

Результаты исследования и разработки низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив для систем перемещения элементов исполнительных механизмов 77-30569/299736

02, февраль 2012

Шабунин А. И., Калинин С. В., Сарабьев В. И., Ягодников Д. А.,
Полянский А. Р.

УДК 662.1:621.455

ОАО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
otd11_niiph@mail.ru
daj@mx.bmstu.ru
korolev100-rd@mail.ru

НБГТ в составе ГГ широко используются в оборонной и гражданской отраслях промышленности в качестве источника низкотемпературного смешанного газа. Например, газогенераторы, снаряженные зарядами НБГТ, применяются в системах ПЭИМ, устройствах раскрутки ротора турбореактивных двигателей, для вытеснения жидкости в системах пожаротушения, наддува аварийно-спасательных средств и т.д.

Широкая сфера применения ГГ, снаряженных зарядами НБГТ, обусловлена рядом их преимуществ по сравнению с другими источниками низкотемпературного газа. К числу таких преимуществ следует отнести высокую надёжность, компактность, постоянную готовность к действию, быстроту срабатывания, высокую удельную газопроизводительность, работоспособность в различных условиях, способность к длительному хранению. Таким образом, широкое применение ГГ в военной технике и хозяйственных отраслях позволяет говорить об актуальности исследования и разработки НБГТ.

Специфика работы объектов, в которых применяются заряды НБГТ, обуславливает необходимость обеспечения соответствия их термодинамических, баллистических и физико-механических характеристик комплексу предъявляемых требований.

Термодинамические характеристики НБГТ должны обеспечивать высокие значения газопроизводительности W и работоспособности RT , а также иметь низкие значения температуры горения $T_{гор}$, теплоты сгорания $Q_{сг}$, молярной массы газов μ и количества конденсированной фазы z . Низкая температура горения топлив ($T_{гор} \leq 1700$ К)

необходима для сохранности перемещаемых элементов исполнительных механизмов. Баллистические характеристики НБГТ должны обеспечивать получение высокой скорости горения U и сравнительно низких значений показателя степени ν в зависимости $U(p)$. Наличие последнего требования обусловлено необходимостью обеспечения стабильного горения топлива в широком диапазоне давлений, что снижает возможность возникновения аномального режима работы ГГ. Физико-механические характеристики топлив должны соответствовать требованиям достижения высокой прочности при сжатии $\sigma_{\text{н}}$ и растяжении изгибающим моментом $\sigma_{\text{сж}}$. Данное требование является особенно актуальным для зарядов НБГТ, используемых в ГГ СОЗР, т. к. рабочее давление в их камере сгорания (КС) имеет высокие значения ($p_{\text{КС}} \leq 55$ МПа). Применение в указанных условиях топлив с низкой прочностью повышает опасность перехода режима горения из послойного в объёмный, что приводит к разрушению эксплуатируемого объекта.

Главная проблема, возникающая при разработке НБГТ, заключается в том, что при снижении температуры горения происходит уменьшение скорости горения топлив. С целью обеспечения высокой скорости горения НБГТ при сохранении низкой температуры горения было проведено исследование, предусматривающее включение в топливные рецептуры следующих модификаторов: бихромат аммония (БХА) $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, бихромат калия (БХК) $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, оксид ванадия (V) (ОВН) V_2O_5 , оксид висмута (III) (ОВС) Bi_2O_3 , оксид никеля (II) (ОНК) NiO , оксид молибдена (ОМЛ) (VI) MoO_3 , оксид титана (ОТТ) (IV) TiO_2 , оксид хрома (ОХР) (III) Cr_2O_3 , оксид циркония (ОЦР) ZrO_2 , оксид вольфрама (ОВЛ) (VI) WO_3 , оксид железа (III) Fe_2O_3 , оксид иттрия (ОИ) Y_2O_3 , сульфат калия (СКЛ) K_2SO_4 , оксид меди (ОМД) (II) CuO , бензоат натрия (БНТ) $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_2$, салицилат натрия (СНТ) $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$, оксид свинца (ОСВ) (II, IV) Pb_3O_4 , хромат стронция (ХСТ) SrCrO_4 , фторид цезия (ФЦЗ) CsF , фторид церия (ФЦР) CeF_3 . Выбор указанных веществ производился по данным литературных источников [1, 2].

