

## **Определение закономерностей влияния рецептурных и внутриваллистических параметров на скорость горения низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив**

© С.В. Калинин, А.И. Шабунин, В.И. Сарабьев, В.А. Валяев

ОАО «Федеральный научно-производственный центр «НИИ прикладной химии», г. Сергиев Посад, Московская обл., 141313, Россия

*Представлены результаты исследования скорости горения низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив (НБГТ) пиротехнического типа на основе нитрогуанидина, перхлората аммония и уротропина с использованием микро- и ультрадисперсных катализаторов бихромата аммония и оксида железа. Определено влияние температуры горения топлив в диапазоне  $T_2 = 1400 \dots 1800$  К на их баллистические характеристики. Полученные аппроксимационные выражения позволяют формировать рецептуры топлив для различных типов низкотемпературных газогенераторов. На основе полученных зависимостей разработаны высокоэффективные НБГТ для устройств раскрутки ротора турбореактивных двигателей и систем перемещения элементов исполнительных механизмов.*

**Ключевые слова:** топливо, скорость, горение, катализатор, дисперсность.

Низкотемпературные быстрогорящие газогенерирующее топлива (НБГТ) используются в низкотемпературных газогенераторах, которые находят широкое применение в системах вооружения и военной техники, а также в объектах гражданского назначения, например в устройствах раскрутки ротора турбореактивных двигателей и системах перемещения элементов исполнительных механизмов.

Обычно НБГТ имеют низкую скорость горения, что обусловлено их низкой температурой горения. Достичь высокой скорости горения топлив можно следующими технологическими и рецептурными приемами: повышением дисперсности компонентов и применением катализаторов горения. В работах [1–3] было установлено, что эффективными катализаторами горения НБГТ на основе нитрогуанидина (горючее-газообразователь), перхлората аммония (окислитель) и уротропина (газообразующая добавка) являются бихромат аммония (БХА) и оксид железа (ОЖ).

Для определения влияния температуры горения топлив в диапазоне  $T_r = 1400 \dots 1800$  К на баллистические характеристики НБГТ при рабочем давлении  $p = 2 \dots 10$  МПа была сформирована группа топлив, включающая катализаторы различной природы и дисперсности: мик-

