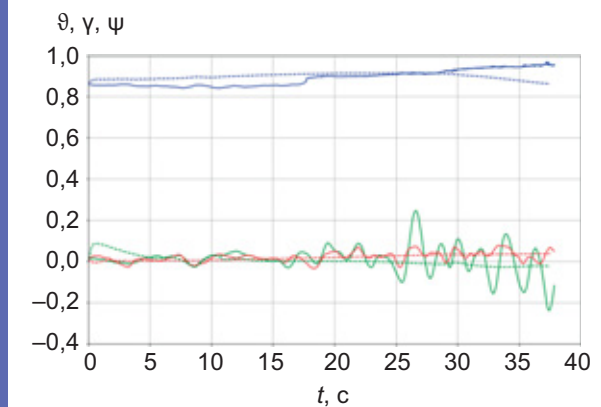


Рис. 13. Изменение углов Эйлера:  
 ———— — натурные испытания;  
 - - - - - SimInTech

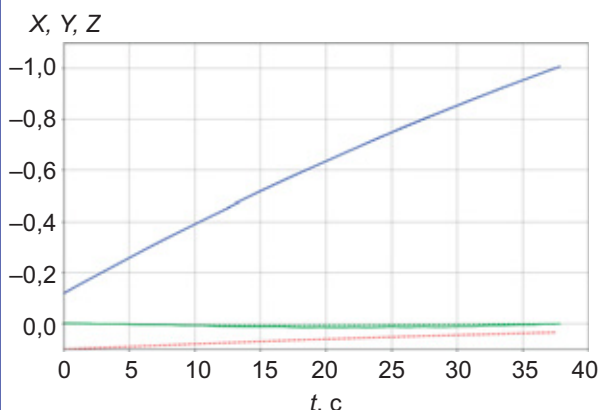


Рис. 11. Изменение координат центра масс БППЛА в пространстве в ЗСК:  
 ———— — натурные испытания;  
 - - - - - SimInTech

проекций линейной скорости на связанную систему координат (ССК), угловых скоростей в ССК, значений управляющих сигналов и углов Эйлера соответственно. Результаты моделирования в среде MATLAB отображены сплошными линиями, в среде SimInTech – пунктирными.

Из анализа полученных данных следует вывод о соответствии математических моделей.

### СРАВНЕНИЕ С НАТУРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

В рамках разработки математической модели БППЛА произведена валидация, основанная на результатах натурной работы.

Ввиду отсутствия полной картины внешних воздействий, а также точных массогабаритных параметров БППЛА, используемого в натуральных испытаниях, принято решение об использовании ограниченного списка сравниваемых параметров – перемещение координат центра масс БППЛА в пространстве в ЗСК, проекций линейной скорости в ЗСК, а также углов ориентации (рис. 11–13).

Таким образом, отсутствие достоверной картины внешних воздействий и опыт сравнения натуральных и теоретических изделий в части массогабаритных параметров в ходе анализа полученных результатов позволяют сделать вывод об идентичности характеров изменения данных во время расчета. Учитывая совпадение начальной и конечной точек, а также параметры изменений, сделан вывод об удовлетворительной сходимости результатов, полученных в натурной работе и при численном моделировании в среде SimInTech.

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ

Сравнивая результаты, которые были получены в разработанной математической модели, с результатами, полученными в уже существующей, а также натурными испытаниями, была

произведена оценка погрешности по формуле среднеарифметического отклонения:

$$R_x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{1i} - x_{2i}|}{n},$$

где  $x_{1i}$  – значение в разработанной математической модели;  $x_{2i}$  – значение в существующей математической модели или данные из расшифровки натуральных испытаний.

Погрешность, выраженная в процентном отношении, определяется по формуле:

$$\Theta_{\Sigma} = \frac{R_x}{\sum_{i=1}^n x_{2i} / n} \cdot 100\%.$$

Для вычисления погрешности анализировались данные точек на всем протяжении полета и отражены в табл. 1.

Одним из основных параметров оценки работы математической модели является оценка соответствия конечных точек расчета, которые отражены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты вычисления

Параметр	Значение погрешности в %	
	Распределенная по осям	Суммарная
<b>Сравнение с существующей математической моделью</b>		
Погрешность вычисления положения центра масс	0,033	0,066
	0,073	
	0,093	
Погрешность вычисления угловой ориентации в пространстве	0,38	0,8
	1,75	
	0,27	
<b>Сравнение с натурными испытаниями</b>		
Погрешность вычисления положения центра масс	0,16	17,16
	1,58	
	49,74	
Погрешность вычисления угловой ориентации в пространстве	64,59	23,87
	3,9	
	103,11	

Таблица 2. Значения параметров конечных точек

Наименование	Значение SimInTech	Значение ориентировочных данных
<b>Сравнение с существующей математической моделью</b>		
Координаты БППЛА в ЗСК, м:		
X	0,967	0,967
Y	0,026	0,0265
Z	0,269	0,269
Значения углов Эйлера, град:		
$\psi$	-0,367	-0,365
$\theta$	-0,364	-0,366
$\gamma$	0,025	0,016
<b>Сравнение с натурными испытаниями</b>		
Координаты БППЛА в ЗСК, м:		
X	1,001	1,006
Y	0,035	0,034
Z	0,009	0,008
Значения углов Эйлера, град:		
$\psi$	0,86	0,95
$\theta$	0,036	-0,05
$\gamma$	-0,023	-0,118

Полученные данные и принятые допущения при проведении валидации свидетельствуют о соответствии математической модели с верифицированной и натурной работами.

### ВЫВОДЫ

Результаты верификации и валидации показали, что программное обеспечение SimInTech, разработанное компанией ООО «3В Сервис», имеет некоторые отличия от Matlab и при этом отражает достоверную картину процессов, протекающих во время полета БППЛА. Основным фактором, влияющим на точность расчета, – это реализация метода интегрирования. Поэтому здесь присутствуют незначительные отличия в

сравнении с полученными результатами моделирования.

Исходя из опыта работы в среде динамического моделирования, отмечено отсутствие возможности переопределения линии связи без удаления, а также интуитивно понятного объявления ошибок в блоке языка программирования. Выявленные недостатки не влияют на процесс моделирования, но вносят дискомфорт для пользователей. По этой причине рекомендуется расширить возможности обозреваемого инструмента.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения программного обеспечения разработки ООО «3В Сервис» вместо разработки компании MathWorks из США.



УДК 623.618

## ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Канд. техн. наук В.И. СОРОКИН  
(ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

*Рассмотрен вариант решения задачи оптимизации алгоритмов пакетной передачи информации при фиксированной мощности и скорости передачи отдельных разрядов в роли распределяемого ресурса за счет согласования моментов изменения скорости передачи с начала передачи очередного пакета.*

**Ключевые слова:** ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ; АЛГОРИТМЫ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.

Существующие алгоритмы управления помехозащитой системой передачи информации на канальном уровне предполагают деление поступающей на вход передатчика информации на «порции», которые в соответствии с данными алгоритмами могут передаваться с различной мощностью и/или скоростью. В последнем случае изменяется или длительность передачи отдельных «порций», или их информационное наполнение. На практике такие корректировки требуют согласования передачи информации с поступлением ее на вход передатчика и считывания с выхода приемника. Это согласование можно реализовать при передаче информации, которая уже вне канального уровня разбита на пакеты [1].

При оптимизации алгоритмов пакетной передачи (ПП) информации при фиксированной мощности и скорости передачи отдельных разрядов в роли распределяемого ресурса фактически выступало суммарное время передачи. Рычагами управления здесь стали доли времени, выделяемые на передачу отдельных пакетов, а также на информационную и избыточную части данных пакетов. Оптимизируемой внешней функциональной характеристикой при этом была средняя реализованная скорость передачи информации, влияющая непосредственно на вероятностно-временные характеристики доставки заданных объемов достоверной информации. Синтезированные в результате решения поставленной задачи алгоритмы могут быть использованы и при передаче в пакетном виде оцифрованной аналоговой информации, в том числе после пред-

варительной обработки в кодере источника методами сжатия без потерь. Одним из вариантов при этом является согласование момента изменения скорости передачи очередного пакета с начала его передачи без изменения внутренней структуры. При этом изменяется длительность передачи отдельных пакетов – в определенных пределах такое допустимо, так как типовые протоколы ПП обычно включают прохождение пакетов через буферы, которые сглаживают флуктуации моментов поступления очередных пакетов. Подобного согласования достаточно для реализации оптимальных детерминированных алгоритмов управления порогами помехозащиты в условиях доминирования или системы передачи информации, или системы простановки помех. Однако в равноправных условиях, когда оптимальные алгоритмы являются рандомизированными, возникает внутренняя проблема реализации необходимого распределения вероятностей  $x^*(s_i)$  порогов помехозащиты (или соответствующих им скоростей  $x^*(C_i)$ ), связанная с переменной длительностью ПП [2].

Физическим аналогом вероятности  $x^*(C_i)$  на практике является доля фиксированных отрезков времени передачи информации со скоростью  $C_i$ , а не доля фиксированных по структуре пакетов, передаваемых со скоростью  $C_i$ . Использование распределения вероятности  $x^*(s_i)$  «не по назначению» приводит, в частности, к тому, что средняя скорость передачи будет не  $C' = M_x(C_i)$ , а  $C'' = 1/M_x(1/C_i)$ . Очевидно, что в общем случае  $C' \neq C''$  [1].

В случае использования дискретного множества скоростей  $\{C_i\}_m$  каждой вероятности  $x_i^*$  выбора некоторой скорости  $C_i$  при передаче пакетов с фиксированной структурой (одинаковым объемом информации) соответствует вероятность  $\mu_i^*$  передачи очередного пакета со скоростью  $C_i$ , которая связана с  $x_i^*$  следующим образом:

$$\mu_i^* = x_i^* C_i / C' = x_i^* / \sum_{j=1}^m x_j^* C_j. \quad (1)$$

В асимптотическом случае при использовании непрерывного множества скоростей  $C_i \in [C_0, C_m]$  плотность распределения вероятностей  $\mu^*(C_i)$  передачи очередного пакета со скоростью  $C_i$  связана с плотностью распределения вероятностей  $x^*(C_i)$  выбора скорости  $C_i$ :

$$\begin{aligned} \mu^*(C_\tau) &= x^*(C_\tau) \cdot C_\tau / C' = \\ &= x^*(C_\tau) \cdot C_\tau / \int_{C_0}^{C_m} x^*(C) \cdot C \cdot dC. \end{aligned} \quad (2)$$

Использование выражений (2) и (3) фактически позволяет реализовать оптимальное распределение ресурса времени передачи между очередными пакетами фиксированной структуры на основании синтезированного в предыдущем подпункте оптимального алгоритма управления порогами помехозащиты.

С другой стороны, типовые алгоритмы (протоколы) ПП информации имеют свои «рычаги управления» скоростью в системе передачи информации на канальном уровне, к которым можно отнести алгоритмы управления длиной и избыточностью пакетов в сочетании с алгоритмами повышения достоверности с информационной обратной связью или решающей обратной связью [3]. В работе рассматриваются потенциальные возможности оптимизации протоколов ПП с решающей обратной связью в условиях оптимизированных помех.

Как следует из результатов анализа помехозащищенности системы передачи информации, при использовании ПП информации с решающей обратной связью в условиях оптимизированных помех наиболее целесообразно для

исправления ошибок использовать сигнально-энергетическую избыточность на физическом уровне, а на канальном уровне применять коды, обнаруживающие ошибки. При этом необходимо, чтобы минимальная избыточная часть пакета  $r$  составляла величину:

$$r = n - k > \log_2(2p_k^{mp}), \quad (3)$$

где  $p_k^{mp}$  – допустимая вероятность приема пакета из  $k$  информационных разрядов с необнаруженной ошибкой, связанная с допустимой вероятностью ошибки на бит следующим образом:

$$p_k^{mp} = 1 - (1 - p_{\text{ош.}}^{mp})^k \approx k p_{\text{ош.}}^{mp}. \quad (4)$$

Реальная избыточность пакетов, как правило, гораздо больше (3). Кроме того, дополнительную эквивалентную избыточность вносят задержки при обработке пакетов и в канале обратной связи. Но в предельном случае при идеальном канале обратной связи (без потерь и без задержки) и отсутствии реализационных ограничений создания буферных устройств можно ограничиться учетом только избыточности (3). Оптимальной стратегией системы постановки помех при подавлении пакетов с обнаружением ошибок является концентрация энергии помех на части разрядов каждого пакета. При этом гарантированная реализованная скорость  $Q$  зависит от длины пакетов и относительной средней мощности помех:

$$Q(n, \delta) = \frac{n-r}{n} [1 - p_{\text{ст}}(n, \delta)] C_0, \quad (5)$$

где  $C_0$  – скорость передачи информации на физическом уровне;  $p_{\text{ст}}(n, \delta)$  – вероятность стирания, определяемая с учетом переобозначения  $N = n$ .

Рассмотрим случай использования на физическом уровне амплитудно-фазовой манипуляции псевдослучайной последовательности сигналов с большой базой  $B = DF/C_0 \gg 1$  при допустимой вероятности ошибки на бит  $p_{\text{ош.}}^{mp} = 10^{-5}$ . На рис. 1 приведены графики зависимости гарантированной средней реализованной скорости ПП информации от относительной средней мощности помех при различной длине пакетов, которые были получены в результате расчетов по формуле (5).



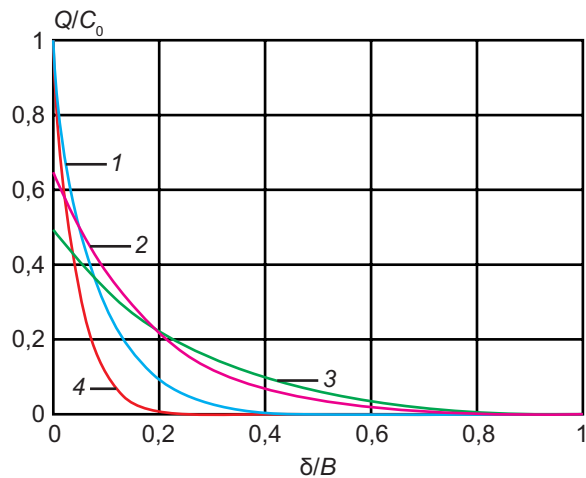


Рис. 1. Зависимости гарантированной средней реализованной скорости пакетной передачи информации от относительной средней мощности помех при различной длине пакетов: 1 –  $n = 32$ ; 2 –  $n = 64$ ; 3 –  $n = 24$ ; 4 –  $n = 128$

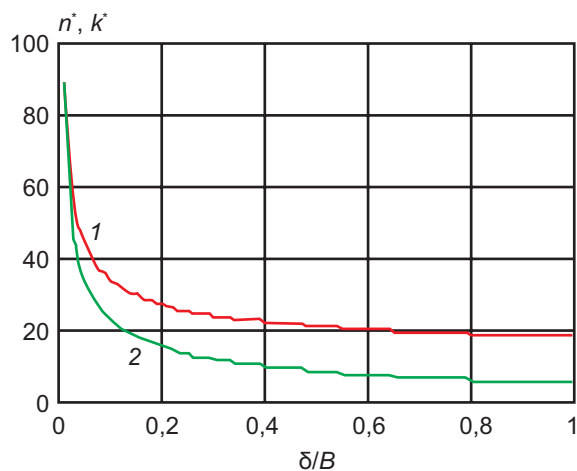


Рис. 2. Зависимости оптимальной длины пакетов от контролируемой относительной средней мощности помех: 1 –  $n^*$ ; 2 –  $k^*$

Как следует из рис. 2, при изменении уровня помех передача пакетов с постоянной длиной считается неэффективной. Поэтому представляет интерес найти алгоритм  $m_x^*$  (решающее правило) выбора оптимальной длины пакета  $n^*(\delta)$  как функцию от контролируемой средней мощности помех  $\delta$ .

Для случая низкого уровня помех  $B$  получены приближенные аналитические выражения для расчета  $n^*(\delta)$  с учетом дополнительных по-

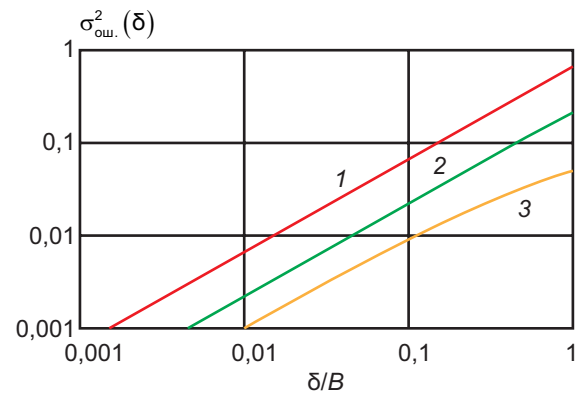


Рис. 3. Асимптотические зависимости (1–3) гарантируемой дисперсии ошибок от относительной средней мощности наихудших помех при использовании оптимальных алгоритмов передачи аналоговых сигналов

терь при использовании решающей обратной связи с ожиданием адресного перезапроса с фиксированной избыточностью. Однако для общего случая произвольных помех получить аналитическое выражение не удастся. На рис. 3 приведены графики зависимости оптимальной длины пакетов  $n^*(\delta)$ , а также соответствующей длины информационной части пакетов  $k^*(\delta)$ , полученные численными методами для трех асимптотически оптимальных алгоритмов передачи аналоговых сигналов в условиях оптимизированных помех. Как следует из рис. 2, чтобы гарантировать максимальную реализованную скорость  $Q^*(\delta)$  пакетной передачи информации в различной помеховой обстановке необходимо иметь возможность изменять длину пакета в достаточно широких пределах.