Основными компонентами исследуемых топлив являлись горючее (нитрогуанидин) и окислитель (перхлорат аммония). Для регулирования температуры горения в состав НБГТ была включена газообразующая добавка уротропин. С целью обеспечения механической прочности топлив использовалось связующее, представляющее собой смесь идитола и каучука БНКС. Формирование рецептур НБГТ осуществлялось таким образом, чтобы их температура горения имела приблизительно одинаковые значения ($T_{\text{гор}} \sim 1650$ К). Количество модификатора в рецептурах НБГТ, было фиксированным и составляло 7 %. Твёрдые компоненты топлив имели микронный уровень дисперсности. На базе вышеуказанных компонентов были сформированы 20 вариантов топлив (типа 62-30), в состав индекса которых входит обозначение используемого модификатора.

Оценка эффективности модификаторов осуществлялась методом сравнения термодинамических, баллистических и физико-механических характеристик НБГТ с параметрами топлива-эталоны 62-30-ЭТ, не содержащего модификатора.

Значения термодинамических характеристик НБГТ вычислялись с помощью программного комплекса «Астра» [3]. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Термодинамические характеристики исследуемых НБГТ

Вариант НБГТ	Обозначение характеристики					
	W , м ³ /кг	$T_{гор}$, К	$Q_{сг}$, МДж/кг	μ , г/моль	z , %	RT , кДж/кг
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
62-30-ЭТ	1,131	1637	5,014	19,81	0	687,0
62-30-БХА	1,076	1653	4,822	19,95	4,2	659,9
62-30-БХК	1,060	1632	4,800	20,38	3,6	641,8
62-30-ОВН	1,056	1613	4,712	20,0	5,7	656,4
62-30-ОВС	1,049	1654	4,692	21,37	0	643,4
62-30-ОНК	1,045	1645	4,689	20,28	5,5	637,4
62-30-ОМЛ	1,051	1624	4,709	20,27	4,9	632,9
62-30-ОТТ	1,044	1624	4,521	19,96	7,0	629,2
62-30-ОХР	1,045	1628	4,690	19,96	6,9	629,8
62-30-ОЦР	1,069	1637	4,688	19,96	7,0	634,2
62-30-ОВЛ	1,060	1628	4,683	21,15	0	639,8
62-30-ОЖ	1,045	1614	4,688	20,57	4,1	625,9
62-30-ОИ	1,045	1642	4,689	19,96	7,0	636,3
62-30-СКЛ	1,045	1636	4,668	20,94	2,3	634,1
62-30-ОМД	1,056	1630	4,722	20,05	5,5	639,0
62-30-БНТ	1,080	1631	4,829	20,61	0,7	652,9
62-30-СНТ	1,081	1623	4,812	20,61	0,6	650,8
62-30-ОСВ	1,059	1612	4,723	21,16	0	633,2
62-30-ХСТ	1,052	1642	4,865	19,79	7,0	641,0
62-30-ФЦЗ	1,054	1632	4,718	21,25	0	638,3
62-30-ФЦР	1,049	1625	4,704	19,94	6,6	632,5

Для удобства представления и анализа полученных характеристик рассматриваемые НБГТ были разделены на 5 групп (по 4 топлива + топливо-эталон 62-30-ЭТ).

Скорость горения топлив при повышенном давлении (в интервале $p = 2 \dots 10$ МПа) определялась в генераторе давления ГД-2М [4]. Значения скорости горения исследуемых групп топлив, а также показатель ν и коэффициент U_0 в зависимости $U(p)$, приведены в табл. 2-6. На рис. 1-3 приведены зависимости скорости горения от давления для рассматриваемых групп НБГТ.

Таблица 2

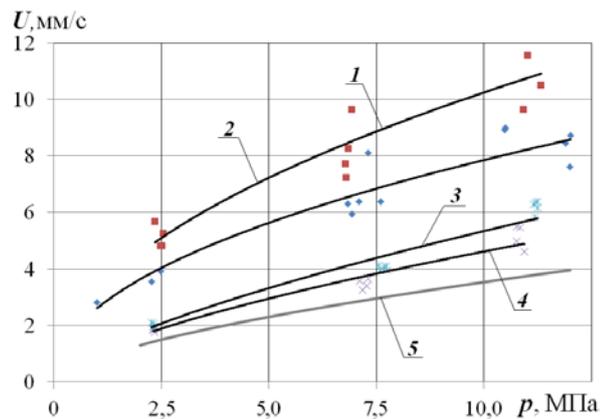
Баллистические характеристики НБГТ 1 группы