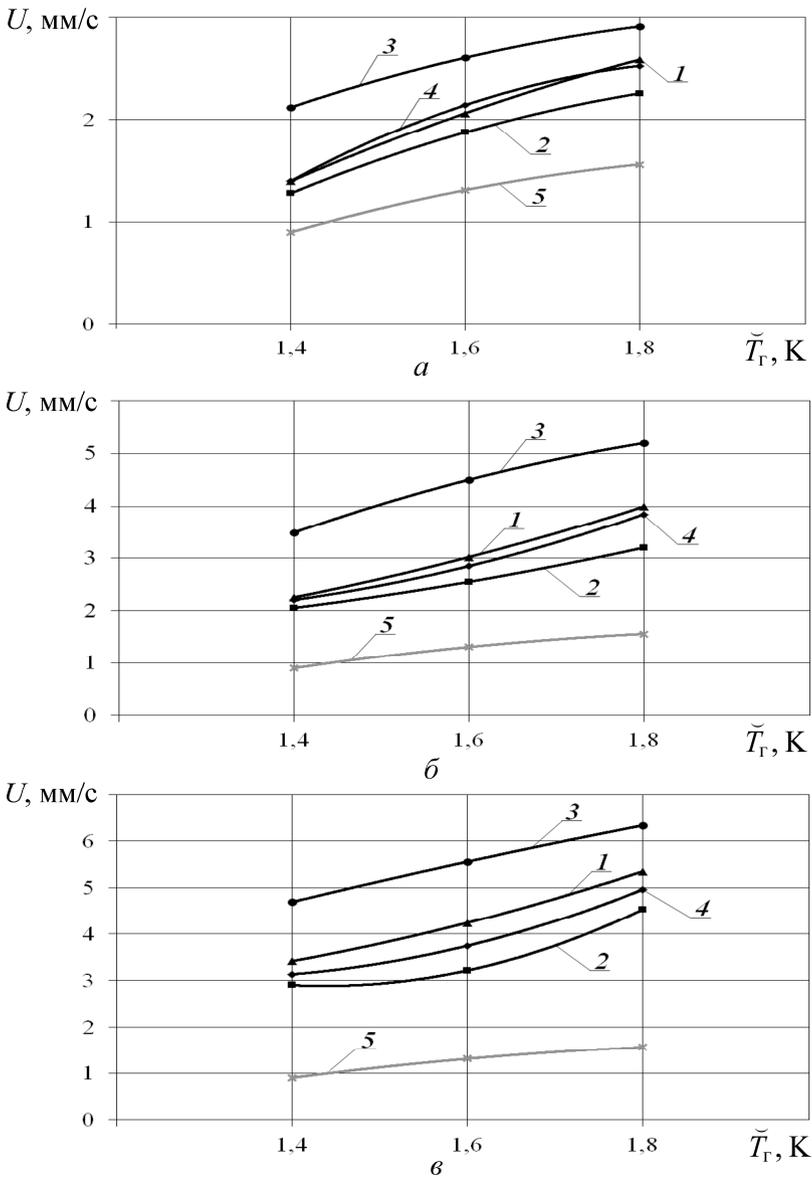
родисперсный [МД] ( $S_{уд} = 0,67 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и ультрадисперсный [УД] ( $S_{уд} = 2,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ) бихромат аммония, микродисперсный ( $S_{уд} = 1,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и ультрадисперсный ( $S_{уд} = 3,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ) оксид железа. Рецептуры исследуемых НБГТ формировали таким образом: расчетная температура горения составляла  $T_r = 1400, 1600, 1800 \text{ К}$  при содержании катализатора  $C_m = 1, 4, 7 \%$ . Для оценки эффективности результатов исследования использовали не содержащие катализаторов топлива-эталон, температура горения которых также составляла  $T_r = 1400, 1600, 1800 \text{ К}$  [4, 5]. Температуру горения регулировали изменением соотношения нитрогуанидина и уротропина. Рассматриваемая группа топлив включала 39 рецептур. Скорость горения НБГТ при повышенном давлении определяли в генераторе давления ГД-2М.

В результате проведенного исследования для рассмотренных вариантов топлив с катализаторами БХА[МД], ОЖ[МД], БХА[УД], ОЖ[УД] были построены аппроксимационные выражения, характеризующие зависимость скорости горения НБГТ от их температуры горения в указанных выше диапазонах изменения значений  $T_r$ ,  $C_m$ , и  $p$  (рис. 1–3). Для удобства анализа и применения полученных выражений в качестве аргумента использовали приведенное значение температуры  $\tilde{T}_r = T_r/1000$  (в К).

Применение в рецептурах НБГТ микро- и ультрадисперсных катализаторов позволило выявить следующую закономерность: при увеличении содержания катализатора ( $C_m = 1...7 \%$ ) и температуры горения (1400...1800 К) увеличивается интенсивность роста скорости горения топлив. Наибольшая скорость горения достигается при включении в рецептуру НБГТ ультрадисперсных БХА и ОЖ в количестве  $C_m = 7 \%$  при  $T_r = 1800 \text{ К}$ .

