

УДК 662.613.12:669.046.44(024.2)

Кириченко О.В.<sup>1</sup>, Акиншин В.Д.<sup>2</sup>, Кришталь Н.А.<sup>3</sup>, Заика П.И.<sup>4</sup>, Ващенко В.А.<sup>5</sup>

**ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ СИСТЕМ ОТ СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ, НАХОЖДЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ГОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ОБДУВА ПОТОКОМ ВОЗДУХА**

*Исследовано влияние коэффициента избытка окислителя ( $\alpha = 0,3...1,6$ ) и дисперсности компонентов ( $d_M = 74,5...305$  мкм,  $d_N = 50...220$  мкм) на скорость и концентрационные пределы горения ПНС в условиях повышенных скоростей обдува потоком воздуха ( $V = 0...1,5 \cdot 10^3$  м/с), позволяющее сформировать базу данных по их пожароопасным свойствам в условиях эксплуатации пиротехнических изделий на их основе.*

Специфические условия эксплуатации пиротехнических изделий (например, встречный сверхзвуковой обдув потоком воздуха [1 – 6, 9, 10, 12 – 15]) предъявляют повышенные требования к пожаровзрывобезопасности пиротехнических нитратных систем (ПНС – двойные уплотненные смеси из порошков магния с нитратами калия, стронция и бария), которыми снаряжаются изделия. Это обусловлено тем, что в указанных условиях в результате самоускорения процесса горения образцов ПНС и перехода его во взрыв происходит разрушение изделий и разбрасывание продуктов сгорания вместе с высокотемпературными осколками металлических корпусов. При этом, если методические рекомендации по обеспечению пожарной безопасности различных пиротехнических изделий в условиях изготовления, хранения и транспортировки в настоящее время имеются и продолжают совершенствоваться [1, 5 – 8, 11, 12], то методики и рекомендации по обеспечению пожарной безопасности изделий, в том числе и на основе ПНС, в указанных условиях эксплуатации на данный момент отсутствуют. Важным обстоятельством, сдерживающим разработку этих рекомендаций, является отсутствие базы данных по скорости и концентрационным пределам горения ПНС в условиях сверхзвукового обдува потоком воздуха. Поэтому целью данной работы является получение экспериментальных данных о влиянии технологических факторов (коэффициента избытка окислителя, среднего размера частиц порошка металлического горючего и окислителя, природы окислителя) на зависимости скорости и концентрационных пределов горения ПНС от скорости обдува потоком воздуха, а также формирование базы данных по их пожароопасным свойствам в этих условиях.

Образцы ПНС изготавливались по технологии, используемой в пиротехническом производстве и имели такие технологические параметры [1, 3 – 6, 12]: коэффициент уплотнения  $K_Y = 0,96...0,98$ ; коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 0,3...1,6$ ; средний размер частиц металлического горючего  $d_M = 74,5...305$  мкм и окислителя  $d_N = 50...220$  мкм; оболочки металлические диаметром  $d = 2 \cdot 10^{-2}$  м и толщиной  $h = 8 \cdot 10^{-4}$  м. При этом скорость и концентрационные пределы горения находили с помощью известных методов, применяемых при исследовании пределов горения металлизированных конденсированных систем [1, 5, 6, 12]. Испытания образцов ПНС в условиях обдува потоком воздуха проводили на следующем стандартном пиротехническом оборудовании [5, 6, 10].

<sup>1</sup>ЧАПБ, препод.

<sup>2</sup>ГУП Мос НПО, д-р техн. наук, проф.

<sup>3</sup>ЧАПБ, канд. психолог. наук, доц.

<sup>4</sup>ЧАПБ, канд. техн. наук, доц.

<sup>5</sup>ЧГТУ, д-р техн. наук, проф.

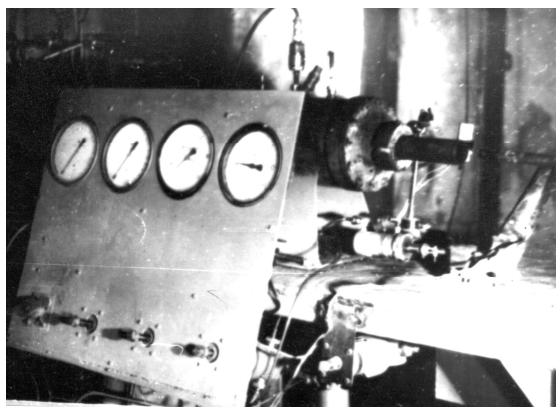


Рис. 1 – Общий вид лабораторно-испытательной установки, моделирующей сверхзвуковой встречный обдув потоком воздуха пиротехнических