На рис. 4 приведены графики зависимости максимальной гарантированной реализованной скорости ПП информации от относительной средней мощности помех (линия П). Для сравнения там же приведены графики аналогичных зависимостей, полученные при тех же исходных данных (т.е. при амплитудно-фазовой модуляции псевдослучайной последовательности и  $p_{ош} = 10^{-5}$ ) и при оптимальном управлении порогом помехозащиты с ограниченной максимальной скоростью  $C_0$ , но без учета вида передаваемой информации для случая дискриминации системы постановки помех 1 и равноправного случая 2.

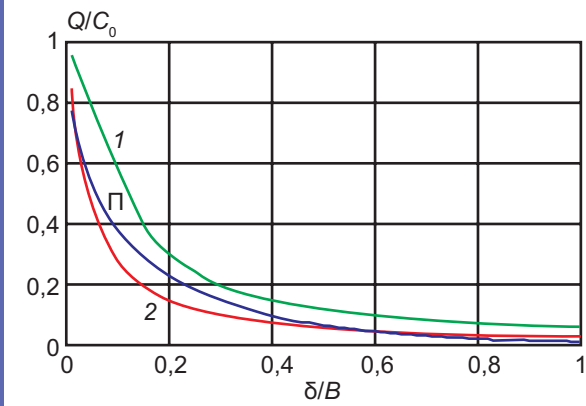


Рис. 4. Гарантированная реализованная скорость передачи при использовании оптимальных алгоритмов управления порогами помехозащиты (1, 2) и длиной пакетов (П)

Гарантируемая эффективность ПП информации с управляемой длиной пакетов в широком интервале значений относительной мощности помех  $\delta$  оказывается близкой к максимальной эффективности управления порогами помехозащиты в условиях дискриминации системы постановки помех, подобных по физическому

смыслу условиям отслеживания результатов подавления пакетов с использованием решающей обратной связи (см. рис. 4). Однако в области малых и, особенно, больших уровней помех гарантируемая эффективность ПП оказывается ниже эффективности управления порогами помехозащиты даже в равноправных условиях, являющихся более жесткими, чем условия дискриминации системы постановки помех. Следует полагать, что подобное снижение гарантированной скорости ПП информации связано с наличием обязательной избыточности пакетов, необходимой для обнаружения искажений и обеспечения требуемой вероятности ошибки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 431с.
2. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный интеллект](https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_интеллект).
3. Основы теории управления в системах специального назначения: учебник / Ю.В. Бородакий [и др.]; под общ. ред. Ю.В. Бородакия, В.В. Масановца. М.: Управление делами Президента Российской Федерации, 2008. 400 с.



---

---

## БОЕВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

---

---

УДК 621.396.677

# МАЛОРАЗМЕРНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ОБЪЕКТЫ ВЕРОЯТНОГО ПРОТИВНИКА – СОВРЕМЕННАЯ УГРОЗА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫМ ВОЕННЫМ ОБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В.А. ХОРЧЕВ (ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

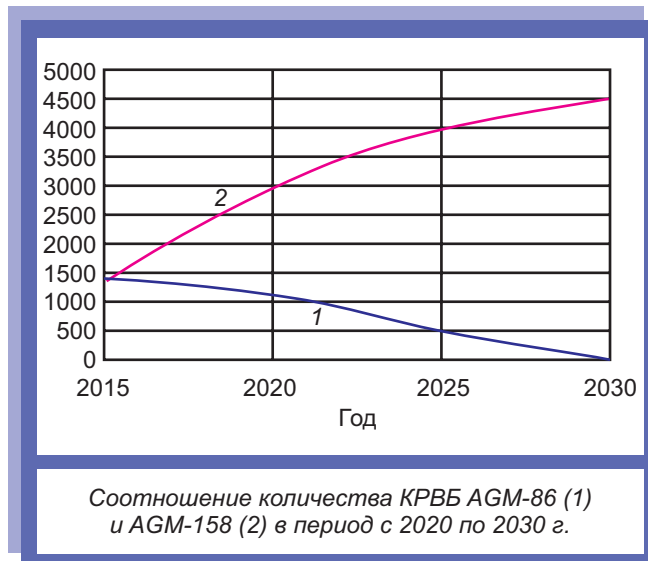
*Проведен анализ разработок зарубежных стран по поражению критически важных наземных объектов Российской Федерации с применением малоразмерных воздушных объектов. Цель – выполнение сложной технической задачи по их обнаружению и гарантированному уничтожению.*

**Ключевые слова:** МАЛОРАЗМЕРНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ОБЪЕКТЫ; БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ; СТРАТЕГИЧЕСКИЙ БОМБАРДИРОВЩИК; АВИАЦИЯ; АЭРОДРОМ.

В настоящее время вооруженные силы вероятного противника в рамках реализации концепций воздушно-космического нападения (ВКН) активно ведут работы по совершенствованию способов поражения критически важных наземных объектов Российской Федерации. Одним из направлений этой деятельности стало совершенствование малоразмерных воздушных объектов (МВО) и способов их боевого применения.

Малоразмерными воздушными объектами называют крылатые ракеты (авиационного, наземного или морского базирования), управляемые ракеты (снаряды), планирующие (управляемые) авиационные бомбы, противорадиолокационные ракеты, малогабаритные беспилотные

летательные аппараты (БПЛА) «вертолётного» и «самолётного» типов, а также кустарно создаваемые БПЛА, которые на протяжении нескольких десятилетий доставляют множество трудностей системам ПВО своими специфическими лётно-техническими характеристиками. К таким параметрам относят эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) (менее  $0,1 \text{ м}^2$ ), широкий диапазон скорости движения, совершение скрытных полетов на малых и предельно малых высотах с использованием рельефа местности, возможность интеллектуального выбора направления нанесения удара по объекту с самой незащищенной стороны, использование режима «полного» радиомолчания.



Одновременно с применением МВО для нанесения ударов по позициям войск ожидается активное использование противником в ходе ВКН средств радиоэлектронной борьбы, которые существенно ограничивают возможности радиолокационных станций, в том числе воздушного базирования, по обнаружению МВО.

Учитывая типологию МВО, можно отметить, что наибольшую опасность критически важным объектам Российской Федерации в настоящий момент представляют крылатые ракеты и самолёты-носители [1]. Основными считаются стратегические бомбардировщики (СБ), которые выступают важнейшими компонентами стратегических наступательных сил США. Это связано с тем, что СБ могут наносить ракетные удары на большом удалении от аэродромов вылета в любом регионе мира, не входя в зону видимости ПВО.

Боевой состав частей стратегической бомбардировочной авиации (СБА) ВВС США по состоянию на начало 2022 г. составляет 123 единицы, из которых 58 – стратегические бомбардировщики В-52Н, 20 – В-2А и 45 – самолёты В-1В. Командование ВВС США активно планирует эксплуатацию имеющегося парка стратегических бомбардировщиков В-1В и В-52Н до 2040 г., а парка В-2А – до 2058 г., наряду с создаваемым бомбардировщиком нового поколения, принятие которого на вооружение ожидается в период с 2020 по 2030 г. [2].

В составе комплексов бортового вооружения самолётов СБА имеются средства поражения

большой дальности, включая крылатые ракеты воздушного базирования (КРВБ) типа AGM-86 В,С,Д (в ядерном и неядерном оснащении) для самолётов В-52Н и КРВБ AGM-158А(В) (JASSM, JASSM-ER) для всех типов самолётов [3].

Несмотря на то что КРВБ типа AGM-86 находятся на вооружении с 1981 г. и, по мнению военных специалистов, технически устарели, их эксплуатация продлена вплоть до 2030 г. Командование ВВС США рассчитывает сохранять арсенал ракет AGM-86В в количестве 450...500 единиц до указанного срока, что несет серьёзную опасность.

КРВБ типа AGM-158 (JASSM – Joint Air-to-Surface Standoff Missile) является образцом оружия нового поколения и находится на вооружении ВВС США с 2003 г., а ее модификация – AGM-158В (JASSM-ER – Extended range), которую провели в 2011 г., позволила увеличить дальность полёта и реализовать технологию малозаметности «Стелс» [4].

Анализ технических и информационных источников показал, что ВВС США до 2020 г. проводили модернизацию КРВБ JASSM-ER до модификации JASSM-XR (Extra Extended range) с дальностью стрельбы до 1800...2000 км. Также рассматривалась возможность адаптации ракет под установку термоядерного боезаряда W-80-1/4 в количестве 500 единиц.

Планируемое количественное соотношение между AGM-86 и AGM-158В в период с 2015 по 2030 г. представлено на рисунке.

Стоит отметить, что с принятием ВВС США на вооружение КРВБ AGM-158 JASSM проводилась модернизация самолетного парка СБА для использования данного типа боеприпасов [5]. В частности, завершены работы по установке на самолёты В-1В новой роторной пусковой установки, способной использовать КРВБ нового типа. Причем, эта пусковая установка и существующая система управления оружием по-прежнему не исключают восстановление В-1В в качестве носителя ядерного оружия. Данный факт косвенно подтверждается переводом в 2016 г. частей, имеющих на вооружении самолёты В-1В, из боевого авиационного командования в состав командования глобальных ударов ВВС США.

Что касается СБ В-52Н, то в период с 2013 по 2016 г. компанией «Боинг» проводились работы по модернизации его роторной пусковой

установки по программе «IWBU» (1760 IWBU, Internal Weapons Bay Upgrade) для обеспечения загрузки различных боеприпасов нового поколения под стандарт MIL-STD-1760, в том числе ракет JASSM. Внедрение названной установки позволило существенно увеличить емкость бомбовой загрузки В-52Н.

В настоящее время США обладают значительным арсеналом высокоточного неядерного оружия большой дальности (до 3600 единиц) и планируют наращивать их количество в ближайшие 10 лет. По своим боевым и техническим характеристикам североамериканские крылатые ракеты представляют собой МВО, которые являются угрозой критическим важным военным объектам РФ.

Своевременное обнаружение такого типа высокоточного оружия и гарантированное его уничтожение является сложной научно-технической задачей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков А.С., Мясников Е.В. Высокоточные ракеты заменяют ядерные // Независимое Военное Обозрение. 2000. № 4. 6 с.
2. Альманах ВВС США 2022 [Электронный ресурс]: URL: [http://airforcemag.com/app/uploads/2022/07/Almanac2022\\_fullissue](http://airforcemag.com/app/uploads/2022/07/Almanac2022_fullissue) (дата обращения: 20.09.2022).
3. Официальный сайт ВВС США [Электронный ресурс]: URL: <http://www.af.mil/about-US/fact-sheets/display/article/104612/agm-86bcd-mssiles/> (дата обращения: 20.09.2022).
4. Глобальная безопасность [Электронный ресурс]: URL: <http://globalsecurity.org/military/systems/munitions/jassm-program> (дата обращения: 20.09.2022).
5. Авиационный клуб [Электронный ресурс]: URL: <http://theaviationgeekclub.com/first-b-52h-conventional-rotary-launcher-arrived-barksdale-ready-combat> (дата обращения: 20.09.2022).



---

---

## ПОРОХА

---

---

УДК 662.2.022

### О ДИВЕРСИФИКАЦИИ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПОРОХОВ И БАЛЛИСТИТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Д-р техн. наук В.Ю. МЕЛЕШКО, А.А. ГРЕК, канд. техн. наук Д.А. НАУМОВ  
(ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

*Представлен краткий обзор проблемы обеспечения производства нитроцеллюлозных энергетических материалов отечественным целлюлозным сырьем природного происхождения. Рассмотрены основные источники природного целлюлозного сырья. Для диверсификации компонентной базы предложена замена полимерной основы нитроцеллюлозных энергетических материалов на высокоплотные и высокоэнтальпийные синтетические полимерные соединения, позволяющие повысить уровень энергетических характеристик порохов и баллиститных твердых топлив.*

**Ключевые слова:** БАЛЛИСТИТНЫЕ ТВЕРДЫЕ ТОПЛИВА; ПОРОХА; ЦЕЛЛЮЛОЗА; КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА; ПОЛИАЗОТИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ; ПОЛИНИТРОТРИАЗОЛЫ.

Более чем вековая история разработки и совершенствования характеристик нитроцеллюлозных порохов и баллиститных твердых топлив, ставших основным источником энергии для вооружения и военной техники, свидетельствует о значимости проблемы устойчивого обеспечения этими энергетическими материалами военно-технического комплекса.

Проблема обеспечения сырьем отечественного производства существует давно. Начальник Главного артиллерийского управления генерал-лейтенант Маниковский А.А., представляя в 1916 г. доклад Военному министру, отмечал: «Ныне перед нами встает задача важности

*необыкновенной: необходимо встать на правильный путь, т.е. во что бы то ни стало избавиться по части боевого снабжения от иноземной зависимости и добиться того, чтобы наша армия всё необходимое получала бы у себя дома – внутри России» [1]. В последнее время это положение становится все более актуальным [2].*

Наиболее важной частью в этом вопросе является сырьевое обеспечение производства высокомолекулярной основой порохов и баллиститных твердых топлив (П и БТТ) – целлюлозой. Традиционным и лучшим ее природным источником остается хлопковая целлюлоза (ХЦ), на основе которой возможно получение

высококачественных нитратов целлюлозы (НЦ) с требуемым комплексом характеристик.

После распада СССР Россия лишилась собственного хлопка, а предприятия промышленности вынуждены закупать импортное сырье. Хлопководство на территории России считается экономически нецелесообразным и нерентабельным производством [3], что ведет к поиску других национальных сырьевых ресурсов.

Целлюлоза самый распространенный в мире природный полимер, поскольку остается основной составной частью клеточных оболочек всех высших растений. Это обуславливает многообразие возможных путей решения проблемы.

Еще в годы Первой мировой войны предпринимались попытки использовать для производства НЦ древесную целлюлозу. К 1939 г. в СССР была успешно создана технология получения НЦ из облагороженной древесной целлюлозы [4]. Однако в послевоенные годы при значительном сокращении объемов производства порохов от этого источника сырья отказались. Тем не менее, учитывая доступность сырья и его низкую стоимость, исследования способов получения НЦ из древесины для пороховой промышленности в России и за рубежом продолжаются и в настоящее время [5].

В качестве другого природного источника целлюлозы рассматривается конопля. Сложность ее использования состоит в том, что в 1961 г. СССР подписал «Единую Конвенцию о наркотических веществах», которая, в частности, предписывала установить строжайший контроль над выращиванием опасных наркосодержащих растений, в том числе конопли, хотя далеко не все сорта конопли являются наркосодержащими [6]. В настоящее время решается вопрос о возобновлении производства ненаркосодержащей конопли. Учитывая потенциальные возможности этого источника целлюлозы, на протяжении нескольких лет разрабатываются способы получения НЦ на ее основе.

Наибольший интерес для использования в качестве сырья для НЦ представляют лубяные волокна, в частности, льняной целлюлозы [7]. В России возделыванием льна-долгунца потенциально может заниматься 21 регион. При этом доля России на международном рынке составляет не более 0,5% [8]. Исследованию

возможности получения целлюлозы и ее нитроэфиров из льняного волокна посвящен достаточно большой комплекс экспериментальных исследований, результаты которых говорят о перспективности данного направления [9].

Об актуальности проблемы замены хлопковой целлюлозы на альтернативные источники сырья свидетельствуют многочисленные публикации, в которых в качестве таких источников рассматриваются, например, плодовые оболочки овса, солома злаковых культур, мискантус и др.

Серьезным недостатком природных источников целлюлозы остается существенный разброс структурных характеристик, зависящих от природных факторов, таких как погодно-климатические условия, химический состав и структура почв, специфика семенного материала и др. Использование таких источников увеличивает нагрузку на окружающую среду, поскольку требует большого количества дополнительных реагентов как для выделения целлюлозы, так и для процесса нитрования целлюлозы при получении ее нитратов [10].

Необходимо отметить, что использование для производства П и БТТ НЦ с высоким коэффициентом обеспеченности кислородом  $\alpha$ , полученных из различных природных сырьевых источников, не решает основную задачу – увеличение их энергетических характеристик, что обусловлено относительно низкими значениями плотности  $\rho$  и глубоко отрицательной энтальпией образования  $\Delta H_f^0$  (табл. 1).

В связи с этим, целесообразно рассмотреть возможность использования в качестве полимерной основы П и БТТ высокоэнтальпийных синтетических полимерных соединений с повышенной плотностью, введение которых в рецептуру П и БТТ позволяет существенно повысить уровень их энергетических характеристик.

Препятствием в синтезе таких соединений являются возможное повышение чувствительности к механическим воздействиям, меньшая химическая стойкость, худшая совместимость с другими компонентами, а также дорогостоящий синтез.