Вариант НБГТ	$U(p=10)$ МПа), мм/с	ν	U_0 , мм/с
62-30-БХА	10,1	0,50	1,01
62-30-БХК	7,84	0,48	0,86
62-30-ОИ	5,03	0,67	0,23
62-30-ОМД	4,79	0,65	0,24
62-30-ЭТ	3,55	0,62	0,204

Таблица 3

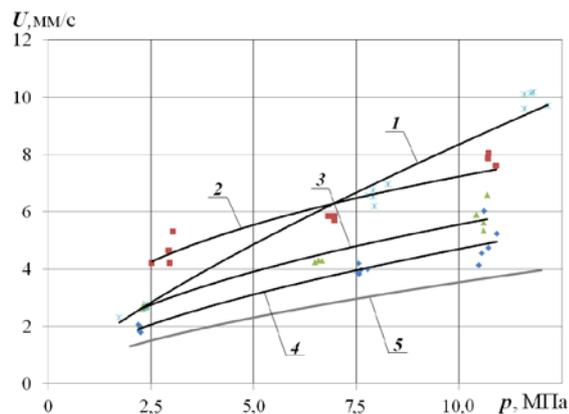
Баллистические характеристики НБГТ 2 группы

Вариант НБГТ	$U(p=10)$ МПа), мм/с	ν	U_0 , мм/с
62-30-ОЖ	8,35	0,78	0,23
62-30-ОВН	7,08	0,38	1,23
62-30-ОМЛ	5,65	0,51	0,54
62-30-ОВЛ	4,76	0,60	0,3
62-30-ЭТ	3,55	0,62	0,204



а)

1 – 62-30-БХА; 2 – 62-30-БХК; 3 – 62-30-ОИ; 4 – 62-30-ОМД; 5 – 62-30-ЭТ



б)

1 – 62-30-ОЖ; 2 – 62-30-ОВН; 3 – 62-30-ОМЛ; 4 – 62-30-ОВЛ; 5 – 62-30-ЭТ

Рис. 1. Зависимости скорости горения от давления для НБГТ: а) 1 группы; б) 2 группы

Таблица 4

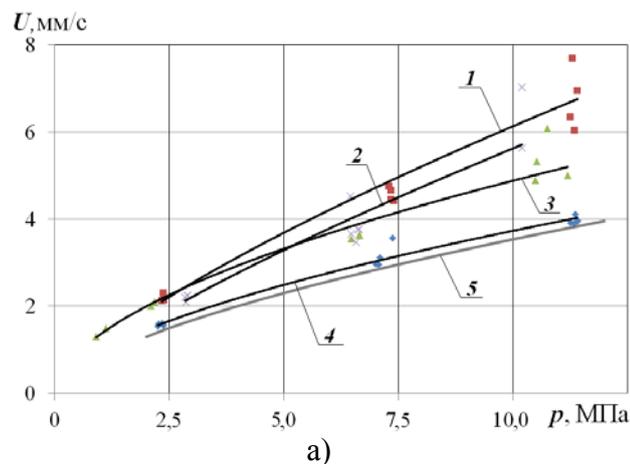
Баллистические характеристики НБГТ 3 группы

Вариант НБГТ	$U(p = 10 \text{ МПа}), \text{ мм/с}$	v	$U_0, \text{ мм/с}$
62-30-ОСВ	6,05	0,73	0,21
62-30-ОХР	5,55	0,77	0,16
62-30-ОЦР	5,00	0,56	0,38
62-30-БНТ	3,61	0,58	0,25
62-30-ЭТ	3,55	0,62	0,204

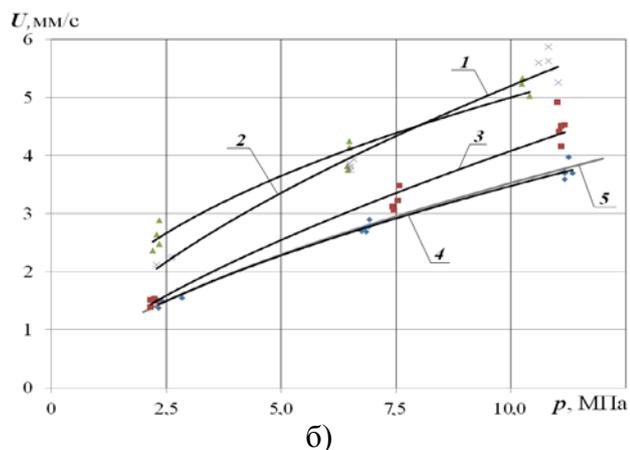
Таблица 5

Баллистические характеристики НБГТ 4 группы

Вариант НБГТ	$U(p = 10 \text{ МПа}), \text{ мм/с}$	v <th>$U_0, \text{ мм/с}$</th>	$U_0, \text{ мм/с}$
62-30-ОВС	5,10	0,63	0,28
62-30-ОНК	5,07	0,46	0,61
62-30-СКЛ	4,12	0,68	0,18
62-30-СНТ	3,49	0,61	0,21
62-30С-ЭТ	3,55	0,62	0,204