образец 3; при этом державка с образцом может перемещаться относительно среза сопла посредством специально разработанной гидравлической системы. Нагрев воздуха в камере происходит при смешивании холодного воздуха с горячими газами, которые генерируются в теплогенераторе 5. Из баллона горючее (бензин) подается через форсунки в камеру теплогенератора. Туда же подается воздух (окислитель). Эти компоненты подаются через отсежные краны, управляемые электропневмоклапанами. Оптимальные расстояния от образцов до среза сопла определялись путем ширен-фотографических исследований на теновом приборе ИАБ-451 [5, 6] структуры газового потока при сверхзвуковом режиме обтекания. Для обеспечения высокой производительности испытаний был использован специальный пульт автоматического управления установкой по заданной программе. Последовательность включения и выключения элементов автоматически обеспечивалась встроенными в схему реле времени в количестве 10 штук, в качестве реле времени использовались электромеханические реле типа ЭМРВ-27Б. Погрешность определения скорости горения образцов ПНС составляет 5...8 %.

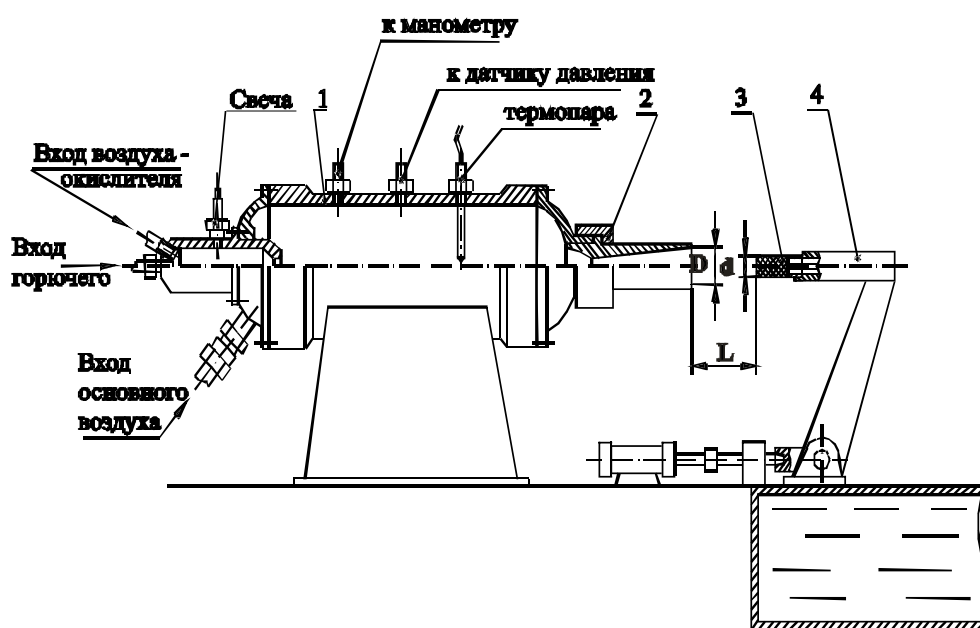
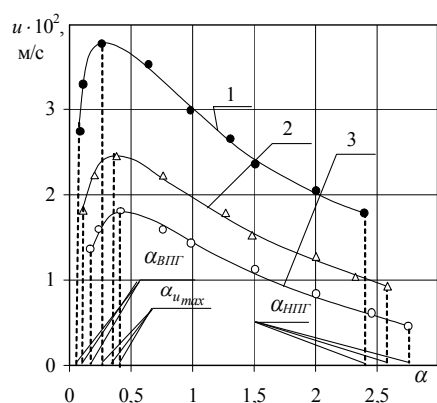
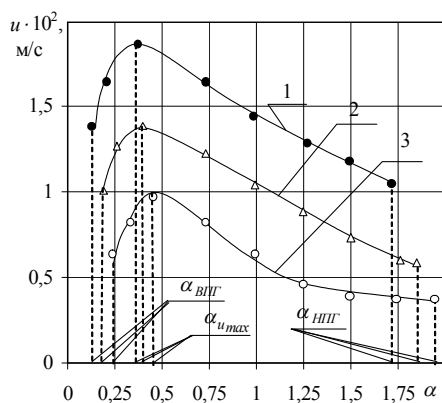


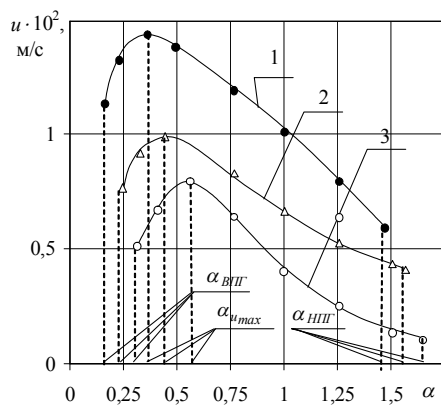
Рис. 2 – Общая схема лабораторно-испытательной установки



а)