К числу химических полимерных соединений, которые потенциально могут быть использованы как компоненты П и БТТ, относятся полиазотистые соединения (ПАС), характеризующиеся

Таблица 1. Некоторые характеристики основных компонентов П и БТТ

Компоненты	Характеристики		
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta H_f^0$ , кДж/кг	$\alpha$
Нитраты целлюлозы	1600	-2497	0,63
Нитроглицерин	1596	-1588	1,06

Таблица 2. Некоторые характеристики гетероциклических форполимеров

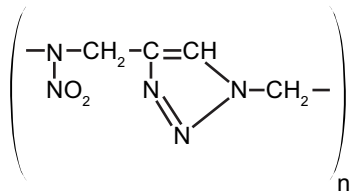
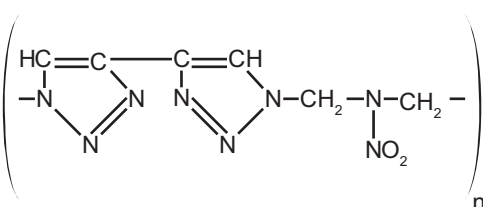
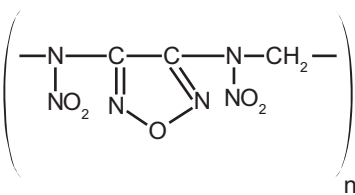
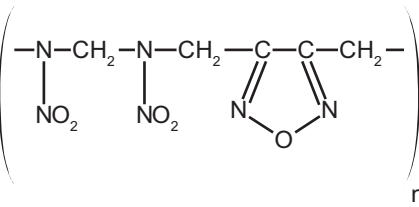
Структура мономерного звена	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta H_f^0$ , кДж/кг	$\alpha$
	1,58	133	0,24
	1,55	150,35	0,13
	2,00	52,32	0,71
	1,80	45,83	0,38

Таблица 3. Характеристики синтезированных полинитротриазолов (ПНТ) различной структуры

Индекс	Брутто-формула	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta H_f^0$ , кДж/кг	$\alpha$
ПНТ-0	$[C_8H_{10}N_6O]_n$	1,43	1376	0,08
ПНТ-1	$[C_8H_8N_{10}O_6]_n$	1,78	949	0,30
ПНТ-2	$[C_8H_8N_{12}O_8]_n$	1,90	1168	0,40
ПНТ-3	$[C_{14}H_{22}N_{12}O_8]_n$	1,60	538	0,21
ПНТ-4	$[C_{14}H_{18}N_{12}O_7]_n$	1,61	988	0,19
ПНТ-5	$[C_{15}H_{22}N_{12}O_{12}]_n$	1,58	273	0,29



достаточной стабильностью, повышенным значением плотности и положительными значениями энтальпии образования. Номенклатура ПАС достаточно велика. В настоящее время особое внимание уделяется изучению методов синтеза гетероциклических ПАС и применения их в качестве компонентов различных энергетических материалов.

Состояние современных исследований гетероциклических ПАС свидетельствует о том, что к числу перспективных относятся полимерные гетероциклические соединения азота на основе политриазола.

Такие полимеры, обладающие высокими положительными значениями энтальпии образования и плотности, могут быть использованы для формирования рецептур различных энергетических материалов, в частности, П и БТТ. В качестве исходных компонентов для их синтеза могут быть использованы простые ацетиленовые и азидные соединения, имеющие доступную отечественную сырьевую базу.

Для повышения энергосодержания полимеров в их состав целесообразно вводить фрагменты, содержащие нитро ( $-C-NO_2$ ), нитроформатные ( $-C(NO_2)_3$ ), нитраминные ( $-N-NO_2$ ), нитроэфирные ( $-O-NO_2$ ), азидные ( $-N_3$ ), триазольные, тетразольные и другие эксплозифорные группировки. Триазолы – хорошие аккумуляторы химической энергии. Энергетический вклад одного 1,2,3-триазольного цикла в энтальпию образования соединения составляет 168 кДж/моль или 402,24 кДж/кг (табл. 2).

Совместно с ИОХ РАН им. Н.Д. Зелинского проведен синтез ряда полимеров на основе триазола и определены их основные характеристики – энтальпия образования  $\Delta H_f^0$ , плотность  $\rho$  и коэффициент обеспеченности окислительными элементами  $\alpha$  (табл. 3).

Полученные полимеры хорошо пластифицируются известными нитроэфирными пластификаторами. Предварительная оценка целесообразности использования соединений данной структуры в П и БТТ была проведена в отношении влияния на энергетические характеристики и показала возможность их увеличения на 25...30% [11, 12].

Исследования показали, что синтезированные полимеры класса полинитротриазолов

могут рассматриваться в качестве потенциальных перспективных компонентов П и БТТ, обеспечивающих замену в их рецептурном составе НЦ и существенно увеличивающих их энергетические характеристики. Однако необходимо учитывать, что даже при простом одностадийной синтезе процесс отработки методик получения, модификации и определения свойств таких энергонасыщенных компонентов, а также экспериментальная отработка рецептур П и БТТ на их основе, являются достаточно длительными и ресурсозатратными. Исследования, направленные на поиск и синтез новых компонентов П и БТТ с высокой энергетической плотностью, – рискованные в техническом отношении, хотя их потенциальный положительный результат может стать революционным и заслуживающим инвестиций. Это обуславливает необходимость проведения таких исследований за счет финансирования из государственного бюджета в рамках долгосрочных федеральных программ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Военная промышленность России в начале XX века 1900–1917: сб. документов. М.: Новый хронограф, 2004. 832 с.
2. Ликвидация зависимости Российской Федерации от поставок хлопкового сырья для производства порохов / И.Н. Торгун [и др.] // Боеприпасы. 2010. № 5–6. С. 27–46.
3. Белая А. Стратегическое сырье. Нужно ли развивать производство хлопка в России // Агроинвестор. 2019. № 6. URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/31848-strategicheskoe-syre> (дата обращения: 19.07.2022).
4. Балыш А.Н. Научный подвиг: вклад, который трудно переоценить (древесная целлюлоза И.М. Наймана) // Боеприпасы. 2017. № 1. С. 121–126.
5. Adekunle I.M. Production of cellulose nitrate polymer from sawdust // Journal of Chemistry. 2010. Vol. 7(3). P. 709–716.
6. Стоп ЦБК [Электронный ресурс]: Хочешь целлюлозы? Сади коноплю! URL: <https://stop-cbk.ru/canabis-cellulose/> (дата обращения: 12.07.2022).
7. Бобков С.А., Никишов В.П. Перспективы использования льняного сырья в интересах Министерства обороны Российской Федерации // Известия РАН. 2019. № 3. С. 38–43.
8. Стратегия развития льняного комплекса [Электронный ресурс] // Мат-лы Министерства промышленности и

торговли Российской Федерации. Отраслевое совещание по вопросам текущей ситуации и перспектив развития льняного комплекса России. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru>. (дата обращения: 12.06.2022).

9. Лен в пороховой промышленности / под ред. И.Н. Торгуна. М.: ГНЦ РФ ФГУП ЦНИИХМ, 2021. 392 с.

10. Возможные пути решения проблемы обеспечения экологической безопасности производства нитроцеллюлозных порохов / В.Ю. Мелешко [и др.] // Химическая безопасность. 2020. Т. 4, № 1. С. 157–169.

11. Направления решения проблемы сырьевого обеспечения производства нитроцеллюлозных порохов и баллистических твердых топлив / Г.Я. Павловец [и др.] // Известия РАН. 2020. № 4. С. 111–116.

12. Об использовании веществ с высокой энергетической плотностью в энергетических конденсированных системах / В.Ю. Мелешко [и др.] // Сб. мат-лов XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Суздаль: ИПХФЧ РАН, 2022. С. 69–71.



---

---

## БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

---

---

УДК 623.746.519

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППЫ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Д.В. МОЛДОВАН (ФГКВОУ ВО «ВА РВСН имени Петра Великого» МО РФ)

*Представлены решения задач управления движением группы робототехнических комплексов (беспилотных летательных аппаратов), алгоритм оптимального управления их движением при ведении воздушной разведки по стационарным целям и алгоритм решения задачи коммивояжера эвристическим способом.*

**Ключевые слова:** ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТИ; АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

Ракетные войска стратегического назначения (РВСН) – гарант безопасности Российской Федерации. Они несут круглосуточное боевое дежурство по охране Родины. В современной войне на главные позиции выходит оснащенность противоборствующих сторон высокотехнологичным и высокоэффективным оружием, что подтверждает опыт масштабного применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в конфликтах последнего времени. В этих условиях применение робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН), повышающих эффективность выполнения боевых задач, является очевидным и необходимым шагом в развитии РВСН. Учитывая места дислокации и тактику применения войск, наиболее востребованными среди РТК считаются комплексы с разведывательными БЛА, принятые на воору-

жение в частях и соединениях РВСН. С увеличением их количества появляется необходимость группового применения из-за недостаточной эффективности решения комплексных задач одиночными изделиями.

Проведённый анализ показал, что в подразделениях РВСН, эксплуатирующих БЛА, выполнение задач управления группой происходит в ручном режиме, что снижает эффективность ведения воздушной разведки. Поэтому необходимо проанализировать в какой обстановке применяются аппараты, какие в этих условиях возникают задачи планирования их применения и как эти условия влияют на критерии оптимизации при управлении групповым движением.

Операторы БЛА в зависимости от условий обстановки выполняют следующие задачи в ходе управления движением группы (рис. 1):

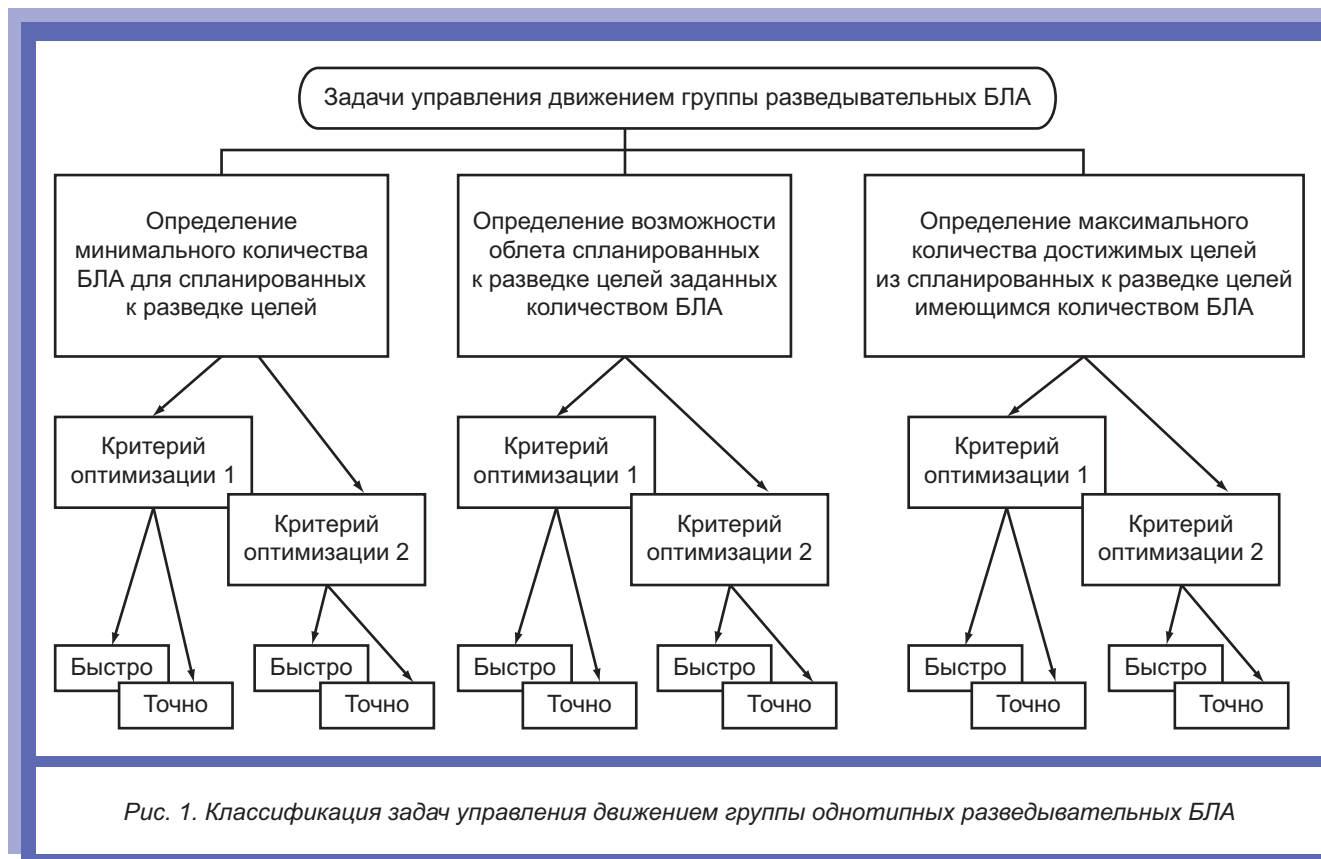


Рис. 1. Классификация задач управления движением группы однотипных разведывательных БЛА

определяют минимальное количество аппаратов для разведывания установленных целей и оптимальное распределение этих целей между БЛА;

изучают возможности облета запланированных для разведки целей заданным количеством БЛА и распределяют эти цели между ними;

просчитывают максимальное количество достигаемых намеченных целей имеющимся количеством аппаратов и распределяют эти объекты между БЛА.

Первая задача решается в мирное время или в период нарастания военной угрозы, когда срочность получения информации о разведываемых целях позволяет применять минимальное количество БЛА. Здесь главная задача заключается в сохранении летного ресурса, поэтому требуется определить минимальное количество используемых аппаратов. Когда это один БЛА, то критерием оптимизации становится минимизация продолжительности его маршрута. Если необходимо несколько БЛА, то минимизируется сумма длины всех маршрутов.

В случае, когда командиру необходимо использовать минимум БЛА (для поддержания необходимого резерва) и при этом срочно по-

лучить разведанные о целях, то критерием для одного БЛА, по-прежнему, остается сокращение длины маршрута, а для нескольких – минимакс расстояний, обеспечивающий минимальное время полета группы.

Вторая задача выполняется во время боевых действий, когда необходимо оперативно получать разведывательные данные при минимальном времени на подготовку плана использования БЛА (группы). В этом случае важным критерием для одного аппарата будет минимизация длины маршрута, а для нескольких БЛА – минимакс расстояний. Применение критерия минимизации длины всех маршрутов в данный момент на практике не используется.

Выполнение третьей задачи также предполагается в период ведения боевых действий, но когда необходимо максимально быстро получать разведывательные данные с минимальным временем на подготовку плана применения аппаратов без выполнения предварительной оценки вероятности выполнения поставленной задачи. В этом случае критерием для одного БЛА будет минимизация длины маршрута. Для нескольких БЛА – минимакс расстояний БЛА, обеспечиваю-

щий быстроту полета группы. Применение критерия минимизации суммы длин маршрутов всех БЛА для данной задачи не используется.

Управление движением группы разведывательных БЛА можно представить, как задачи о назначениях или о маршрутизации. Объекты в заданном районе, подлежащие разведке, являются стационарными, поэтому расчет оптимального распределения целей для одного БЛА можно свести к задаче коммивояжера или TSP-задаче (Traveling Salesman Problem), а определение распределения целей для нескольких аппаратов – к задаче нескольких коммивояжеров или mTSP (Multiple Traveling Salesman Problem). Алгоритмы решения можно подразделить на три вида: эвристические, точные и алгоритмы решения в частных случаях для определенного типа матрицы расстояний.

Эвристические алгоритмы отличаются быстротой работы, но результаты вычислений могут быть приближительными.

В основе любого точного метода решения задачи лежит тщательный анализ вариантов маршрута. С ростом количества целей время работы точных алгоритмов возрастает по экспоненте, что исключает решение большинства задач с числом целей более 10 для одного БЛА за приемлемое время, которое меньше нормативного, данного командиру взвода для принятия решения на применение подчиненных сил и средств (до 20 мин).

Предположим, что максимальное количество целей, по которым необходимо получить разведывательные данные, не превышает 20, а количество БЛА ближнего радиуса и малой дальности не превышает 5 единиц, а время полета каждого аппарата ограничено ТТХ. Эти данные приняты за исходные.

Таким образом, все имеющиеся задачи можно назвать логистическими для нескольких коммивояжеров с ограничением по времени полета и скорости принятия решения. Точные алгоритмы здесь не подходят, так как при заданных исходных данных их реализация на войсковых ПЭВМ не обеспечит быстрого решения из-за длительности работы по поиску оптимального распределения целей. В открытой литературе рекомендаций по данному поводу нет, поэтому необходимо разработать собственные алгоритмы.

Для решения применим следующий подход: общая задача разбивается на две подзадачи: о назначениях и коммивояжера. Решение первой выполнено комбинаторным способом, в котором составляются все возможные варианты непересекающихся маршрутов для заданного количества БЛА. Решение второй – по нахождению длин всех непересекающихся маршрутов БЛА (задачи коммивояжера) – представлено новым способом.

Более подробно этапы решения можно представить следующим образом [1]:

1. Поиск оптимального маршрута для одного БЛА (для первой и третьей задачи ведения воздушной разведки). Если таковой имеется, то задача решена. Дальнейшие пункты не выполняются. Оператор получает оптимальный маршрут БЛА.

2. Создание таблицы возможных вариантов распределения целей между аппаратами, при которых все цели посещаются ими только один раз и свободных объектов не осталось (если используется более одного аппарата).

3. Определение протяженности маршрутов для всех вариантов распределения целей, найденных в п. 2.

4. Сравнение найденных в предыдущем пункте длин маршрутов с максимальной дальностью полета БЛА, исключение невозможных вариантов распределения целей.

5. Если в таблице не осталось ни одного варианта, то добавляется еще один аппарат и выполняются п. 2–4 (только для первой задачи).

6. В случае, когда в таблице не осталось ни одного варианта, исключаем по очереди из исходных данных по одной самой удаленной цели и выполняем п. 2–4 (только для третьей задачи).

7. Из оставшихся в таблице распределения целей выбираем вариант по максимальной сумме длин маршрутов или миниму расстояний маршрутов всех БЛА.

8. Получение оператором нужных данных, количество аппаратов, их маршруты, время полета, длина маршрута.

Все три задачи ведения воздушной разведки решаются идентично, а поэтому рассматривать подробно все задачи нет смысла.