1 – 62-30-ОСВ; 2 – 62-30-ОХР; 3 – 62-30-ОЦР; 4 – 62-30-БНТ; 5 – 62-30-ЭТ

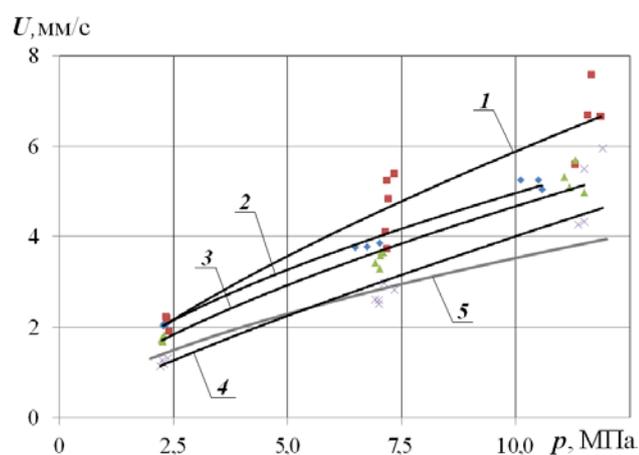


1 – 62-30-ОВС; 2 – 62-30-ОНК; 3 – 62-30-СКЛ; 4 – 62-30-СНТ; 5 – 62-30-ЭТ

Рис. 2. Зависимости скорости горения от давления для НБГТ: а) 3 группа; б) 4 группа

Баллистические характеристики НБГТ 5 группы

Варианты НБГТ	$U(p = 10$ МПа), мм/с	v	U_0 , мм/с
62-30-ХСТ	5,78	0,72	0,21
62-30-ОТТ	4,91	0,60	0,31
62-30-ФЦР	4,59	0,67	0,21
62-30-ФЦЗ	3,98	0,83	0,087
62-30-ЭТ	3,55	0,62	0,204



1 – 62-30-ХСТ; 2 – 62-30-ОТТ; 3 – 62-30-ФЦР; 4 – 62-30-ФЦЗ; 5 – 62-30-ЭТ

Рис. 3. Зависимости скорости горения от давления для НБГТ 5 группы

Физико-механические характеристики НБГТ оценивались на основе значений предела прочности при растяжении изгибающим моментом и сжатии. Для удобства представления и анализа результатов исследуемые топлива были разделены на 2 группы. Полученные результаты приведены в таблицах 7, 8.

Таблица 7

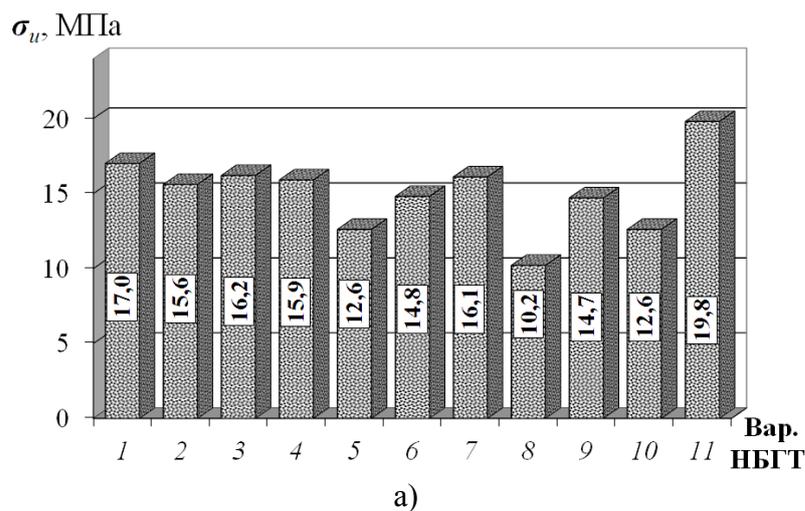
Физико-механические характеристики НБГТ 1 группы