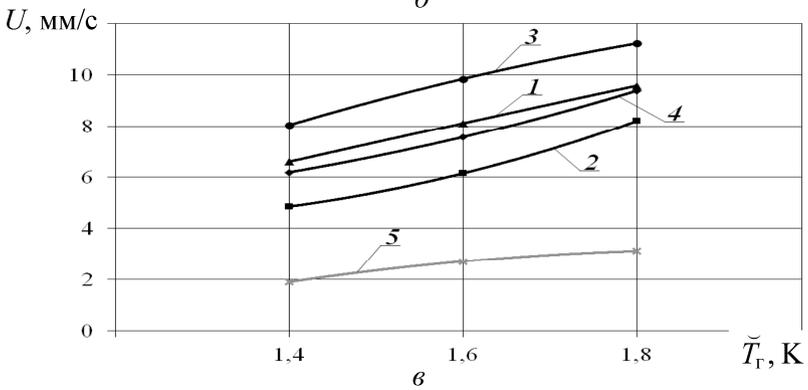
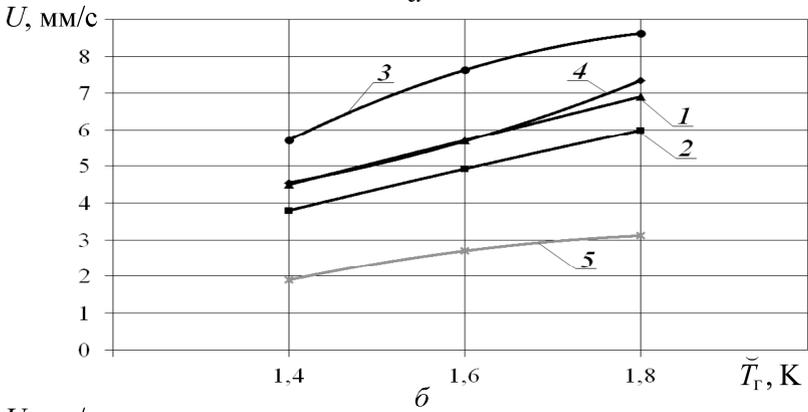
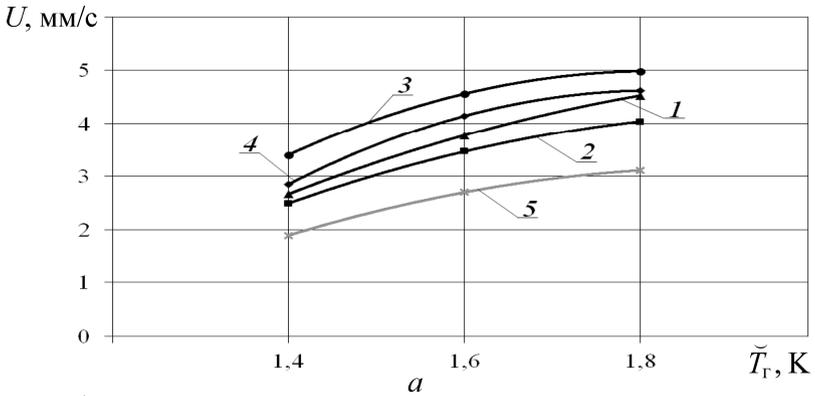
Для представления более полной и качественной картины изменения скорости горения НБГТ, включающих рассмотренные варианты катализаторов, были построены пространственные зависимости  $U(T_r, C_m)$  при  $p = 2, 6, 10 \text{ МПа}$ . Графические изображения зависимостей, соответствующих рассматриваемым диапазонам изменения температуры горения и давления, приведены на рис. 4.

На основе полученных аппроксимационных выражений, не проводя экспериментальных исследований, можно формировать рецептуры НБГТ, используя рассмотренные компоненты, для различных типов низкотемпературных газогенераторов в соответствии с предъявляемыми техническими требованиями. В частности, с помощью полученных зависимостей были разработаны высокоэффективные НБГТ 62-34 и 62-35, предназначенные соответственно для устройств раскрутки ротора турбореактивных двигателей и систем перемещения элементов исполнительных механизмов.