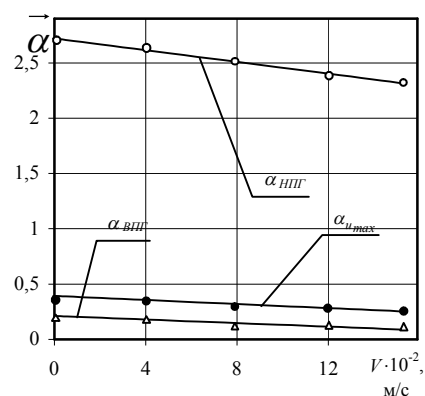


б)

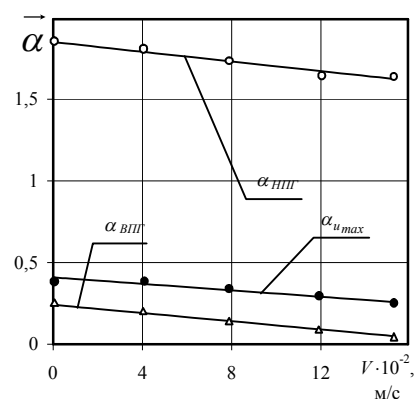


в)

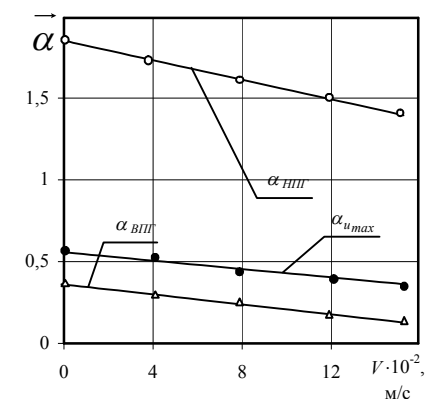
Рис. 3 – Влияние скорости обдува потоком воздуха и природы окислителя на зависимости скорости горения ПНС от соотношения компонентов ( $d_M = 74,5$  мкм,  $d_N = 220$  мкм,  $T_0 = 293$  К,  $P = 10^5$  Па): а) система  $\text{Mg} + \text{KNO}_3$ ; б) система  $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ; в) система  $\text{Mg} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ; 1 –  $V = 1,2 \cdot 10^3$  м/с; 2 –  $V = 4 \cdot 10^2$  м/с; 3 –  $V = 0$ ; О, Δ, • – экспериментальные точки.



а)



б)



в)

Рис. 4 – Зависимости компонентов вектора

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{БПГ}} \\ \alpha_{u_{\text{max}}} \\ \alpha_{\text{НПГ}} \end{pmatrix} \text{ от скорости обдува}$$

потоком воздуха ( $d_M = 74,5$  мкм,  $d_N = 220$  мкм,  $T_0 = 293$  К,  $P = 10^5$  Па): а) – система  $\text{Mg} + \text{KNO}_3$ ; б) – система  $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ; в) – система  $\text{Mg} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ; О, Δ, • – экспериментальные точки.

Результаты проведенных экспериментальных исследований зависимости  $u(\alpha)$  для  $\alpha_{ВПГ} \leq \alpha \leq \alpha_{НПГ}$  и влияния на нее скорости обдува потоком воздуха ( $V = 0 \dots 1,2 \cdot 10^3$  м/с) и природы окислителя представлены на рис. 3. Из указанных данных следует, что зависимость  $u(\alpha)$  имеет экстремальный характер с координатами максимума  $\alpha_{u_{max}}$  и  $u_{max}$ . При этом увеличение  $V$  до  $1,2 \cdot 10^3$  м/с практически не влияет на характер зависимости  $u(\alpha)$ , а только вызывает увеличение скорости горения ПНС: например,  $u_{max}$  для системы  $Mg + KNO_3$  увеличивается в 2,1 раза; для системы  $Mg + Sr(NO_3)_2$  – в 1,9 раза; для системы  $Mg + Ba(NO_3)_2$  – в 1,8 раза.

Результаты экспериментальных исследований влияния скорости обдува потоком воздуха ( $V = 0 \dots 1,5 \cdot 10^3$  м/с) на концентрационные пределы горения ПНС представлены на рис. 4. Из этих данных видно, что с увеличением  $V$  происходит уменьшение величин  $\alpha_{ВПГ}$ ,  $\alpha_{u_{max}}$  и  $\alpha_{НПГ}$  (например, для системы  $Mg + KNO_3$  величина  $\alpha_{ВПГ}$  уменьшается в 1,2 раза,  $\alpha_{u_{max}}$  – в 1,15 раза,  $\alpha_{НПГ}$  – в 1,07 раза; для системы  $Mg + Sr(NO_3)_2$  величина  $\alpha_{ВПГ}$  уменьшается в 1,3 раза,  $\alpha_{u_{max}}$  – в 1,2 раза,  $\alpha_{НПГ}$  – в 1,16 раза; для системы  $Mg + Ba(NO_3)_2$  величина  $\alpha_{ВПГ}$  уменьшается в 1,3 раза,  $\alpha_{u_{max}}$  – в 1,4 раза,  $\alpha_{НПГ}$  – в 1,09 раза).