Вариант НБГТ	σ_u , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа
62-30-ЭТ	17,0	51,0
62-30-БХА	15,6	55,5
62-30-БХК	16,2	54,5
62-30-ОВН	15,9	54,8
62-30-ОВС	12,6	54,9
62-30-ОНК	14,8	56,1
62-30-ОМЛ	16,1	51,6
62-30-ОТТ	10,2	52,5
62-30-ОХР	14,7	55,8
62-30-ОЦР	12,6	54,6
62-30-ОВЛ	19,8	58,0

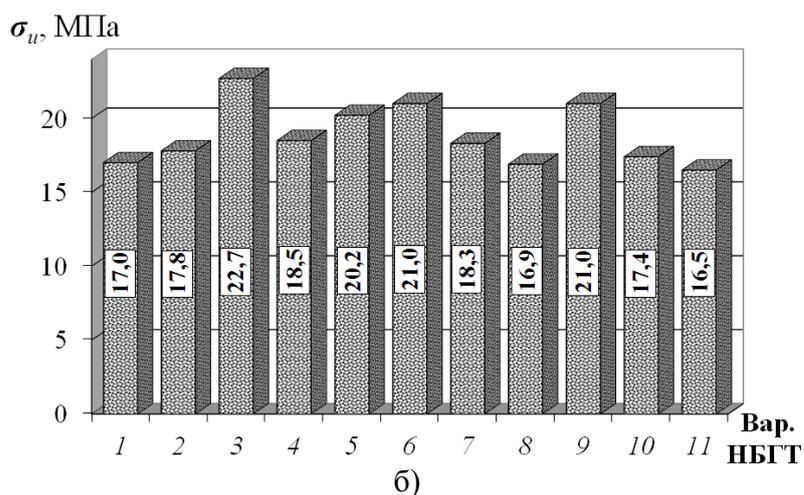
Физико-механические характеристики НБГТ 2 группы

Вариант НБГТ	σ_u , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа
62-30-ЭТ	17,0	51,0
62-30-ОЖ	17,8	55,6
62-30-ОИ	22,7	53,4
62-30-СКЛ	18,5	53,8
62-30-ОМД	20,2	56,5
62-30-БНТ	21,0	54,1
62-30-СНТ	18,3	43,0
62-30-ОСВ	16,9	58,7
62-30-ХСТ	21,0	53,7
62-30-ФЦЗ	17,4	50,4
62-30-ФЦР	16,5	58,6

Для анализа эффективности рассматриваемых НБГТ на рис. 4 (а, б) приведены значения предела прочности при растяжении изгибающим моментом, являющейся наиболее важной физико-механической характеристикой данных зарядов.



1 – 62-30-ЭТ; 2 – 62-30-БХА; 3 – 62-30-БХК; 4 – 62-30-ОВН; 5 – 62-30-ОВС; 6 – 62-30-ОНК;
7 – 62-30-ОМЛ; 8 – 62-30-ОТТ; 9 – 62-30-ОХР; 10 – 62-30-ОЦР; 11 – 62-30-ОВЛ



б)
 1 – 62-30-ЭТ; 2 – 62-30-ОЖ; 3 – 62-30-ОИ; 4 – 62-30-СКЛ; 5 – 62-30-ОМД; 6 – 62-30-БНТ;
 7 – 62-30-СНТ; 8 – 62-30-ОСВ; 9 – 62-30-ХСТ; 10 – 62-30-ФЦЗ; 11 – 62-30-ФЦР

Рис. 4. Экспериментальные значения предела прочности НБГТ при растяжении изгибающим моментом: а) 1 группа; б) 2 группа

В результате анализа термодинамических, баллистических и физико-механических характеристик исследуемых НБГТ получены следующие данные.

Высокой газопроизводительностью ($W \geq 1,06 \text{ м}^3/\text{кг}$) обладают НБГТ, содержащие модификаторы СНТ, БНТ, БХА, ОЦР, БХК, ОВЛ. Высокая работоспособность ($RT \geq 650 \text{ кДж/кг}$) характерна для топлив, включающих модификаторы БХА, ОВН, БНТ, СНТ. Обеспечению низкой молярной массы газов ($\mu \leq 19,95 \text{ г/моль}$) способствует применение модификаторов ХСТ, ФЦР, БХА. Для получения низкой теплоты сгорания топлив ($Q_{сг} < 4,69 \text{ МДж/кг}$) целесообразно использовать модификаторы ОТТ, СКЛ, ОВЛ, ОЖ, ОЦР, ОНК, ОИ. Отсутствие конденсированной фазы в составе продуктов сгорания ($z = 0$) характерно для НБГТ, содержащих модификаторы ОВС, ОВЛ, ОСВ, ФЦЗ.