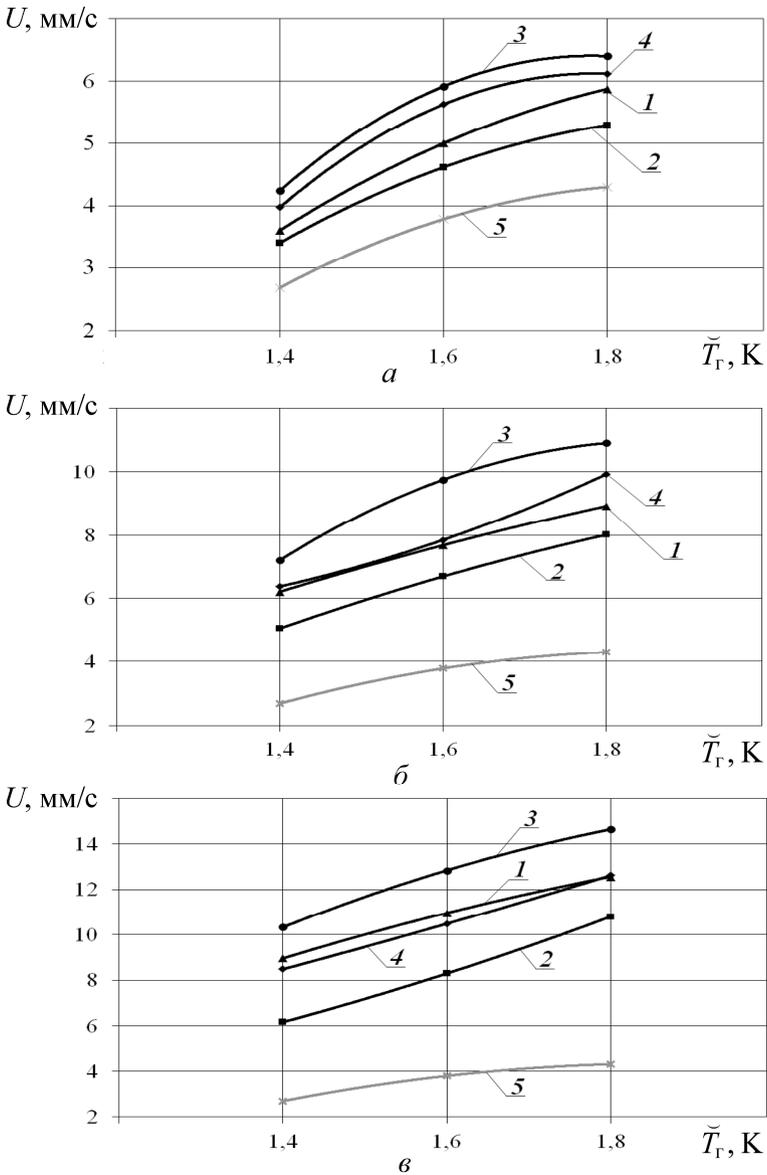
**Рис. 1.** Зависимости  $U(\sqrt{T_r})$  с микро- и ультрадисперсными катализаторами БХА и ОЖ при рабочем давлении  $p = 2$  МПа:

$a$  —  $C_m = 1\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -1,813 \sqrt{T_r}^2 + 8,778 \sqrt{T_r} - 7,342$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = -2,688 \sqrt{T_r}^2 + 11,052 \sqrt{T_r} - 8,931$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -2,250 \sqrt{T_r}^2 + 9,170 \sqrt{T_r} - 6,308$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = -4,550 \sqrt{T_r}^2 + 17,385 \sqrt{T_r} - 14,026$ ; 5 — эталон:  $U = -1,988 \sqrt{T_r}^2 + 8,013 \sqrt{T_r} - 6,425$ ;  $б$  —  $C_m = 4\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = 2,55 \sqrt{T_r}^2 - 3,815 \sqrt{T_r} + 2,594$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = 1,963 \sqrt{T_r}^2 - 3,408 \sqrt{T_r} + 2,974$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -3,963 \sqrt{T_r}^2 + 16,962 \sqrt{T_r} - 12,493$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 4,438 \sqrt{T_r}^2 - 10,103 \sqrt{T_r} + 7,649$ ; 5 — эталон:  $U = -1,988 \sqrt{T_r}^2 + 8,013 \sqrt{T_r} - 6,425$ ;  $в$  —  $C_m = 7\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = 3,513 \sqrt{T_r}^2 - 6,383 \sqrt{T_r} + 5,460$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = 12,538 \sqrt{T_r}^2 - 36,038 \sqrt{T_r} + 28,773$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -1,125 \sqrt{T_r}^2 + 7,715 \sqrt{T_r} - 3,904$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 7,575 \sqrt{T_r}^2 - 19,655 \sqrt{T_r} + 15,797$ ; 5 — эталон:  $U = -1,988 \sqrt{T_r}^2 + 8,013 \sqrt{T_r} - 6,425$