#### Выводы

1. Получены новые экспериментальные данные по скорости и концентрационным пределам горения ПНС в условиях повышенных скоростей обдува потоком воздуха ( $V = 0 \dots 1,5 \cdot 10^3$  м/с) для широкого диапазона изменения коэффициента избытка окислителя ( $0,09 \leq \alpha \leq 2,61$ ) и дисперсности компонентов ( $d_m = 74,5 \dots 305$  мкм,  $d_N = 50 \dots 220$  мкм).
2. Установлено, что зависимость  $u(\alpha)$  при изменении  $V$  имеет экстремальный характер: изменяется от  $u_{\alpha_{ВПГ}} = u|_{\alpha=\alpha_{ВПГ}}$  до максимального значения  $u_{max} = u|_{\alpha=\alpha_{max}}$  и далее до  $u_{\alpha_{НПГ}} = u|_{\alpha=\alpha_{НПГ}}$  ( $u_{\alpha_{ВПГ}} > u_{\alpha_{НПГ}}$ ). При этом значение  $u_{max}$  уменьшается в 1,3... 2,1 раза при увеличении  $d_m$  (до 305 мкм) и  $d_N$  (до 220 мкм), а также возрастает в 1,5...2 раза при увеличении  $V$  (до  $1,5 \cdot 10^3$  м/с). Возрастание  $V$  приводит к уменьшению  $\alpha_{ВПГ}$ ,  $\alpha_{u_{max}}$  и  $\alpha_{НПГ}$  в 1,5...2 раза.

#### Перечень ссылок

1. Шидловский А.А. Пиротехника в народном хозяйстве / А.А. Шидловский, А.И. Сидоров, Н.А. Силин. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
2. Волков Е.Б. Статика и динамика ракетных двигательных установок / Е.Б. Волков, Т.А. Сырицын, Г.Ю. Мазинг. – М.: Машиностроение, 1978. – 320 с.
3. Силин Н.А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Л.Я. Кашипов. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
4. Силин Н.А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Л.Я. Кашипов. – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
5. Силин Н.А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Л.Я. Кашипов. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.

6. Ващенко В.А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами / В.А. Ващенко. – М.: Деп. в ВИНТИ 07.08.96, № 62 – хп 96. – 408 с.
7. Вогман Л.П. Нормирование пожарной опасности фейерверочных пиротехнических изделий бытового назначения / Л.П. Вогман, О.В. Сотников // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 2. – С. 3 – 11.
8. Вогман Л.П. Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения / Л.П. Вогман, В.В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 4. – С. 51 – 57.
9. Ващенко В.А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем в условиях сверхзвуковой обдува потоком воздуха и вращения / В.А. Ващенко, Д.М. Краснов, П.И. Заика // Материалы II Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. – Санкт-Петербург, Россия, 22 – 26 июня 1998 г. – С. 67 – 81.
10. Комплекс экспериментальных установок и методик для определения скорости и пределов горения металлизированных конденсированных систем в динамических условиях эксплуатации / В.А. Ващенко, П.И. Заика, Д.М. Краснов, С.И. Стащенко, Ю.И. Кикоть // Вісник Сумського державного університету. – 2001. – № 18. – С. 112 – 124.
11. Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий / Л.П. Вогман, В.А. Зуйков, В.Е. Татаров, В.В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 3. – С. 24 – 41.
12. Заїка П.І. Дослідження пожежно-небезпечних властивостей нітратно-магнієвих сумішей: автореф. дис. ...канд. техн. наук / П.І. Заїка; Укр. НДІПБ МВС України. – Київ, 2003. – 20 с.
13. Скорость горения нитратных систем в динамических условиях эксплуатации / О.В. Кириченко, В.В. Цыбулин, В.А. Ващенко, П.И. Заика // Матеріали науково-практичної конференції “Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин”. – Черкаси, Україна, 27 – 29 травня 2004 року. – С. 75.
14. Пожежонебезпечні властивості піротехнічних нітратних систем в умовах надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання / О.В. Кириченко, П.І. Заїка, В.В. Цибулін, В.А. Ващенко // Вісник ЧДТУ. – 2006. – № 4. – С. 163 – 169.
15. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе / В.А. Ващенко, Д.И. Котельников, Ю.Г. Лега, Д.М. Краснов, И.В. Яценко, О.В. Кириченко. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.

Рецензент: Г.С. Столяренко  
д-р техн. наук, проф., ЧГТУ

Статья поступила 18.01.2008