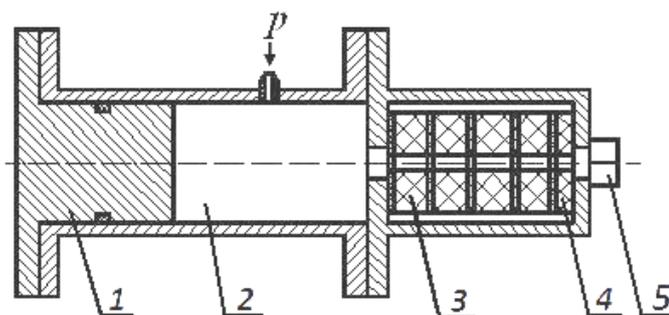
Наиболее высокие значения скорости горения ($U > 7 \text{ мм/с}$ при $p = 10 \text{ МПа}$) топлив обеспечивает включение в их рецептуры модификаторов БХА, ОЖ, БХК, ОВН. Применение указанных модификаторов обусловило повышение скорости горения НБГТ относительно топлива-эталона соответственно в 2,8; 2,4; 2,2; 2,0 раза. К снижению зависимости скорости горения от давления ($v \leq 0,5$) приводит использование модификаторов ОВН, ОНК, БХК, БХА.

Высокой прочностью при растяжении изгибающим моментом ($\sigma_u > 20 \text{ МПа}$) обладают НБГТ, включающие модификаторы ОИ, ХСТ, БНТ, ОМД. Высокая прочность при сжатии ($\sigma_{сж} > 55 \text{ МПа}$) характерна для топлив, содержащих модификаторы ОСВ, ФЦР, ОВЛ, ОМД, ОНК, ОХР, ОЖ, БХА.

Комплексный анализ полученных характеристик НБГТ показал, что наиболее эффективным является применение в качестве модификаторов бихромата аммония, оксида железа, бихромата калия и оксида ванадия. При использовании оксида железа рекомендуется принять меры по снижению показателя степени ν в законе горения НБГТ.

При разработке НБГТ для систем ПЭИМ был выбран бихромат аммония, являющийся наиболее эффективным модификатором горения. Данному топливу присвоен индивидуальный индекс 62-35. Количество БХА в НБГТ 62-35, вследствие ограничений по содержанию конденсированной фазы, составляет 5 %. Помимо перечисленных компонентов, топливо включает 1 % порошка алюминиево-магниевого ПАМ-4 (для обеспечения стабильности процесса горения в условиях высокого давления) и ~ 1 % графита (для улучшения прессуемости). Температура горения топлива составляет $T_{гор} = 1700$ К. Из НБГТ 62-35 разработаны 3 варианта зарядов, представляющих собой совокупность канальных таблеток всестороннего горения в количестве 1, 4 и 6 шт. Заряды формировались методом глухого прессования на гидравлических прессах.

На базе ОАО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии» проведены огневые стендовые испытания (ОСИ) зарядов из разработанного топлива в составе модельной установки СОЗР, представляющей собой толстостенный сосуд, внутри которого с помощью втулок переменной длины имитируется свободный объем рабочей камеры. Схема модельной установки приведена на рис. 5.



1 – втулка; 2 – рабочая ёмкость; 3 – заряд из состава 62-35;

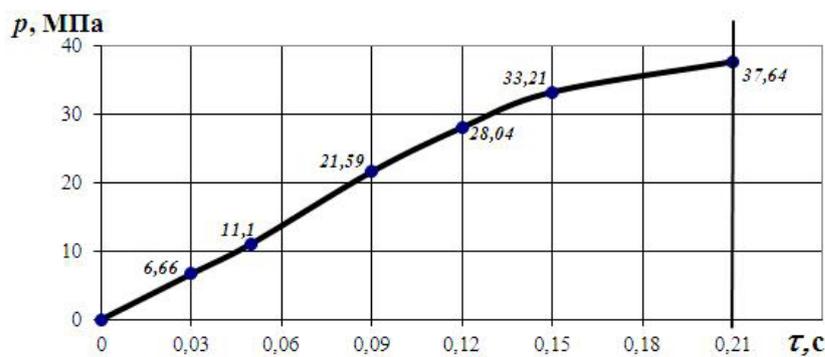
4 – таблетка из универсального воспламенительного состава; 5 – пиропатрон