Рассмотрим комбинаторный метод с исключением обратных маршрутов для назначения целей каждому БЛА, т.е. каждому  $R_q | q = 1, m$

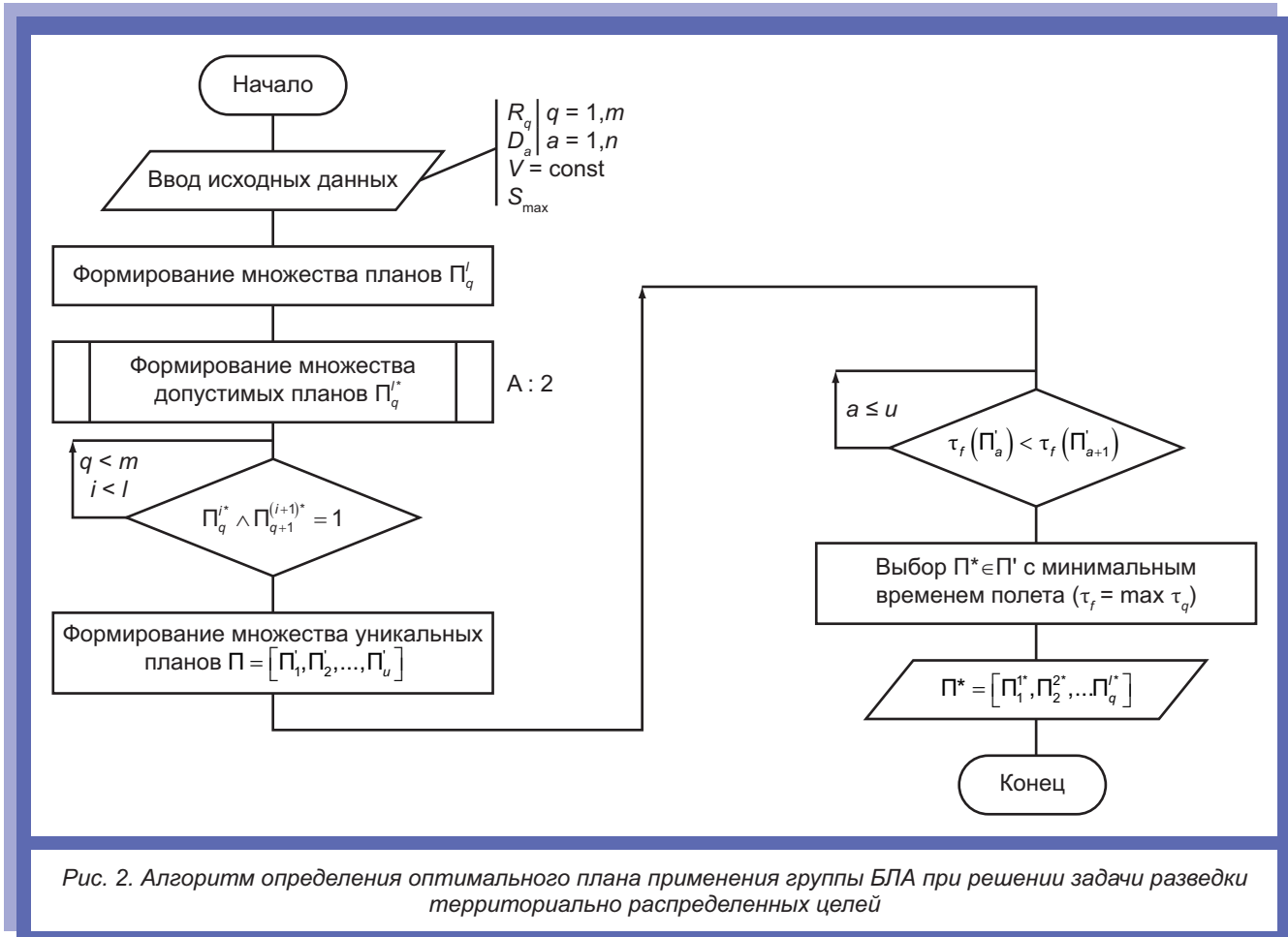


Рис. 2. Алгоритм определения оптимального плана применения группы БЛА при решении задачи разведки территориально распределенных целей

соответствует цель из множества  $D_a | a = 1, n$  с исключением порядка точек маршрута в обратном направлении. Для этого формируется общая таблица вариантов распределения целей  $l$ :

$$l = m^n, \tag{1}$$

которые для  $q$ -го БЛА обозначены как  $\Pi_q^i$ , где  $i = [1, l]$ . Точки каждого  $\Pi_q^i$  передаются задаче нижнего уровня, где рассчитывается квазиоптимальный маршрут, после чего значение локальной целевой функции  $S(\Pi_q^i)$  возвращается задаче верхнего уровня, где используются результаты нижнего уровня. Затем из полученного множества допустимых планов формируются уникальные планы, обеспечивающие облет заданных целей. Из них выбирается план, обеспечивающий минимальное время выполнения задачи разведки группой БЛА путем решения минимаксной задачи (рис. 2).

Задача нижнего уровня, в которой требуется определить последовательность облета назна-

ченной на верхнем уровне группы целей, сводится к решению задачи коммивояжера [2], т.е. при заданных исходных данных:

$R_q$  –  $q$ -й БЛА из множеств  $R$  с известной заданной скоростью полета  $V_{кр}$  и географическими координатами начального местоположения;

$D = \{D_a | a = 1, n\}$  – множество точек земной поверхности (целей) с их существенными характеристиками (количество точек и их координаты).

Требуется: выбрать допустимый план полета  $q$ -го БЛА  $\Pi_q^{i*}$  из всех его возможных планов  $\Pi_q^i$  при заданном количестве целей  $D_a$ , при котором вес маршрута  $S(\Pi_q^{i*})$  был минимальным и маршрут облета проходил через каждую цель один раз:

$$\Pi_q^{i*} \in \Pi_q^i : S(\Pi_q^{i*}) \rightarrow \min, \tag{2}$$

где  $S(\Pi_q^{i*}) = \sum_0^{k_q} c_{ij}$  – общий вес маршрута  $q$ -го БЛА;  $c_{ij}$  – вес ребра между соседними точками, равный евклидову расстоянию между ними;  $\Pi_q^i = \langle D_{q1}, D_{q2}, \dots, D_{qk_q} \rangle$  – вариант плана полета

$q$ -го БЛА;  $\Pi_q^{i^*}$  – допустимый вариант плана полета  $q$ -го БЛА, при котором  $S(\Pi_q^{i^*}) \div V_{кр} < T_{доп}$ ;  $k_q$  – количество точек в плане полета  $q$ -го БЛА,  $1 < k_q \leq (n - (m - 1))$ ;  $T = \max \tau_q$  – время выполнения задачи разведки;  $\tau_q$  – время выполнения задачи разведки  $q$ -го БЛА;  $T_{доп}$  – время, ограниченное полетом на максимальную дальность при заданной скорости.

Для определения кратчайшего маршрута предлагается использовать новый способ азимутального ранжирования точек целенаправленным перебором (рис. 3).

Суть способа [3] заключается в нахождении центра, как среднеарифметического от координат всех назначенных точек, формировании кортежа точек, отсортированных по увеличению угла

$$\angle \alpha(D_{q1}) < \angle \alpha(D_{q2}), \dots, \angle \alpha(D_{qk_q-1}) < \angle \alpha(D_{jk_q})$$

между прямой, проходящей через центральную точку  $M$ , точку старта ИП, и лучом, отложенным от центральной точки  $M$  к точке  $D_q$ :

$$\Pi_q^i = \langle D_{q1}, D_{q2}, \dots, D_{qk_q} \rangle. \quad (3)$$

После этого происходит целенаправленный перебор всего кортежа  $\Pi_q^i$  по  $z$  точек, при  $z = k_q$  [3, 8], и формирование нового кортежа точек с целью исключения неоптимальных маршрутов между этими  $z$  точками (исключения зигзагов между точками, находящимися в одном секторе, но на разных расстояниях от центра):

$$\Pi_q^{i^*} = \langle D_{q1^*}, D_{q2^*}, \dots, D_{qk_q^*} \rangle. \quad (4)$$

Таким образом, получен план полета  $q$ -го БЛА, обеспечивающий условно минимальную протяженность маршрута через назначенные на верхнем уровне точки.

Для повышения точности разработан способ учета добавленной протяженности маршрута в зависимости от угла и радиуса разворота БЛА при достижении заданной точки (рис. 4).

В основе способа лежит особенность БЛА самолетного типа [4], когда при его повороте траектория описывает окружность и при этом прямая, проходящая через радиус окружности и точку начала маневра по смене курса, пере-

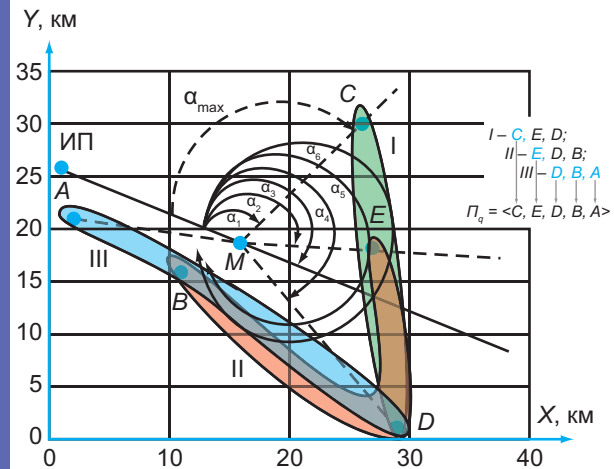


Рис. 3. Способ азимутального ранжирования точек целенаправленным перебором:  
I – перебор точек C, E, D;  
II – перебор точек E, D, B;  
III – перебор точек D, B, A

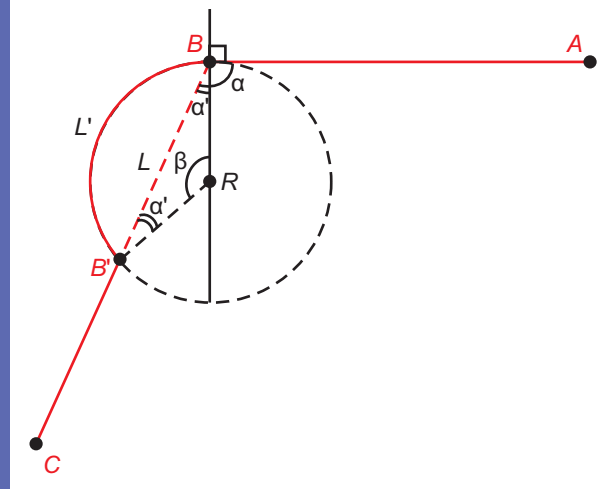


Рис. 4. Способ учета добавленной протяженности маршрута

секается с траекторией до смены курса (начала маневра) под прямым углом. Зная координаты точек  $A, B, C$ , вычисляем угол между прямыми, проходящими через старый  $AB$  и новый  $BC$  курсы. Радиус разворота  $R$  задан техническими характеристиками БЛА и не зависит от угла разворота, что дает возможность при использовании тригонометрических формул рассчитать добавочный путь  $\Delta$ , учитывающий радиус и угол разворота БЛА (рис. 5):

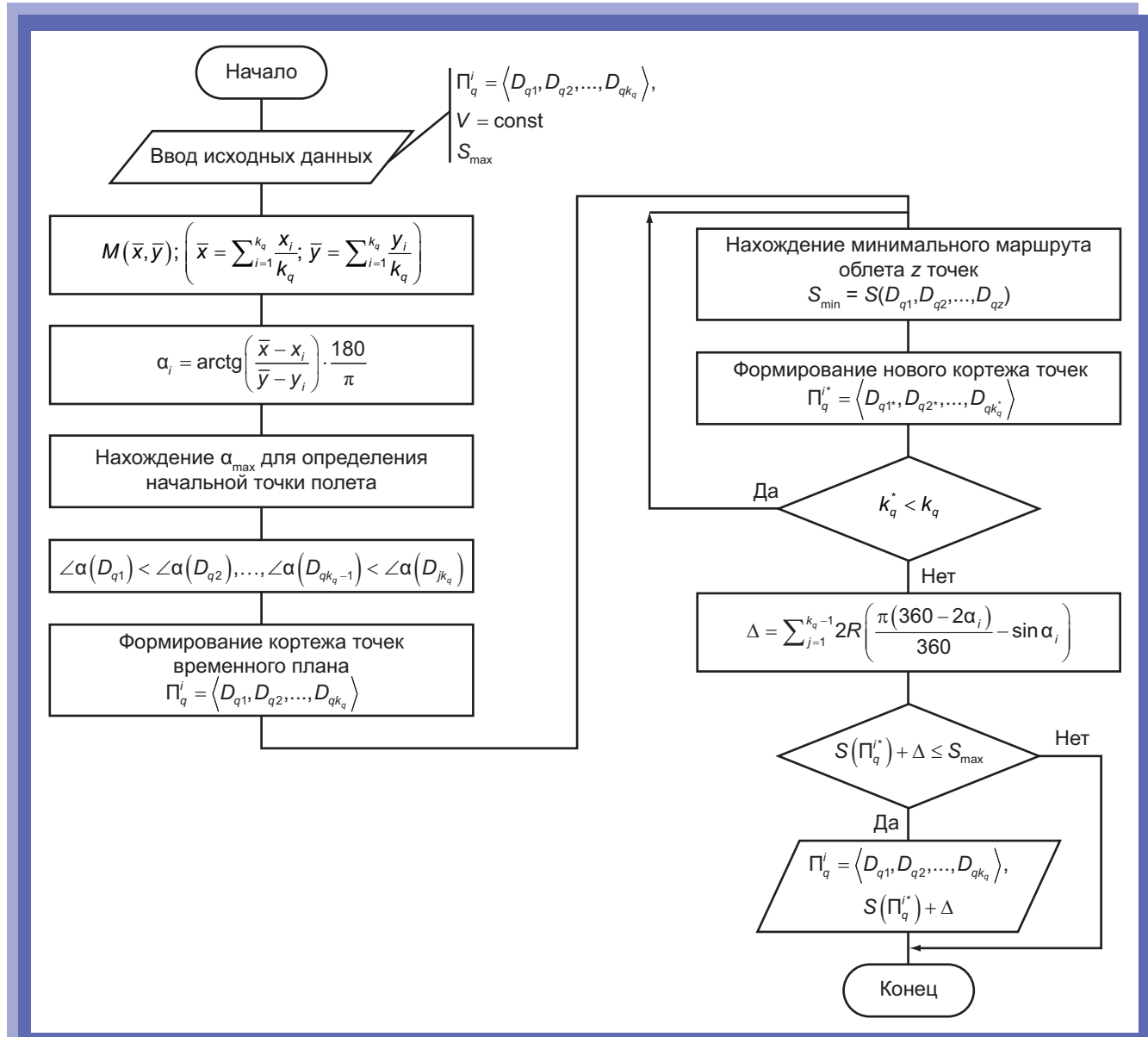


Рис. 5. Алгоритм управления движением БЛА на основе решения планарной задачи коммивояжера

$$\Delta = 2R \left( \frac{\pi(360 - 2\alpha)}{360} - \sin \alpha \right). \quad (5)$$

Результатом работы алгоритма управления движением группы БЛА при разведке территориально распределенных объектов и алгоритма определения квазиоптимального маршрута аппарата на основе решения планарной задачи коммивояжера являются планы полета и время выполнения задачи.

Для подтверждения характеристик алгоритма управления движением группы БЛА при развед-

ке целей проведен эксперимент, суть которого сводится к сравнению результатов нахождения оптимального плана применения группы БЛА, полученных неавтоматизированным способом и разработанным алгоритмом. Для большей значимости работы в качестве целей были выбраны учебно-боевые полевые стартовые позиции и места возможного сосредоточения ДРФ противника в одном из ракетных соединений РВСН.

Выявлено, что разработанный алгоритм позволяет сформировать оптимальный план полета группы БЛА при решении задачи разведки территориально распределенных целей.



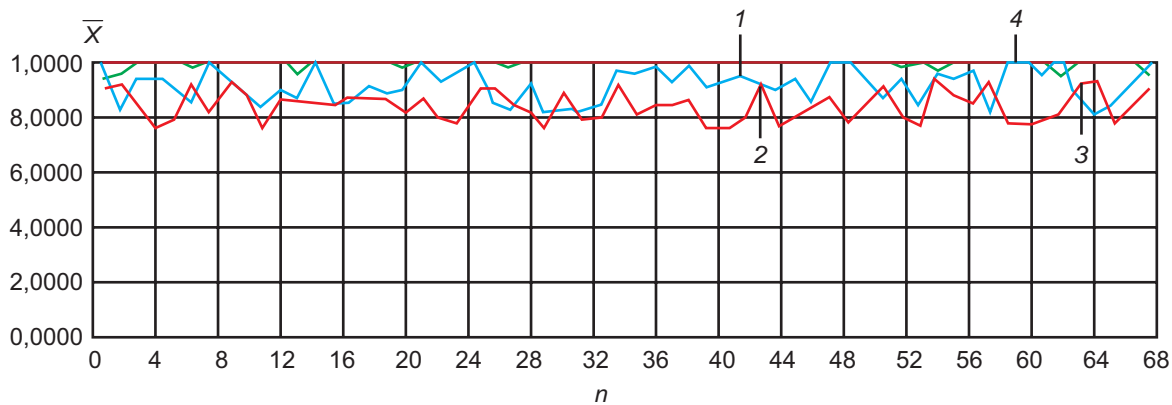


Рис. 6. Сравнение эффективности решения задачи коммивояжера различными методами: 1 – жадный алгоритм; 2 – алгоритм дальних городов; 3 – алгоритм центральных углов; 4 – алгоритм центральных углов модифицированный

Его программная реализация продемонстрировала большую эффективность по сравнению с экспертным (неавтоматизированным) методом определения оптимального плана – как по сокращению времени разведки, так и по оперативности принятия плана применения группы БЛА.