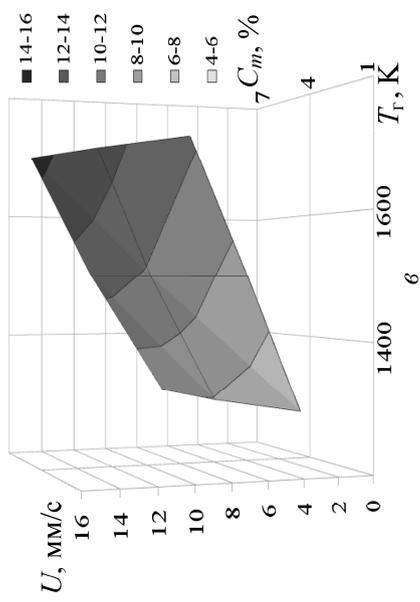
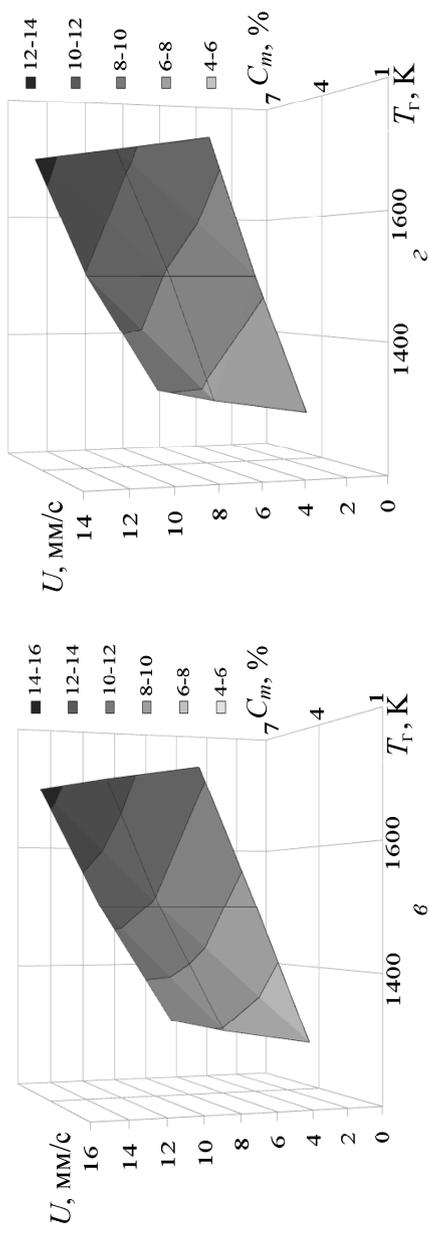
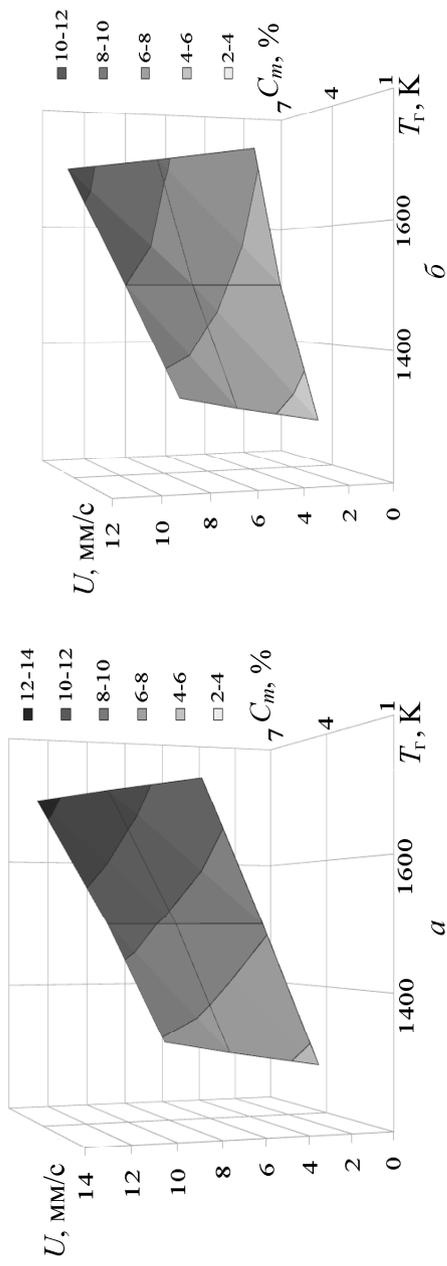
**Рис. 2.** Зависимости  $U(\bar{T}_r)$  с микро- и ультрадисперсными катализаторами БХА и ОЖ при рабочем давлении  $p = 6$  МПа:

$a$  —  $C_m = 1\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -4,450 \bar{T}_r^2 + 18,895 \bar{T}_r - 15,066$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = -5,038 \bar{T}_r^2 + 19,988 \bar{T}_r - 15,618$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -9,175 \bar{T}_r^2 + 33,310 \bar{T}_r - 25,249$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = -10,175 \bar{T}_r^2 + 36,990 \bar{T}_r - 28,995$ ; 5 — эталон:  $U = -4,900 \bar{T}_r^2 + 18,730 \bar{T}_r - 14,725$ ;  $b$  —  $C_m = 4\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -0,100 \bar{T}_r^2 + 6,350 \bar{T}_r - 4,197$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = -0,863 \bar{T}_r^2 + 8,238 \bar{T}_r - 6,049$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -11,487 \bar{T}_r^2 + 44,017 \bar{T}_r - 33,391$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 6,538 \bar{T}_r^2 - 13,928 \bar{T}_r + 11,233$ ; 5 — эталон:  $U = -4,900 \bar{T}_r^2 + 18,730 \bar{T}_r - 14,725$ ;  $v$  —  $C_m = 7\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -0,525 \bar{T}_r^2 + 9,155 \bar{T}_r - 5,197$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = 9,650 \bar{T}_r^2 - 22,520 \bar{T}_r + 17,464$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -5,375 \bar{T}_r^2 + 25,165 \bar{T}_r - 16,659$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 5,563 \bar{T}_r^2 - 9,788 \bar{T}_r + 8,978$ ; 5 — эталон:  $U = -4,900 \bar{T}_r^2 + 18,730 \bar{T}_r - 14,725$



**Рис. 3.** Зависимости  $U(\bar{T}_r)$  с микро- и ультрадисперсными катализаторами БХА и ОЖ при рабочем давлении  $p = 10$  МПа:

$a$  —  $C_m = 1\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -6,500 \bar{T}_r^2 + 26,480 \bar{T}_r - 20,730$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = -6,633 \bar{T}_r^2 + 26,047 \bar{T}_r - 20,006$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -14,950 \bar{T}_r^2 + 53,240 \bar{T}_r - 40,996$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = -14,550 \bar{T}_r^2 + 51,930 \bar{T}_r - 40,214$ ; 5 — эталон:  $U = -7,375 \bar{T}_r^2 + 27,635 \bar{T}_r - 21,554$ ;  $б$  —  $C_m = 4\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -2,813 \bar{T}_r^2 + 15,787 \bar{T}_r - 10,385$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = -4,013 \bar{T}_r^2 + 20,233 \bar{T}_r - 15,412$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -17,463 \bar{T}_r^2 + 65,148 \bar{T}_r - 49,783$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 7,675 \bar{T}_r^2 - 15,670 \bar{T}_r + 13,267$ ; 5 — эталон:  $U = -7,375 \bar{T}_r^2 + 27,635 \bar{T}_r - 21,554$ ;  $в$  —  $C_m = 7\%$ ; 1 — БХА[МД]:  $U = -5,013 \bar{T}_r^2 + 25,052 \bar{T}_r - 16,294$ ; 2 — ОЖ[МД]:  $U = 4,675 \bar{T}_r^2 - 3,385 \bar{T}_r + 1,742$ ; 3 — БХА[УД]:  $U = -9,000 \bar{T}_r^2 + 39,585 \bar{T}_r - 27,456$ ; 4 — ОЖ[УД]:  $U = 1,725 \bar{T}_r^2 + 4,825 \bar{T}_r - 1,656$ ; 5 — эталон:  $U = -7,375 \bar{T}_r^2 + 27,635 \bar{T}_r - 21,554$



**Рис. 4.** Зависимости скорости горения НБГТ от содержания катализатора и температуры горения ( $T_g \approx 1400 \dots 1800$  К):  
*a* — с БХА[МД]; *б* — с ОЖ[МД]; *в* — с ОЖ[УД]; *г* — с ОЖ[УД]

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Валяев В.А., Калинин С.В. Исследование и разработка пиротехнических топлив для газогенераторов систем спасения измерительных вариантов торпед. *Вопросы оборонной техники. Сер. № 14. Проектирование систем вооружения, боеприпасов и измерительных комплексов*, 2012.
- [2] Шабунин А.И., Калинин С.В., Сарабьев В.И. и др. Результаты исследования и разработки низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив для систем перемещения элементов исполнительных механизмов. *Наука и образование. Электрон. науч.-техн. изд.*, 2012, № 2.
- [3] Калинин С.В., Шабунин А.И., Валяев В.А., Шибанов С.В., Сарабьев В.И. Разработка низкотемпературных газогенерирующих топлив с повышенной скоростью горения для устройств раскрутки ротора турбореактивных двигателей. *Химическая физика и мезоскопия*. Липанов А.М., ред. Ижевск, 2011, с. 165–169.
- [4] Калинин С.В., Шабунин А.И., Валяев В.А., Шибанов С.В., Сарабьев В.И. Определение закономерностей изменения и путей регулирования скорости горения модифицированных низкотемпературных газогенерирующих топлив. *Новые технологии. Материалы XXXII Всерос. конф. РАН*. Москва, 2012, с. 59–65.
- [5] Калинин С.В., Шабунин А.И., Валяев В.А. и др. Определение закономерностей изменения и путей регулирования скорости горения модифицированных низкотемпературных газогенерирующих топлив. *Новые технологии. Материалы IX Всерос. конф. РАН*. Москва, 2012, т. 2, с. 59–65.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Калинин С.В., Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Валяев В.А. Определение закономерностей влияния рецептурных и внутрибаллистических параметров на скорость горения низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/713.html>

**Калинин Сергей Викторович** окончил Московский государственный индустриальный университет в 2008 г.; старший научный сотрудник Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии» (г. Сергиев Посад); автор более 14 научных работ в области исследования и разработки твердых пиротехнических топлив и зарядов для воздушно-реактивных двигателей и низкотемпературных газогенераторов. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Шабунин Александр Иванович** — канд. техн. наук; начальник лаборатории Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии» (г. Сергиев Посад). e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Сарабьев Виктор Иванович** — д-р техн. наук; начальник лаборатории Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии» (г. Сергиев Посад). e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Валяев Владимир Александрович** — инженер-конструктор I кат. Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии» (г. Сергиев Посад). e-mail: lab112.niiph@yandex.ru