Рис. 5. Схема модельной установки СОЗР

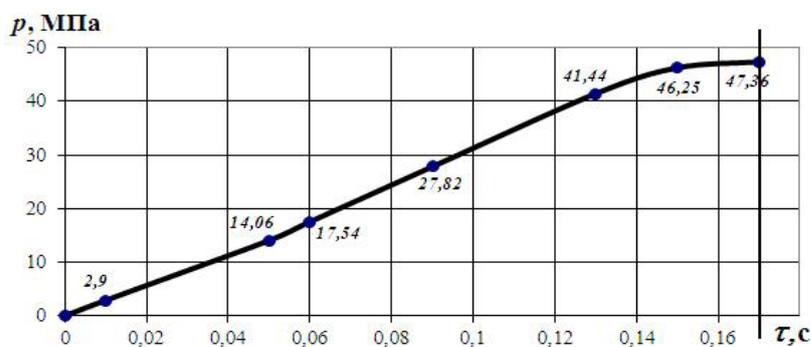
Объектами испытаний являлись заряды трёх типов: 1-го открытия, закрытия, 2-го открытия. Указанные заряды должны обеспечивать следующие значения давления в рабочей ёмкости установки СОЗР: в режиме 1-го открытия рулей $-p = 22 \dots 37$ МПа за время $\tau = 0,03 \dots 0,15$ с; в режиме закрытия рулей $-p = 15 \dots 30$ МПа за время

$\tau = 0,01 \dots 0,06$ с; в режиме 2-го открытия рулей $-p = 30 \dots 55$ МПа за время $\tau = 0,03 \dots 0,15$ с.

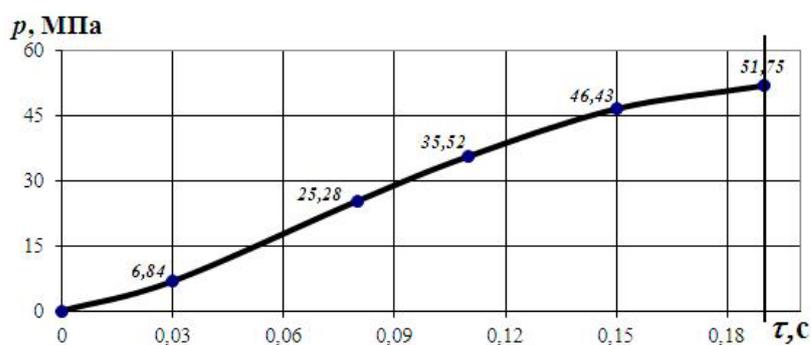
На рис. 6 представлены результаты ОСИ зарядов из разработанного НБГТ в модельной установке СОЗР.



а)



б)

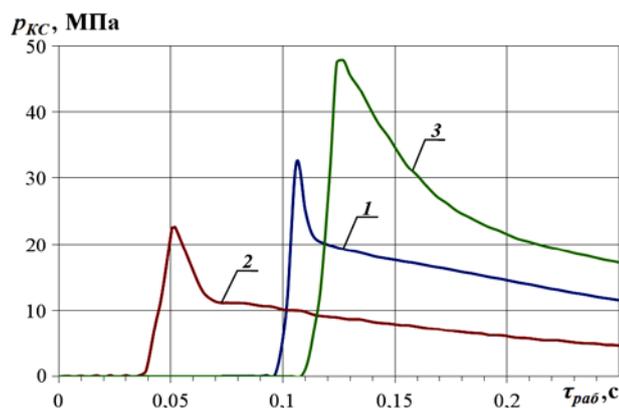


в)

Рис. 6. Динамика изменения давления в ёмкости модельной установки СОЗР при работе зарядов трех типов: а) заряд 1-го открытия; б) заряд закрытия; в) заряд 2-го открытия

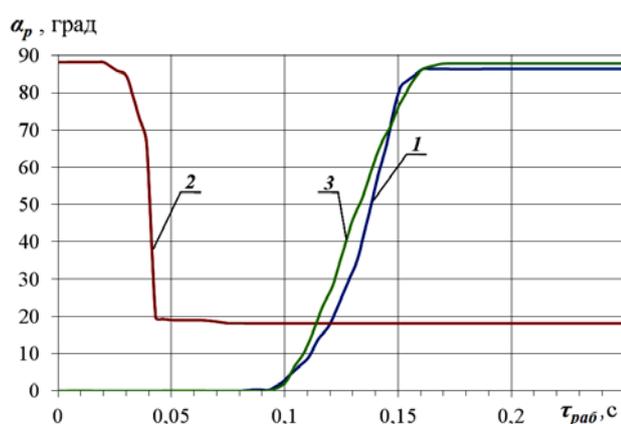
Из рис. следует, что режим работы модельной установки СОЗР, снаряженной зарядами из созданного НБГТ 62-35, соответствует предъявляемым требованиям.