Для подтверждения характеристик алгоритма определения оптимального маршрута БЛА проведен эксперимент и произведено сравнение эффективности решения задачи коммивояжера различными методами (рис. 6):

жадный алгоритм:

$$\overline{X_{ЖА}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n} = 0,9159;$$

алгоритм дальних городов:

$$\overline{X_{ДГ}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n} = 0,8433;$$

алгоритм центральных углов:

$$\overline{X_{ЦУ}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n} = 0,9941;$$

алгоритм центральных углов модифицированный:

$$\overline{X_{ЦУФ}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n} = 1,000.$$

Разработанный алгоритм настроен и проверен на известном маршруте из 40 точек. Наиболее эффективным вариантом стал алгоритм с

### Настройка алгоритма и сравнение с генетическим алгоритмом

Варианты метода при n = 40	Метод центральных углов $\tau_p/S$ , с/км	Генетический алгоритм $\tau_p/S$ , с/км
z = 4	<1	671,8
z = 5	<1	647,8
z = 6	2,5	627,7
z = 7	18,9	614,7
z = 8	192,6	594,2
z = 9	3784	586,3
		61,1
		725

количеством точек целенаправленного перебора z = 8 (см. таблицу).

Таким образом, разработанный алгоритм обладает низкой требовательностью к вычислительным ресурсам и позволяет за короткое время построить квазиоптимальный маршрут облета точек. Еще его отличает большая эффективность по сравнению с другими эвристическими алгоритмами.

### ВЫВОДЫ

Решены научная и практическая задачи по разработке алгоритмов управления движением группы РТК ВН (БЛА) в различных условиях, позволяющие повысить эффективность работы

операторов. В качестве новизны научных результатов можно отметить следующие задачи:

1. Для управления разведывательной группой БЛА предложен новый способ, который разбивает данную задачу на два уровня: верхний – назначения целей каждому БЛА и нижний – определения оптимального маршрута облета назначенных на верхнем уровне целей.

2. Для решения задачи верхнего уровня разработан алгоритм управления движением группы при разведке территориально распределенных целей, использующий сокращенную комбинаторную задачу о назначениях (размещения без повторений с исключением обратных маршрутов). Для задачи нижнего уровня разработан алгоритм определения квазиоптимального маршрута БЛА на основе решения планарной задачи коммивояжера новым способом, учитывающим углы разворота и имеющим низкую вычислительную сложность.

Результаты могут быть применены в деятельности расчетов БЛА для определения оптимальных маршрутов на этапе подготовки плана применения, а также в качестве программы обучения,

поскольку она позволяет сравнивать продолжительность маршрутов, построенных оператором и рассчитанных программой, и выставлять оценку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подлипыян П.Е., Максимов Н.А. Многоэтапный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769>.

2. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55782>.

3. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. М.: ИД Наука, 2013. 168 с.

4. Копин А.М., Проталинский И.О., Медников Н.А. Формализация задачи минимизации энергетических потерь с применением эвристического анализа // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 1. С. 15–21.



УДК 629.735.33

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ СНИЖЕНИЯ ВЫСОТЫ ДЛЯ МНОГОРОТОРНЫХ ПЛАТФОРМ

А.В. ПАЛАГИН, канд. физ.-мат. наук А.А. ДЕГТЯРЕВ  
(ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ»)

*Рассмотрены особенности режимов снижения многороторных платформ-подъемников. Предложен режим с рассеиванием энергии за счет высокого аэродинамического сопротивления фюзеляжа при боковом обдуве. Для модельного аппарата-подъемника экономия энергии на этапе снижения позволяет достигать высоты сброса в 1,8 раза больше по сравнению с обычным пологим снижением.*

**Ключевые слова:** БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ; КВАДРОКОПТЕР.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) на базе многороторных платформ (МП) (квадрокоптеры) перемещаются «по горизонтали». В то же время энергетические возможности современных электрических силовых установок позволяют выполнять маневрирование и в вертикальной плоскости.

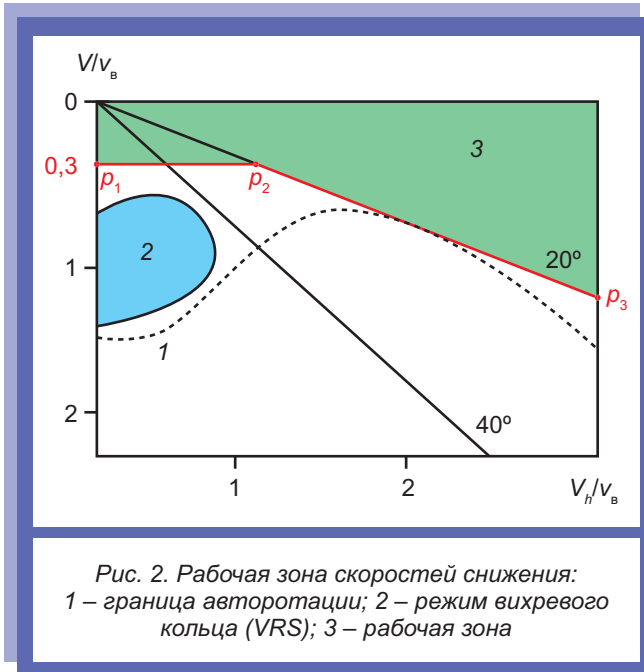
Рассмотрим полет МП-подъемника, предназначенного для сброса груза с большой высоты. Полет такого аппарата состоит из следующих этапов: набор высоты, сброс груза, снижение высоты, посадка. В режиме снижения МП-подъемник не выполняет «полезной работы». Желательным является снижение без затрат энергии – аналог вертолетной «авторотации» либо возвращение потраченной ранее энергии в аккумуляторную батарею (АКБ) «рекуперация».

Для МП с воздушными винтами фиксированного шага (рис. 1) классическая авторотация невозможна. Существует теоретическая возможность переворота аппарата и полета «вверх ногами», при этом будут обеспечены условия для авторотации, но такой маневр на практике представляется слишком сложным.

По теории вертолета [1] физическим ограничением режима снижения является опасное состояние «вихревого кольца» – струя воздушного винта разворачивается встречным потоком и вновь попадает в область за винтом, образуя устойчивый тороидальный вихрь, в результате



управление нарушается и происходит потеря управляемости вертолёта [2]. Расположение зоны вихревого кольца на карте безразмерных скоростей представлено на рис. 2. Превысить скорость снижения  $0,3v_v$ , где  $v_v$  – индуктивная скорость на режиме висения, можно при наличии поступательной скорости. Практически возможно использование диапазона скоростей,



ограниченного отрезками  $p_1-p_2$  по уровню  $0,3v_b$  и отрезком с углом наклона  $20^\circ$   $p_2-p_3$ .

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для расчета параметров режима установившегося снижения МП-подъемника была создана математическая модель, включающая: ВЕМТ

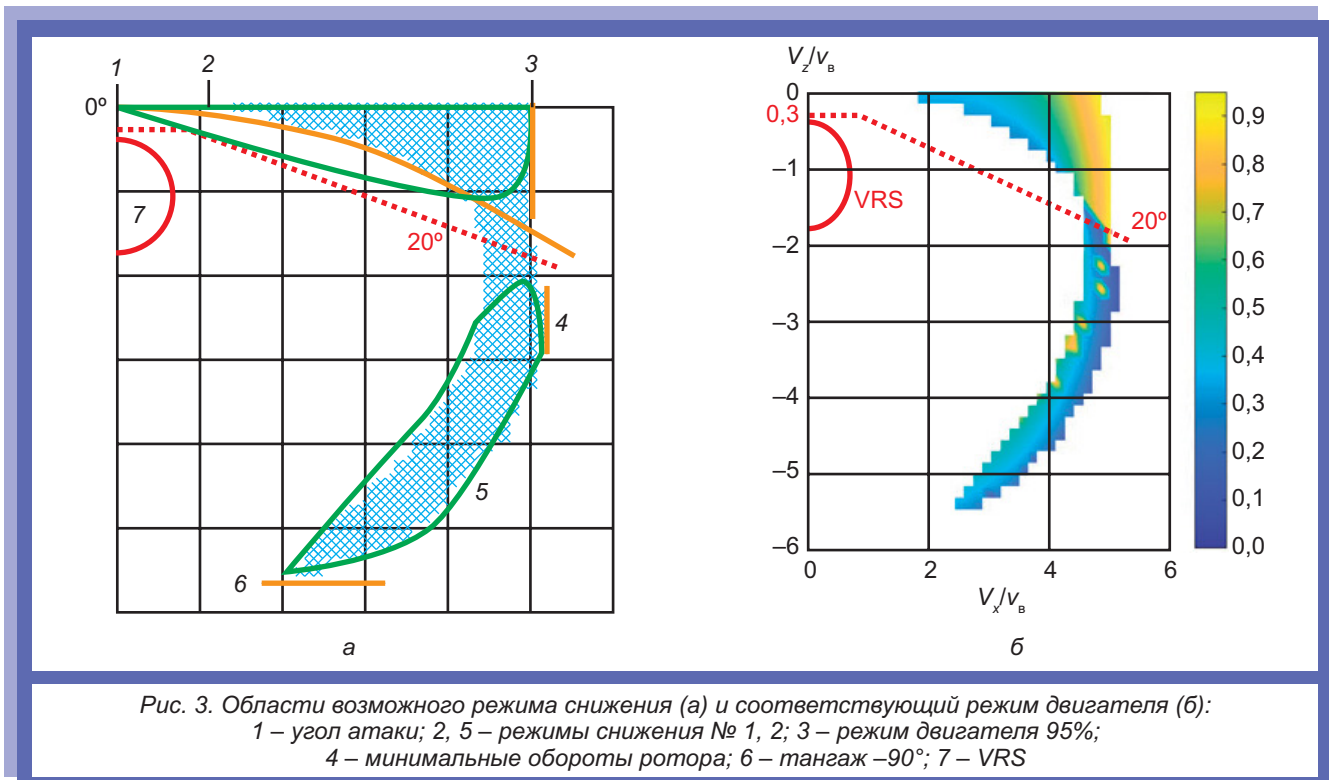
модель воздушного винта фиксированного шага [3]; модель литиевой АКБ на основе соотношений Шепарда [4]; модели бесколлекторной силовой установки [5].

С использованием созданной математической модели решалась оптимизационная задача минимизации мощности, отбираемой от АКБ в режиме установившегося полета с заданными вертикальной  $V_z$  и горизонтальной  $V_x$  скоростями. В качестве ограничений использовались: максимальный ток от АКБ; максимальные и минимальные углы атаки, режимы двигателя, частоты вращения воздушного винта.

Минимальный угол атаки в расчетах ограничен  $0^\circ$  – для соответствия схеме ВЕМТ теории, предполагающей прохождение потока «сверху вниз». При небольших отрицательных углах атаки характер тока не меняется и не влияет на объективность полученных результатов.

Для анализа эффективности режима снижения введен КПД режима снижения  $\eta_{down}$ , вычисляемый как отношение скорости уменьшения потенциальной энергии к скорости расходования химической энергии, запасенной в АКБ:

$$\eta_{down} = \frac{m \cdot g \cdot V_z}{dE_{bat}/dt}$$



где  $m$  – текущая масса БЛА;  $g$  – ускорение свободного падения;  $E_{\text{bat}}$  – запас химической энергии в АКБ.

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

В результате решения задачи определена область возможного режима установившегося снижения (рис. 3, а) и соответствующего ему режима двигателя (рис. 3, а, б).

Полученная зона не доходит до прямой с наклоном  $20^\circ$ , полет в районе которой возможен в соответствии с экспериментальными данными. Причина заключается в рассмотрении только положительных углов атаки.

Снизу зона ограничивается значением тангажа  $-90^\circ$ . Правая граница определяется минимальными оборотами ротора.

В верхней части графика (рис. 3, б) наблюдается увеличение режима двигателей вплоть до максимального по мере роста горизонтальной скорости. На графике тока, построенном в тех же осях при нулевой вертикальной скорости, наблюдается слабо выраженный минимум тока потребления при некоторой горизонтальной скорости, полностью соответствующий вертолетной теории.

Интерес представляет резкая граница со скачкообразным изменением режима двигателя (от 70 до 30%) в области прямой  $20^\circ$  (рис. 4). Здесь проходит граница между первым и вторым режимами снижения. Граница заметна на графиках тангажа (рис. 4, а) и угла атаки (рис. 4, б). Отдельные «выбросы» в середине доступной области можно интерпретировать как зону, в районе которой оба режима снижения близки по энергозатратам.

Физически эти режимы соответствуют разным механизмам получения подъемной силы. В режиме № 1 подъемная сила обеспечивается тягой воздушного винта. В режиме № 2 моторные сборки создают достаточную подъемную силу и уравнения баланса выполняются при минимальном режиме работы двигателей.

Полученная по результатам моделирования карта КПД для всей расчетной области приведена на рис. 5. При снижении высоты КПД достигает 15% в районе пересечения с прямой  $20^\circ$  (режим № 1). Переход в режим № 2 позволяет снижаться с эффективностью до 170%. Тангаж при этом близок к  $90^\circ$ , а потребляемый ток не больше 18% от максимального. Значительный рост эффективности снижения в режиме № 2 вызван особенностями конструкции БЛА (см. рис. 1):

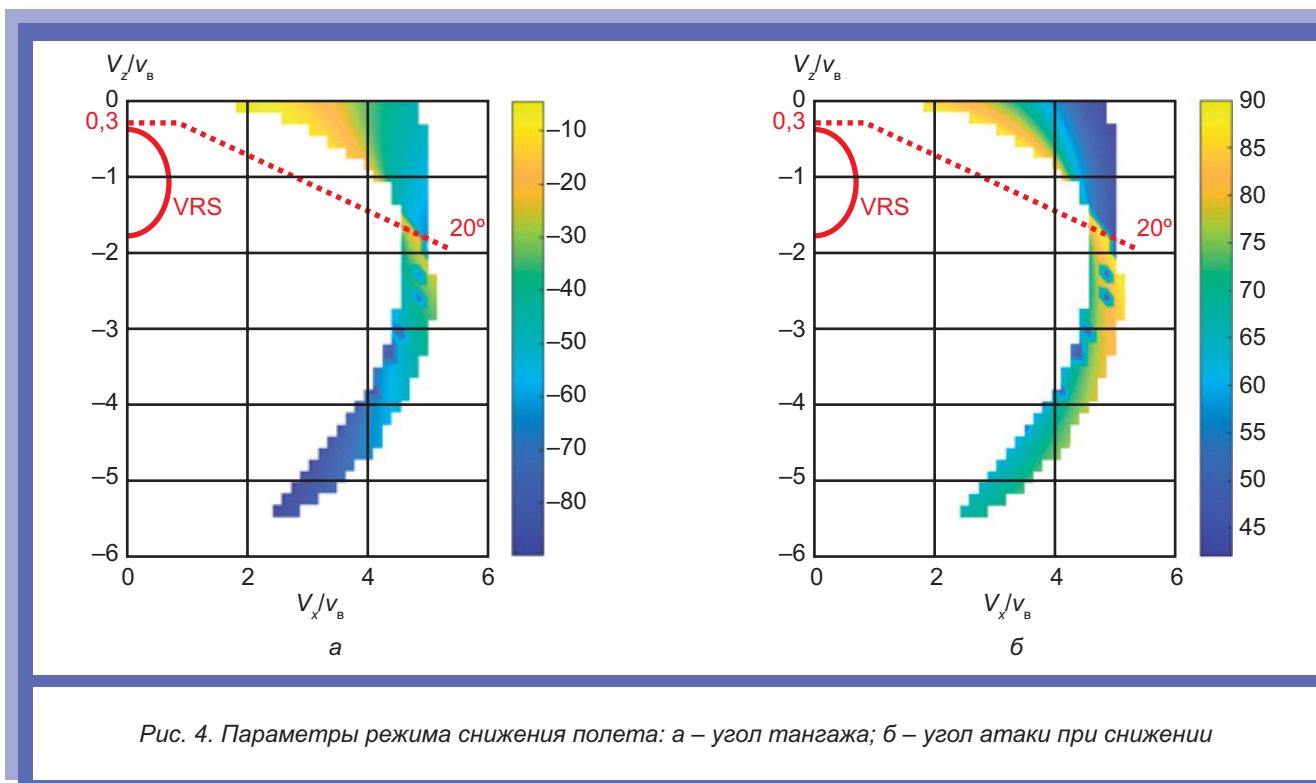


Рис. 4. Параметры режима снижения полета: а – угол тангажа; б – угол атаки при снижении

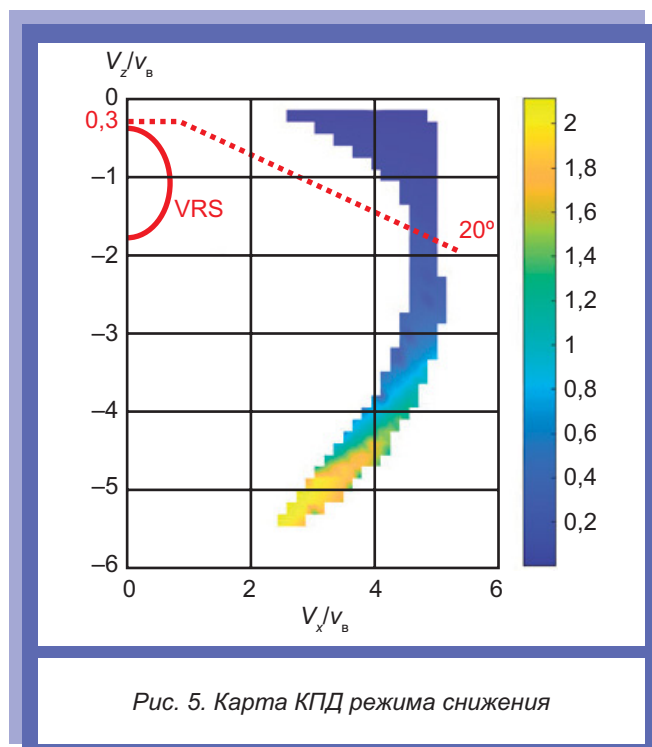


Рис. 5. Карта КПД режима снижения

минимальной площадью миделевого сечения и развитой боковой поверхностью моторных сборок.