ОСИ зарядов в натурной установке СОЗР проводились на базе Дмировского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты испытаний приведены на рис. 7, 8.



1 – заряд 1-го открытия; 2 – заряд закрытия; 3 – заряд 2-го открытия

Рис. 7. Динамика изменения давления в ёмкости натурной установки СОЗР



1 – заряд 1-го открытия; 2 – заряд закрытия; 3 – заряд 2-го открытия

Рис. 8. Динамика изменения ориентации (поворот) рулей в установке СОЗР

В результате проведения огневых стендовых испытаний зарядов, изготовленных из разработанного топлива 62-35, подтверждено соответствие их рабочих характеристик предъявляемому комплексу технических требований.

Выводы

1. Определены закономерности влияния природы 20 модификаторов на термодинамические, баллистические и физико-механические характеристики НБГТ на основе нитрогуанидина, перхлората аммония и уротропина.

2. В результате расчётно-экспериментального исследования НБГТ и применения метода рецептурного регулирования установлено:

– наиболее эффективным модификатором для рассмотренной группы топлив является бихромат аммония;

– к числу перспективных модификаторов горения также можно отнести оксид ванадия, бихромат калия и оксид железа (III);

– применение оксида ванадия наиболее целесообразно для повышения стабильности рабочего процесса, что характерно для топлив, отличающихся слабой зависимостью скорости горения от давления.

3. На основе результатов проведённого исследования разработано высокоэффективное НБГТ 62-35 для систем перемещения элементов исполнительных механизмов.

Список литературы

1. А.П. Глазкова. Катализ горения взрывчатых веществ. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 264 с.
2. Н.Н. Бахман, А.Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М.: Изд-во «Наука», 1967. – 228 с.
3. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах «Астра 4». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.
4. Генератор давления ГД-2М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / НИИ прикладной химии. – Инв. №10264. – Загорск, 1975. – 15 с.

The results of research and development of low-temperature, fast-burning, gas-generating fuels for systems moving elements of actuators.

77-30569/299736

02, February 2012

**Shabunin A.I., Kalinin S.V., Sarab'ev V.I., Yagodnikov D.M.,
Polyanskii A.R.**

Open Stock Company «Federal Scientific and Production Center
«Scientific Research Institute of Applied Chemistry»,
Moscow State Technical University. N.E. Bauman
otd11_niiph@mail.ru
daj@mx.bmstu.ru
korolev100-rd@mail.ru

The results of thermodynamic, ballistic, physic-mathematical surveys of low-temperature, gas-generating, fast-burning fuels (LGFF) characteristics. These fuels are pyrotechnic type based on nitroguanidine, ammonium perchlorate and methenamine, proposed for systems to move elements of actuators (SMEA), in particular, for gas generators (GG), for systems to open-close the underwater missiles' steering devices (SOCSD). There are strict requirements for reaction time of these devices; it leads to the necessity of LGFF with high burning rate usage. Twenty chemical combinations were considered as modifiers to increase the burning rate. Based on obtained characteristics for different kinds of modifiers, high efficiency LGFF was created. The fuel was tested in GG and SOCSD. The results of those tests completely meet the requirements.

Publications with keywords: [combustion](#), [strength](#), [propellant](#), [modifier](#)

Publications with words: [combustion](#), [strength](#), [propellant](#), [modifier](#)

Reference

1. A.P. Glazkova, Catalysis of combustion of explosive substances, Moscow, Izd-vo «Nauka», 1976, 264 p.
2. N.N. Bakhman, A.F. Beliaev, Combustion of heterogeneous condensed systems, Moscow, Izd-vo «Nauka», 1967, 228 p.
3. Trusov B.G., Simulation of chemical and phase equilibriums at high temperatures "Astra 4", Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman - BMSTU Press, 1991, 40 p.