Для рассматриваемой модельной МП определен расчетный расход энергии по этапам полета набор/снижение 52/48% и 92/8% для режимов снижения № 1 и 2 соответственно. В итоге режим № 2 оказался в 6 раз экономичнее, а достигнутая высота примерно в 1,76 раза больше.

## ВЫВОДЫ

Проведенный анализ режимов снижения модельных МП-подъемников показывает, что при обычном режиме снижения КПД составляет 18%, а при снижении с большим углом тангажа и рассеивании энергии за счет сопротивления фюзеляжа – 170% (КПД используется как отношение рассеиваемой потенциальной энергии БЛА к энергии, отбираемой от АКБ), это позволяет достигать в 1,8 раза большей высоты при подъеме и сбросе груза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонсон У. Теория вертолета: в 2 кн. М.: Мир, 1983. Кн. 1: Авиационная и ракетно-космическая техника. 502 с.
2. A vortex-ring-state-avoiding descending control strategy for multi-rotor UAVs / L. Chenglong [et al.] // 34<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC). Hangzhou, China: IEEE, 2015. P. 4465–4471.
3. Палагин А.В., Дегтярев А.А. Определение сил и моментов, действующих на ротор квадрокоптера // Тр. 64-й Всерос. науч. конф. МФТИ. М.: МФТИ, 2021. С. 232–234.
4. A cell level model for battery simulation / S. Thanangasundram [et al.] // EEVC European Electric Vehicle Congress. Brussels, Belgium, 2012.
5. Drela M. Second-Order DC Electric Motor Model [Электронный ресурс]: URL: [http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motor2\\_theory.pdf](http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motor2_theory.pdf) (дата обращения: 04.08.2022).



---

---

## СРЕДСТВА ПОРАЖЕНИЯ

---

---

УДК 623.421.4 + 678.7 + 678.8

# КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ЗАРЯДОВ «ЩЕТОЧНОГО» ТИПА ДЛЯ СТАРТОВЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМ БЛИЖНЕГО БОЯ

Е.А. ТИХОНОВА, д-р техн. наук Т.А. ЕНЕЙКИНА, канд. техн. наук Г.В. ИГНАТЬЕВ,  
А.Ю. АБРОСИМОВ, д-р хим. наук Р.Ф. ГАТИНА  
(ФКП «Государственный научно-исследовательский институт химических продуктов»)

*Рассматриваются доступные конструкции реактивных метательных зарядов средств ближнего боя, показаны их недостатки и преимущества. Отмечено, что направления российских и зарубежных разработок практически аналогичны и осуществляются по двум вариантам: вкладные и «щеточные» метательные заряды. Требования по повышению эффективности технических характеристик ручных гранатометов потребовали перехода к конструкциям «щеточного» типа с использованием компаундов для сборки таких изделий. Проанализированы способы крепления топливных элементов различных форм к дну стартовых реактивных двигателей.*

**Ключевые слова:** СРЕДСТВА БЛИЖНЕГО БОЯ; ЗАРЯД «ЩЕТОЧНОЙ» КОНСТРУКЦИИ; МЕТАТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД; КРЕПЛЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

### ВВЕДЕНИЕ

К средствам ближнего боя (СББ) с реактивным принципом метания относятся гранатометы [1]. Рассмотрим метательные заряды (МЗ) к ним, сгорающие в пределах пусковой трубы. МЗ в таких гранатометах применяются в составе стартового реактивного двигателя (СРД) и состоят из пучка трубок и воспламенителя из дымного ружейного пороха (ДРП), размещаемого в картузе (торцевое воспламенение) или в осевых воспламенительных устройствах в виде перфорированной металлической трубки.

Различают два основных типа МЗ [1]:

вкладные (в виде пучка пороховых трубок) или вкладные составные (из двух последовательно расположенных пучков трубок);

«щеточные» (в виде пучка пороховых трубок с узлом крепления к дну камеры сгорания).

### КОНСТРУКЦИИ ЗАРЯДОВ И СПОСОБЫ ИХ СБОРКИ

Для закрепления вкладных МЗ в камере СРД используются мелкоперфорированные стальные диски, которые скрепляются с дном СРД винтовым соединением. Один из вариантов конструкции с использованием диска со множеством

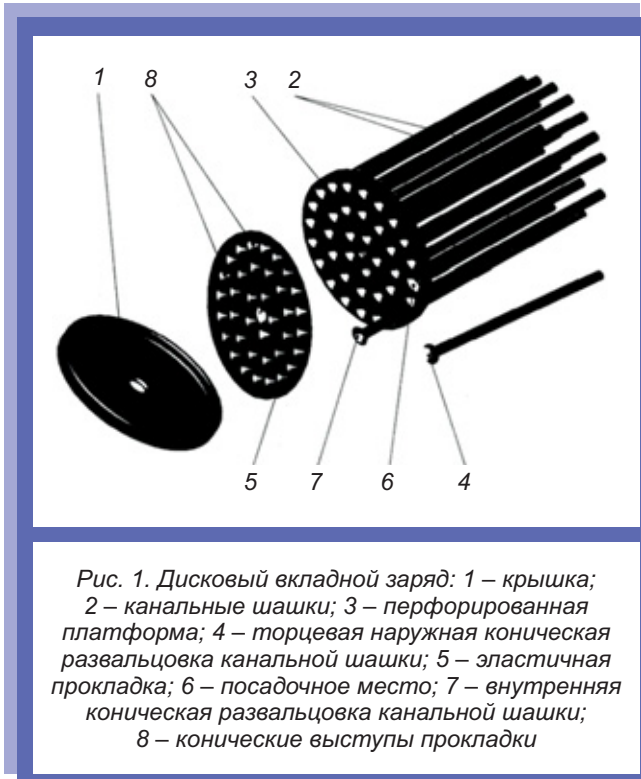


Рис. 1. Дискový вкладной заряд: 1 – крышка; 2 – канальные шашки; 3 – перфорированная платформа; 4 – торцевая наружная коническая развальцовка канальной шашки; 5 – эластичная прокладка; 6 – посадочное место; 7 – внутренняя коническая развальцовка канальной шашки; 8 – конические выступы прокладки

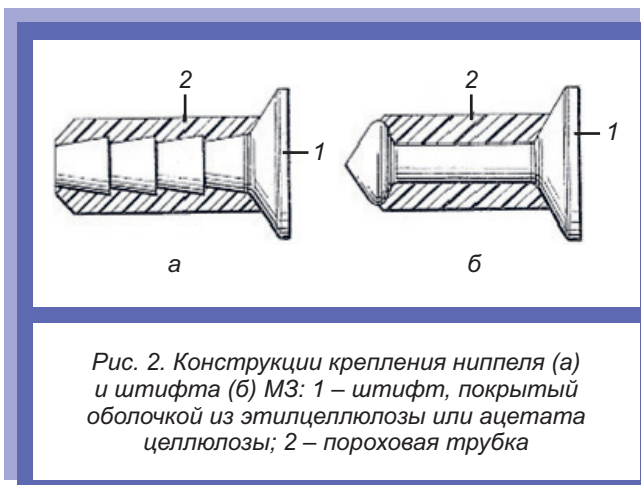


Рис. 2. Конструкции крепления ниппеля (а) и штифта (б) МЗ: 1 – штифт, покрытый оболочкой из этилцеллюлозы или ацетата целлюлозы; 2 – пороховая трубка

отверстий представлен на рис. 1 [2]. Заряд твердого ракетного топлива содержит крышку с канальными шашками. Они выполнены с торцевой конической развальцовкой с одной стороны и установлены в перфорированную платформу в виде диска со множеством отверстий. На каждом отверстии со стороны крышки выполнено посадочное место, эквидистантное наружной конической развальцовке канальной шашки. Канальные элементы поджаты крышкой через эластичную прокладку в виде диска с диаметром, равным диаметру платформы. Со стороны платформы диск имеет множество конических

выступов, эквидистантных внутренней конической развальцовке шашек.

Такая конструкция:

повышает надёжность и эффективность работы заряда твёрдого топлива;

обеспечивает надёжное крепление канальных шашек поджатием их к посадочному месту платформы оригинальной прокладкой с коническими (по числу шашек) выступами и полное их сгорание при работе двигателя;

обеспечивает возможность автоматизации процесса изготовления порохового заряда, что исключает «человеческий фактор» (ошибки при производстве).

Однако эта конструкция приводила к значительным энергетическим потерям при истечении пороховых газов через перфорацию диска. По мере повышения требований к эффективности МЗ (увеличение скорости и дальности полета гранаты) возрастал уровень перегрузок (давление на пороховые трубки) во время выстрела, приводящий к разрушению торцов канальных шашек. Поэтому в настоящее время применяется «щеточная» конструкция, когда МЗ скрепляются с дном СРД с использованием специальной оснастки для формования узла крепления из залитого в него перед погружением пучка трубок компаунда.

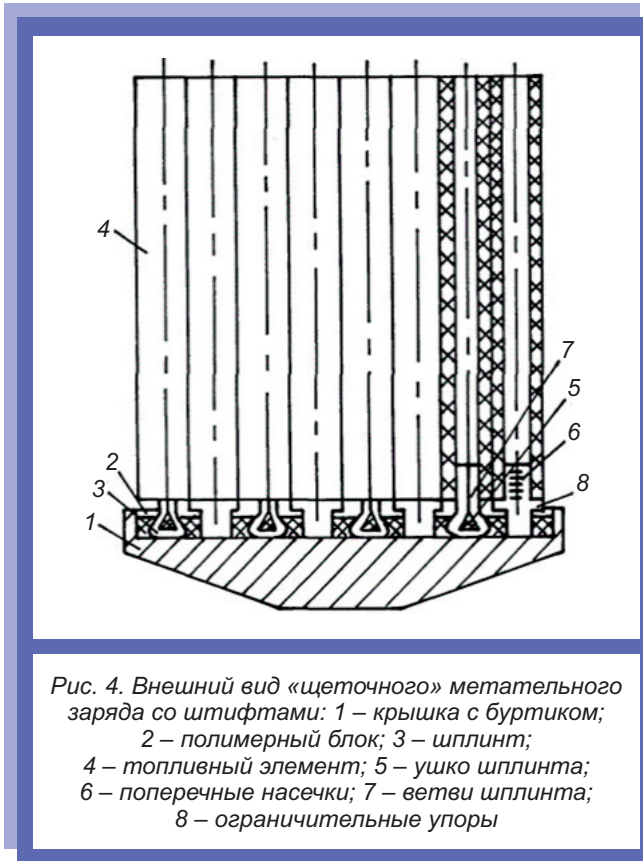
Анализ специальной литературы о способах крепления топливных (пороховых) трубок к дну СРД показал, что совмещение двух способов размещения пороховых трубок в узле крепления заряда «щеточного» типа возможно с использованием штифтов и клеящих составов. Так, при штифтовых способах крепления топливных трубок к дну двигателя они предварительно промазываются клеем. На рис. 2 представлен зарубежный вариант конструкции штифта и ниппеля [3].

Штифт, покрытый с поверхности пластиковой оболочкой, перед установкой в пороховую трубку погружается в растворитель пластика и нитратов целлюлозы: этиллактат (35% объема) – бутилацетат (65% объема) или ацетон. Растворитель затем удаляется нагреванием.

В первых отечественных конструкциях «щеточных» зарядов использовались различные виды штифтов (рис. 3) [4].

При такой сборке в комплект заряда входит крышка с буртиком, заполненная эластич-





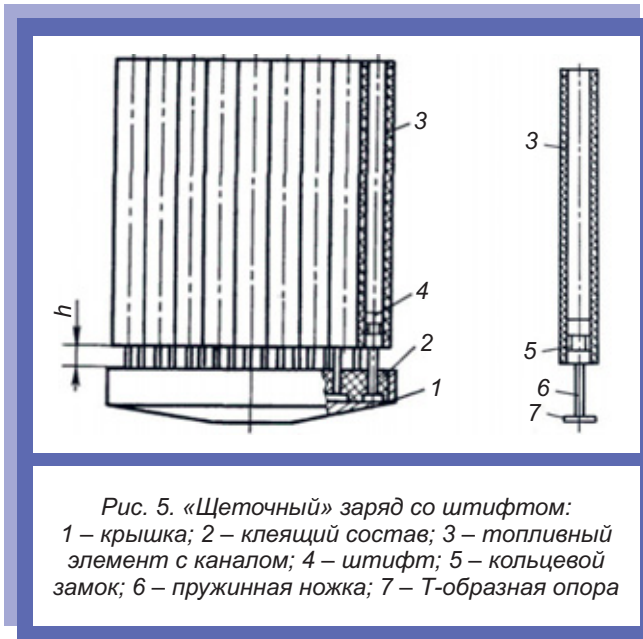
ным клеящим материалом, и установленными штифтами, на которых закреплены пороховые трубки (рис. 4). Штифты изготовлены в виде шплинта, ветви которого вклеены в канал элемента, а ушко – в эластичный клеящий материал. На наружной поверхности шплинта, закрепленного в канале шашки, нанесены поперечные насечки, а на обеих ветвях шплинта выполнены ограничительные упоры, контактирующие с торцом топливной трубки. Такая конструкция заряда обеспечивает надежное крепление шашек в крышке, исключая разрушение заряда.

Недостатками такого крепления порохового заряда к дну двигателя являются:

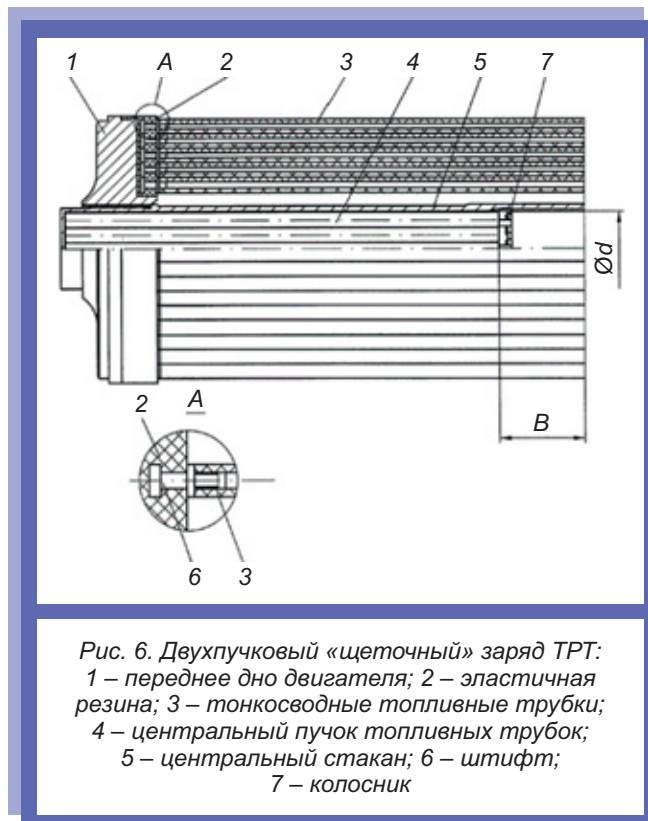
низкая технологичность и высокая трудоемкость сборки;

применение штифтов не оправдывает себя на «напряженных» МЗ (с большими массами заряда и скоростями полета гранаты), поскольку при этом необходимо знать точное количество топливных трубок, а это при больших массах МЗ (600...900 г) может привести к ошибке в 1-2 трубки.

Вариантом сборки заряда со штифтом является способ, при котором заряд твердого ракетного топлива (ТРТ) включает заполненную клеящим составом крышку с установленными на



штифтах канальными пороховыми элементами (рис. 5) [5]. Штифты вклеены в канал порохового элемента. Они выполнены с кольцевым замком под клей на цилиндрической головке с диаметром, равным каналу трубки, и пружинной ножкой с опорой, жестко установленной в крышку с воздушным зазором между канальными поро-



ховыми шашками и клеящим составом. Такая сборка повышает надежность и эффективность заряда твердого ракетного топлива в любом температурном диапазоне.

Сборка заряда ТРТ заключается в следующем: все детали, входящие в него, изготавливаются предварительно. Сначала комплектуют пороховые каналные элементы 3, в которые клеивают штифты 4 с цилиндрической головкой, имеющие кольцевой замок 5 для клея, эквидистантный каналу трубчатого пороха. После полимеризации клеящего состава расчетное количество пороховых каналных трубок с вклеенными штифтами устанавливают T-образной опорой 7 пружинной ножки 6 в клеящий состав 2, залитый в крышку 1, с образованием воздушного зазора  $h$  между каналными пороховыми элементами 3 и клеящим составом 2. Заряд готов к применению.

В качестве клеящего состава для жесткой заделки шашек в крышку рекомендуется применять компаунды, которые после полимеризации стекленеют и обладают лучшей адгезией, чем эластомеры [5]. Кольцевой замок на цилиндрической головке штифта используется для удержания клея и предотвращения отрыва вклеенных каналных элементов при работе заряда.

Пружинная ножка штифта предназначена для гашения удара при воспламенении и вибрационном горении пороховых элементов.

Вариант сборки «щеточных» зарядов с применением штифтов представлен в патенте [6]. Заряд ТРТ на основе тонкосводных топливных трубок одной длины с постоянным по длине сечением изготовлен в виде двух пучков трубок (рис. 6). Один из пучков трубок 3 образован топливными трубками, надетыми на штифты 6, размещенные на переднем днище двигателя 1 в завулканизированной эластичной резине. Другой, пучок 4, помещен относительно первого пучка со смещением на расстояние «В» в сторону переднего днища двигателя в центральный стакан 5, скрепленный с передним днищем и удерживаемый в нем колосником 7. Центральный пучок 4 выполнен с диаметром, не выходящим за пределы межсоплового пространства двигателя. Величина смещения центрального пучка равна длине предсоплового объема двигателя. Представленная конструкция позволяет обеспечить высокую начальную скорость выстрела, сохранить уровень максимального давления и исключить образование дегрессивно догорающих остатков топлива.

Также применяются «щеточные» метательные заряды других конструкций (рис. 7, 8) [7]. Заряд ТРТ в виде пучка трубок или элементов другого профиля, скрепленных негорючим полимерным материалом с дном камеры двигателя. На поверхности дна корпуса выполнен один или несколько пазов с переменным, уменьшающимся в сторону заряда сечением и суммарной площадью  $(0,4...0,7) \cdot S_{\text{дна}}$ .

Заряд содержит пучок топливных трубок 1 (либо элементов другого профиля), заделанных концом в шайбу 2 из негорючего полимерного материала (полиуретана, силикона), выполняющего одновременно функции крепящего и бронирующего состава. Шайба 2 формируется путем заливки полимерного состава непосредственно на дно 3 камеры двигателя, где расположены один или несколько пазов с переменным по глубине сечением, уменьшающимся к поверхности дна, которые повышают прочность скрепления. При заливке крепящий состав заполняет полости пазов и после погружения в него концов топливных трубок полимеризуется. Благодаря

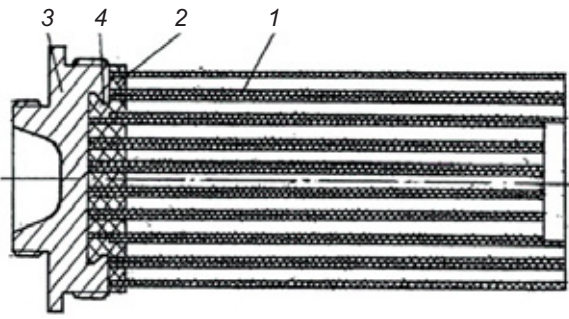


Рис. 7. «Щеточный» метательный заряд:  
1 – топливные трубки; 2 – шайба;  
3 – дно камеры двигателя; 4 – паз

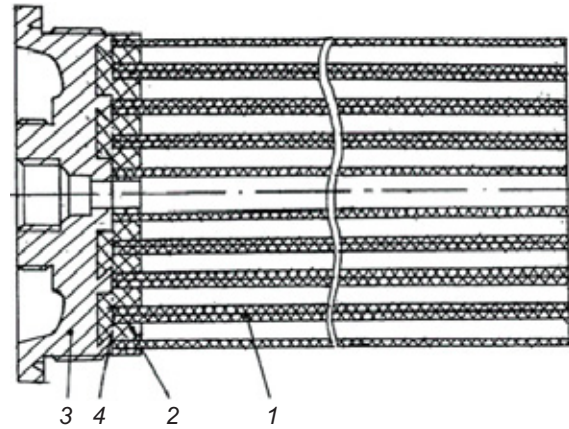


Рис. 8. «Щеточный» метательный заряд:  
1 – топливные трубки; 2 – шайба;  
3 – дно камеры двигателя; 4 – паз

переменному, сужающемуся к поверхности дна профилю паза образуется замок, который герметизирует место стыка заряда с дном камеры.

Известен «щеточный» заряд ТРТ для СРД [8] (рис. 9).

Пороховой заряд для СРД состоит из нескольких цилиндрических пороховых блоков небольшого диаметра, которые своими концами, обращенными к толкающему соплу, встроены в подвесной блок из синтетической смолы внутри корпуса двигателя. Подвесной блок 2 состоит из двух слоев, из которых слой 3, расположенный на стороне, обращенной к камере сгорания, выполнен из жесткого твердого материала (например, из полиэфирной смолы с добавлением диоксида натрия), а другой слой 4, обращенный к камере сгорания, выполнен из податливого мягкого материала (например, из полиэфирной смолы).

Таким образом, конструкция демонстрирует хорошие характеристики воздействия ударных нагрузок и вибрации как во время хранения и транспортировки, так и при ускорении во время запуска двигателя. Недостатком считается то, что при ударах перпендикулярно продольной оси отдельных пороховых блоков по причине их жесткого крепления пороховые блоки на концах подвергаются опасному режущему воздействию.

В настоящее время используются более технологичные конструкции и способы крепления пучка топливных трубок ко дну двигателя (рис. 10) [9].

Сборка заряда производится таким образом, что дно двигателя обрабатывается дополни-

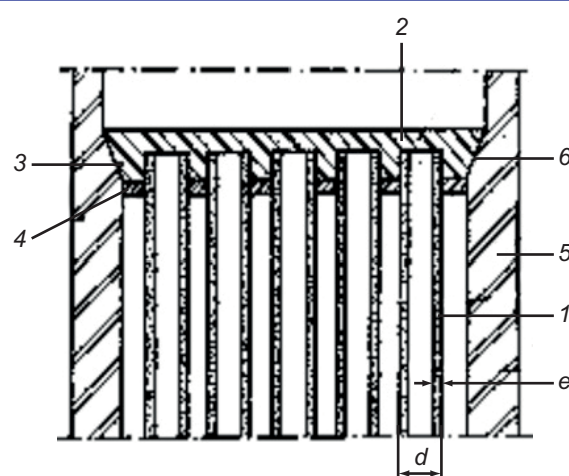


Рис. 9. «Щеточный» метательный заряд:  
1 – топливные трубки; 2 – подвесной блок;  
3 – твердый слой подвесного блока;  
4 – мягкий слой подвесного блока;  
5 – корпус двигателя; 6 – конус подшипника

тельным клеем на основе поливинилбутирала. После высушивания он заливается полимерным крепящим составом из полиуретана, отвердителем которого наряду с диоктилсебацанатом является фталимид. В крепящий состав устанавливается пучок топливных пороховых трубок выровненным торцом. Пучок поджигается через воспламенитель. Для обеспечения заданной скорости полета гранаты (дальности, давления) трубки должны сгорать полностью, что требует

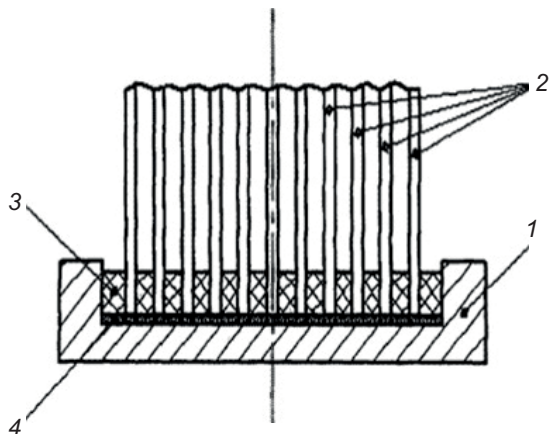


Рис. 10. «Щеточный» метательный заряд:  
1 – дно двигателя; 2 – пучок топливных трубок;  
3 – крепящий состав; 4 – дополнительный клей  
(подслой) на основе поливинилбутирала

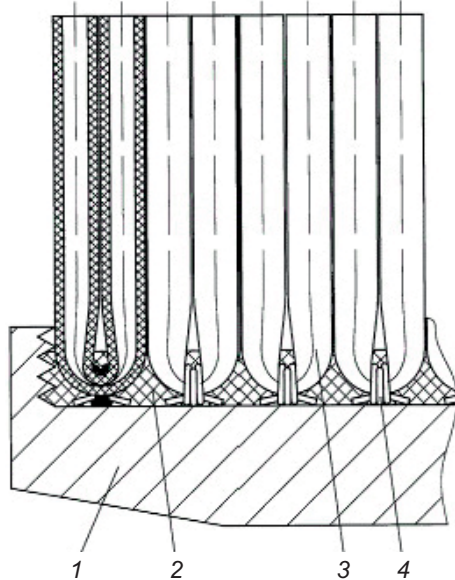


Рис. 11. «Щеточный» заряд с пороховыми  
элементами U-образной формы:  
1 – чашеобразное дно двигателя; 2 – компаунд;  
3 – U-образные пороховые элементы;  
4 – хлопчатобумажная нить

обеспечения их надежного крепления как между собой, так и к дну двигателя.

Что касается эластичного крепящего состава, то практика показала, что крепление топливных

трубок производится в основном с применением клеевых композиционных материалов [4].

В странах НАТО, и особенно во Франции, при разработке новых МЗ к СББ отдают предпочтение созданию узлов крепления топливных трубок с использованием уретановых композиций [10, 11].

В отечественных разработках, связанных с созданием высокоскоростных изделий, таких как «Вампир», «Клюква», также сделан акцент на использование уретановых композиций – компаунд уретановый КВ-01 [11], уретановый герметик ВТ-21.

Главным отличием компаундов считается их эластичность, которая оценивается предельным относительным удлинением. Даже при эксплуатации в  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  у них остается запас 25...30% эластичности. При температуре  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а это является одним из основных условий для обеспечения надежной работоспособности МЗ при срабатывании.

Практика эксплуатации МЗ «Вампир» из числа «напряженных» систем, для которого в прошлом был отработан эпоксиуретановый состав УП-4-262-1 с показателем условной прочности при растяжении в момент разрыва  $\sigma_p = 3,6...4,2\text{ МПа}$ , но с малым относительным удлинением  $\epsilon = 250\%$ , показала высокую надежность работы МЗ.

Тем не менее наблюдались отдельные случаи отрыва или излома трубок при работе МЗ – после вылета из трубы и начала движения системы. Анализ опытов показал, что причиной могло стать не только нарушение технологии подготовки доньев, но и наличие в партии компаунда с  $\sigma_p$ , который при минусовых температурах становился хрупким.

Использование клеящих составов для крепления топливных элементов к дну двигателя расширяет возможности конструирования МЗ для СРД в части применения порохов по форме, отличной от трубки. Например, в одном из вариантов топливные элементы представлены в виде U-образной формы (рис. 11) [12].

Пороховой элемент утоплен одним концом в эластичный клеящий материал. Каждый элемент по месту изгиба обмотан и обвязан хлопчатобумажным материалом. U-образный изгиб порохового элемента позволяет закрепить нитку

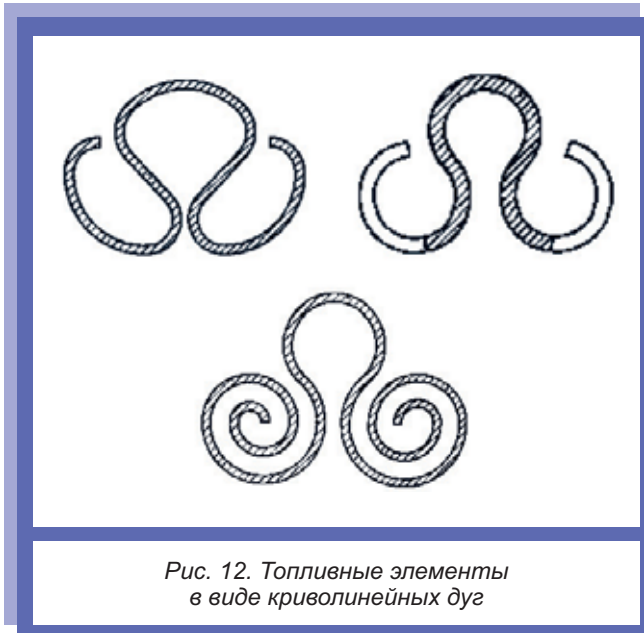


Рис. 12. Топливные элементы в виде криволинейных дуг

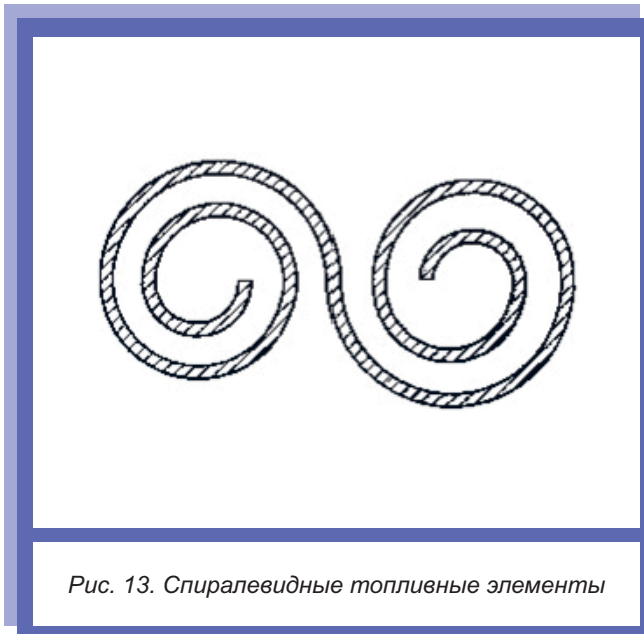


Рис. 13. Спиралевидные топливные элементы

и при погружении ее в эластичный клеящий материал обеспечивает надежное крепление. Это позволяет использовать пороховые элементы, изготовленные из любой рецептуры пороха и практически любого поперечного сечения.

В патенте Франции [13] рассматриваются топливные элементы из двух- и трехосновных порохов сложного поперечного сечения в виде трех разомкнутых окружностей (криволинейных дуг, предпочтительно круглых), соединенных между собой и образующих три продольных зазора (рис. 12). Возможно также соединение двух спиралевидных сечений с образованием

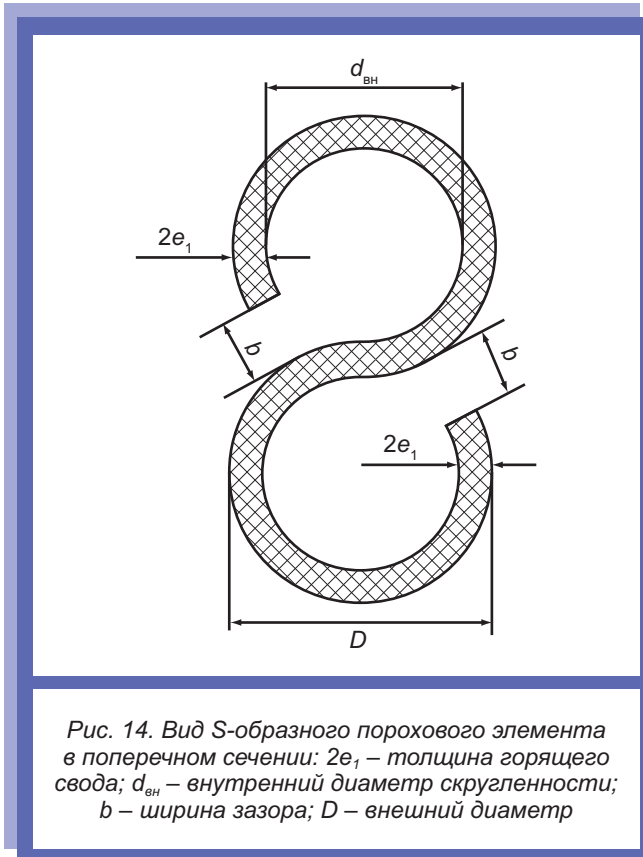


Рис. 14. Вид S-образного порохового элемента в поперечном сечении:  $2e_1$  – толщина горящего свода;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр скругленности;  $b$  – ширина зазора;  $D$  – внешний диаметр

двух продольных зазоров (рис. 13). Метательные блоки имеют разные номинальные размеры в зависимости от расположения в камере двигателя: в центре или на периферии пучка. Авторы считают, что это исключает перепад давлений по их поверхностям, хотя такая форма топливных элементов требует использования пресс-оснастки сложного профиля и ограничивает массу порохового заряда, размещаемого в камере СРД.

Исключить указанные недостатки предлагается за счет использования топливных элементов S-образного сечения длиной 150 мм, при котором ширина зазора  $b$  составляет  $2 \cdot 2e_1$ , а внутренний диаметр скругленности этого сечения составляет  $(2,5 \dots 3,0) \cdot 2e_1$  (рис. 14, 15) [14].

Продольные поверхности S-образных элементов могут образовывать зазоры, что повышает прочность заряда и устойчивость к радиальным нагрузкам от воздействия газов центрального воспламенительного устройства.

Однако испытания показали, что S-образные элементы не могут быть расположены в камере двигателя по схеме, представленной на рис. 15. Они располагаются параллельно и плотно прилегают друг к другу, тем самым снижают пло-

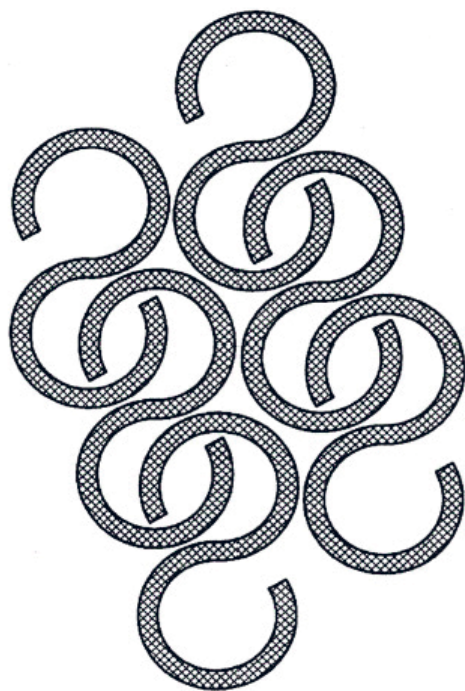


Рис. 15. Схема размещения S-образных элементов в камере СРД

щадь соприкосновения элементов с крепящим составом и не обеспечивают надежной прочности сцепления с дном двигателя.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены перспективные для производства метательные заряды конструкции вкладных и «щеточных» пороховых зарядов, показаны их недостатки и положительные характеристики.

Отмечено, что направления российских и зарубежных разработок практически аналогичны и осуществляются по двум вариантам: вкладные и «щеточные» МЗ. Требования по повышению эффективности технических характеристик ручных гранатометов потребовали перехода к конструкциям «щеточного» типа с использованием компаундов для их сборки.

2. В качестве одного из преимуществ «щеточных» МЗ отмечается возможность использования нетрадиционных форм пороховых элементов: вместо пороховых трубок, например, в виде трех разомкнутых окружностей, спиралей, U- и S-образные. Проанализированы способы

крепления топливных элементов различных форм к дну стартовых реактивных двигателей гранатометов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулицкий Э.Г. Прогнозирование характеристик метательных зарядов к стартовым реактивным двигателям средств ближнего боя и к выстрелам для минометов. Казань: ФКП «ГосНИИХП», 2019. 227 с.
2. Заряд твердого ракетного топлива: пат. 2255239 Рос. Федерация / А.Г. Шипунов [и др.]; заявл. 15.09.2003; опубл. 27.06.2005.
3. Daniel Katz. Способ крепления пороховых пучков в перфорированной плите: пат. 3278356 США; заявл. 31.05.1963; опубл. 11.10.1966.
4. Заряд твердого ракетного топлива: пат. 2133370 Рос. Федерация / А.Н. Большаков [и др.]; заявл. 01.07.1997; опубл. 20.07.1999.
5. Заряд твердого ракетного топлива; пат. 2255240 Рос. Федерация / В.Д. Дудка [и др.]; заявл. 15.10.2003; опубл. 27.06.2005.
6. Заряд твердого ракетного топлива; пат. 2316669 Рос. Федерация / Г.Н. Амарантов [и др.]; заявл. 20.02.2006; опубл. 10.02.2008.
7. Заряд твердого ракетного топлива; пат. 2211354 Рос. Федерация / В.С. Арефьев [и др.]; заявл. 19.02.2002; опубл. 27.08.2003.
8. Michel Precoul. Топливный заряд для твердотопливного ракетного двигателя: пат. 1626133 Германия; заявл. 19.01.1967; опубл. 01.07.1971.
9. Заряд твердого ракетного топлива; пат. 2449156 Рос. Федерация / И.В. Юсупов [и др.]; заявл. 22.06.2010; опубл. 27.04.2012.
10. Воспламенитель реактивного заряда; пат. 2181178 Франция / Lucien Laire [et al.]; заявл. 20.04.1972; опубл. 30.11.1973.
11. Выбор методов физических воздействий на отвердитель полиуретановой композиции / Е.А. Тихонова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 17. С. 88–94.
12. Пороховой заряд щеточной конструкции; пат. 2358141 Рос. Федерация / Ю.Б. Абрамов [и др.]; заявл. 06.08.2007; опубл. 10.06.2009.
13. Francois Agene. Заряд твердого ракетного топлива; пат. 2439174 Франция; заявл. 16.10.1978; опубл. 16.05.1980.
14. Заряд твердого ракетного топлива для стартовых реактивных двигателей; пат. 2690472 Рос. Федерация / С.Г. Волянюк [и др.]; заявл. 30.07.2018; опубл. 03.06.2019.

---

---

## ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

---

---

УДК 061.3, 623

### ПЕРВЫЙ ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ ОБОРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ «ВОЕНТЕХ»

Д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН *К.М. ИВАНОВ*  
(ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в феврале отмечает свой очередной «день рождения». Но в памяти еще свежи события минувшего года, ставшего для старейшего учебного заведения России юбилейным. Наиболее ярким в рамках празднования 90-летия был Первый Петербургский научно-технический форум оборонных технологий «ВОЕНТЕХ».*

**Ключевые слова:** ТЕХНИКА; ТЕХНОЛОГИИ; ОТРАСЛЬ; ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС.

Так повелось, что основные праздничные мероприятия в университете традиционно приходятся на две даты: 26 февраля – основание Ленинградского военно-механического института и 19 ноября – День ракетных войск и артиллерии, поскольку именно в БГТУ «ВОЕНМЕХ» зарождалась советская школа разработчиков артиллерийских систем, внесшая решающий вклад в Победу над фашистской Германией. Огневая мощь нынешней российской армии также во многом создана выпускниками и сотрудниками университета.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» имеет крепкие и многолетние связи с профильными высшими учебными заведениями, научными организациями и предприятиями страны. В университете регулярно проводятся конференции, семинары и другие мероприятия регионального и отраслевого значения, которые собирают специалистов самого высокого уровня, представляющих все

высокотехнологические отрасли отечественной промышленности.

В связи с этим Первый Петербургский научно-технический форум оборонных технологий «ВОЕНТЕХ», приуроченный к 90-летию вуза и к Дню ракетных войск и артиллерии, стал событием вполне ожидаемым и весьма значимым.

Мероприятие проходило на площадке университета в течение двух дней – 17 и 18 ноября – при поддержке городских властей, профильных министерств и ведомств, а также Российской академии ракетных и артиллерийских наук. За это время форум посетили более четырехсот гостей из 30 городов России, в том числе представители органов власти Санкт-Петербурга и Российской Федерации, крупнейших корпораций и предприятий оборонно-промышленного комплекса России, Министерства обороны РФ, университетов и профессиональных сообществ.

По словам Константина Иванова, ректора БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, форум оборонных технологий стал новой страницей в 90-летней истории университета. «Открытие такого мероприятия в нашем вузе далеко не случайно: мы – вуз, занимающийся всеми современными вопросами комплексной безопасности нашего государства. «ВОЕНМЕХ» до сих пор остается университетом, в котором более 70 процентов студентов обучаются по оборонно-техническим специальностям. И это единственный вуз в стране с такими показателями», – отметил К. Иванов в своем выступлении.

Традиционно высокий уровень инженерной подготовки выпускников университета отметили приглашенные почетные гости: Александр Блошенко, исполнительный директор по перспективным программам и науке Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»; Георгий Анцев, Герой труда России, генеральный директор – генеральный конструктор АО «НПП Радар ммс»; Василий Буренок, президент Российской академии ракетных и артиллерийских наук; Михаил Сильников, член-корреспондент РАН, генеральный директор – генеральный конструктор АО «НПО Спецматериалов», руководитель Северо-Западного регионального научного центра РАН; Алексей Орыщенко, член-корреспондент РАН, генеральный директор НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и многие другие.

Между тем выпускники университета не только крепят огневую мощь Вооруженных сил РФ, но и вносят значимый вклад в сфере безопасности страны, ее экономики, а также ракетно-космической отрасли. В свое время «ВОЕНМЕХ» закончили Сергей Нарышкин, директор Службы внешней разведки РФ, Владислав Меньщиков, руководитель службы контрразведки Федеральной службы безопасности РФ, Игорь Максимцев, ректор Санкт-Петербургского государственного экономического университета, Сергей Крикалёв, Герой Советского Союза, Герой России, исполнительный директор Госкорпорации «Роскосмос».

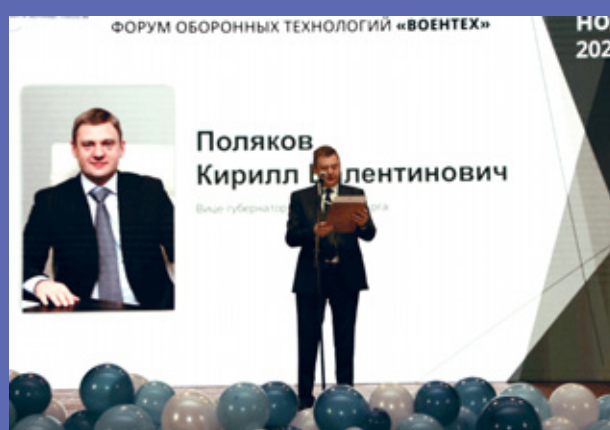
Вице-губернатор Санкт-Петербурга Кирилл Поляков отметил, что мероприятие проходит весьма своевременно. «Оборонная промышленность является «мотором», источником для



Первый Петербургский научно-технический форум оборонных технологий «ВОЕНТЕХ» в актовом зале БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова



Ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Константин Михайлович Иванов



Вице-губернатор Санкт-Петербурга  
Кирилл Валентинович Поляков





*Открытое заседание Попечительского совета БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*



*Ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Константин Михайлович Иванов и генеральный директор – генеральный конструктор АО «НПП Радар ммс» Георгий Владимирович Анцев при подписании соглашения о создании Передовой инженерной школы*



*Герой Советского Союза, Герой России, выпускник БГТУ «ВОЕНМЕХ», Почетный гражданин Санкт-Петербурга, исполнительный директор госкорпорации «Роскосмос» по пилотируемым космическим программам Сергей Константинович Крикалёв*

*развития промышленности гражданского назначения и существенного, взрывного ее технологического и инновационного развития», – заявил вице-губернатор.*

Участники форума обсудили важнейшие вопросы развития оборонной и аэрокосмической техники, подготовки кадров, возможные направления сотрудничества и дальнейшей совместной работы. В частности, на пленарном заседании «Критически важные технологии и приоритетные направления развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» были заслушаны доклады генеральных директоров, главных конструкторов ведущих предприятий ОПК и аэрокосмической отрасли, руководителей профильных научных учреждений и органов военного управления.

Одним из главных событий стало открытое заседание Попечительского совета университета, в ходе которого обсуждалось позиционирование БГТУ «ВОЕНМЕХ», как ведущего оборонно-технического вуза страны, и связанные с этим планы университета на ближайшее десятилетие.

В рамках форума было объявлено о создании в БГТУ Центра инициативных разработок в интересах Вооруженных сил. Соответствующее соглашение руководство вуза подписало с Главным управлением инновационного развития Министерства обороны Российской Федерации.

Кроме того, университет выступил инициатором тесного сотрудничества с одним из ведущих предприятий Санкт-Петербурга – АО «НПП Радар ммс» в рамках своего нового проекта – Передовой инженерной школы. Ее основная задача – разработка ключевых технологий и опережающая подготовка кадров в области создания интеллектуальных автономных робототехнических комплексов, работающих в экстремальных условиях: в воздушном и космическом пространстве, в глубинах Мирового океана.

На полях форума состоялись встречи знаменитых выпускников университета со студентами и преподавателями вуза. С открытыми лекциями выступили летчик-космонавт Сергей Крикалёв и еще один выпускник БГТУ «ВОЕНМЕХ» бывший руководитель Российских железных дорог В.И. Якунин. В свое время Владимир Иванович Якунин считался одним из самых влиятельных политиков и управленцев новой России. Сегод-

ня он возглавляет кафедру политологии МГУ им. Ломоносова и пишет книги.

Во второй день работы форума прошли секционные заседания по следующим направлениям: «Информационные и управляющие системы», «Системы вооружения и боеприпасы», «Аэрокосмическая и ракетная техника», «Робототехника и мехатроника», «Технологическое и кадровое обеспечения предприятий ОПК». Участники заслушали более 60 докладов, авторы которых представляли ведущие научно-промышленные центры России.

Во все дни форума гостей принимал музей университета – сейчас это целый комплекс, состоящий из экспозиции (два зала плюс три портретных галереи) и мемориала воинской славы. В фонде музея более двух тысяч единиц хранения, в том числе предметы, фотографии, тексты, аудио- и видеозаписи. Среди раритетов – личные вещи Маршала Советского Союза Д.Ф. Устинова, космонавта Г.М. Гречко, макеты космических кораблей, ракет, спутников, звездный фотометр, памятные альбомы космонавтов, знамена советского времени, другие произведения инженерного и художественного искусства.

С научно-техническими разработками, созданными в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, можно было ознакомиться на специально развернутой выставке, где представлены многостепенный робот-манипулятор, подводный аппарат «Балтиец», гексапод и многие другие изобретения.

За успешную реализацию инициативных проектов в Центре научно-технического творчества 18 студентов и магистрантов университета были награждены именными стипендиями им. Г.М. Гречко, один удостоился сертификата стипендии имени А.И. Савина от Концерна ВКО «Алмаз-Антей», а четыре аспиранта получили финансовую поддержку от Фонда целевого капитала «ИСТОКИ» за достижения в области развития ракетно-космической техники, информационных и управляющих систем. По итогам конкурса инициативных проектов «Инженерный десант» присуждены один грант и три почетных приза для малых молодежных коллективов университета.



*Работа секционных заседаний форума*



*Выставка научно-технических разработок БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Основной вклад в организацию и проведение форума «ВОЕНТЕХ» внесли сотрудники научно-исследовательских подразделений университета во главе с проректором по научной работе и инновационному развитию Станиславом Алексеевичем Матвеевым.

Итоги Первого Петербургского научно-технического форума оборонных технологий «ВОЕНТЕХ» показали, что у проведенного мероприятия хорошие перспективы. По словам вице-губернатора Санкт-Петербурга Кирилла Полякова, «ВОЕНТЕХ» должен стать постоянно действующей отраслевой площадкой и власти города готовы всесторонне поддерживать его развитие в будущем.



**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ**

УДК 347.771

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
КОРРЕКТИРУЕМЫХ РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ**

Коллектив ученых ФГУП «ЦНИИХМ» получил патент № 2788248 на изобретение «Способ поражения неоднородного рассредоточенного группового объекта групповым действием корректируемых реактивных снарядов». МПК F42B 12/58; F42B 15/00. Авторами являются С.А. Бобков, С.М. Мужичек, М.А. Корзун, А.А. Скрынников, И.В. Усталова, А.О. Соколов, Т.М. Борисова.

Изобретение относится к технике группового взрыва и может быть использовано для повышения эффективности поражающего действия корректируемых реактивных снарядов. В изобретении предложен способ поражения неоднородного рассредоточенного группового объекта групповым действием корректируемых реактивных снарядов, основанный на использовании информационного центра наблюдения за доставкой и обеспечением одновременного подрыва реактивных снарядов, размещенных после доставки на приведенном расстоянии один от другого, обеспечивающем эффект их группового действия и определяемом из выражения:

$$\frac{R}{\sqrt[3]{m}} = (2,7...15,0),$$

где  $R$  – расстояние между снарядами, м;  $m$  – масса заряда, кг.



При этом в информационном центре наблюдения предварительно выделяют на неоднородном рассредоточенном групповом объекте приоритетные уязвимые объекты, затем на каждый из

которых наводят реактивные снаряды таким образом, чтобы расстояние между снарядами в пределах приоритетного уязвимого объекта было равно приведенному, при этом реактивными снарядами управляют, их выстреливают пачками из расчета одна пачка на один приоритетный уязвимый объект, производят корректировку каждого снаряда пачки на траектории циклически и до окончания полета, осуществляют одновременный подрыв корректируемых реактивных снарядов каждой пачки, расположенных на приведенном расстоянии друг от друга.

Каждый из реактивных снарядов снабжен маяком, срабатывающим при взаимодействии их с приоритетным уязвимым объектом – после их доставки формируют команду на их подрыв, в случае не поступления через заданное время команды от информационного центра срабатывают взрыватели реактивных снарядов.

Для управления полетом реактивного снаряда после выстрела из пусковой установки предусмотрены радиолокационная станция и электронно-вычислительная машина для определения координат на траектории реактивного снаряда, при этом на реактивных снарядах предусмотрены устройства для коррекции их траектории, включая радиоприемники и наличие порядкового номера, просматриваемого через пробитое отверстие на корпусе снаряда для закрепления за снарядом управляющей команды.

Информационный центр наблюдения может быть размещен на автономном беспилотном или дистанционно-пилотируемом летательном аппарате.

<https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=bf0215c0f5c596ace541e3d744e4002a>



---

---

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

---

---

<b>БЛА</b> – беспилотный летательный аппарат	<b>МДУ</b> – миниатюрные двигательные установки
<b>ВВСТ</b> – вооружение, военная и специальная техника	<b>НКУ</b> – нормальные климатические условия
<b>ВВФ</b> – внешние воздействующие факторы	<b>РКТ</b> – ракетно-космическая техника
<b>ВТО</b> – высокоточное оружие	<b>РТК</b> – робототехнический комплекс
<b>ДРП</b> – дымный ружейный порох	<b>СББ</b> – средства ближнего боя
<b>ДРФ</b> – десантно-разведывательное формирование	<b>СРД</b> – стартовый реактивный двигатель
<b>ЖРД</b> – жидкостный ракетный двигатель	<b>ТГФ</b> – тетрагидрофуран
<b>КАБ</b> – корректируемая авиационная бомба	<b>УАБ</b> – управляемая авиационная бомба
<b>КПА</b> – контрольно-проверочная аппаратура	<b>УИБ</b> – ускоренные испытания на безопасность
<b>КТХ</b> – камера тепла и холода	<b>УПАБ</b> – управляемая планирующая авиационная бомба
<b>МБМ</b> – микроболометрические матрицы	<b>ФРТ</b> – функция рассеяния точки



**Научно-технический сборник  
«Боеприпасы»**

№ 1

2023 г.

Научное издание

**Выпускающий редактор** *В.В. Абрамов*  
**Компьютерная верстка** *А.В. Сигунов*  
**Компьютерный набор и графика** *А.В. Сигунов, Е.А. Гришина*  
**Художник-дизайнер** *М.И. Руюткина*  
**Корректор** *О.С. Зотова*

---

Подписано в печать 3.03.2023  
Сдано в набор 9.01.2023

Печ. л. 5,88  
Тираж 100 экз.

Формат 60×90/16  
Изд. № 31

---

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИХМ»  
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16А