

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ

А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин, В. Г. Хубаев,
В. И. Байков, Н. П. Токарев, А. П. Денисюк

(Москва)

В ряде случаев под действием перегрузок, направленных по нормали к поверхности горения конденсированных систем, происходит увеличение скорости горения. Это явление вызывается удержанием вблизи поверхности горения конденсированных частиц, образующихся в процессе горения. Наиболее подробно этот вопрос исследован на примере смесевых систем на основе перхлората аммония [1—3]. Имеющиеся в литературе весьма ограниченные данные по горению при перегрузках двухосновных порохов [4—8] не позволили пока установить общих закономерностей этого явления.

Опытные данные по влиянию перегрузок на скорость горения порохов с добавками катализаторов носят противоречивый характер. В одних случаях сообщается об увеличении скорости горения таких систем под действием перегрузок [7]; в других — наблюдается ее уменьшение [9]. Последний эффект объясняется в [9] накоплением в поле перегрузок на поверхности горения добавок меди и свинца и затоплением ее слоем расплавленного металла.

В настоящей работе проводится исследование влияния перегрузок на горение баллиститных составов на основе нитроклетчатки (НК) и нитроглицерина (НГЦ) или диэтиленгликольдинитрата (ДЭГДН) — трех исходных безметалльных, отличающихся составом и калорийностью; трех металлизированных, которые получались путем добавления к исходным 15% алюминия со среднемассовым размером частиц ~ 4 мкм и порохов с добавками катализаторов горения (сажа, окислы свинца, окись меди и их комбинации). Опыты проводились при нормальных условиях (1g), а также при перегрузках до 800g на центрифуге [2, 3, 8].

Базовые скорости горения (без перегрузок) высококалорийного модельного баллиститного состава А на основе НК и НГЦ примерно вдвое превышали скорость горения пороха Н, а скорость горения низкокалорийного модельного состава В на основе НК и ДЭГДН была примерно вдвое ниже, чем у пороха Н. Добавление алюминия слабо влияет на базовые скорости горения составов (см. таблицу).

Пороха на основе НГЦ и НК

Скорости горения составов А и Н на основе НГЦ и НК под действием положительных перегрузок увеличиваются, причем алюминизированные составы (рис. 1) значительно чувствительнее к воздействию перегрузок (при прочих равных условиях), чем исходные безметалльные (см. таблицу). После сгорания безметалльных составов остается небольшое количество сжатого остатка. Быстрогогорящий безметалльный состав А менее чувствителен к воздействию перегрузок, чем порох Н. Уменьшение зависимости скорости горения от перегрузок при переходе к быстрогорящим составам близкого типа — общее правило [1, 2].

Базовые скорости горения составов, см/с

Составы	Скорость горения при давлении, атм			$Z = u/u_0$ ($\mu = 50$ атм, $a = 800$ г)
	20	50	80	
А	0,81	1,40	1,90	1,4
А+15% Al	0,62	1,32	2,00	1,1
Н	0,34	0,65	0,90	1,55
Н+15% Al	0,38	0,61	0,76	1,25
В	0,14	0,28	0,41	—
В+15% Al	0,18	0,35	0,46	1,8

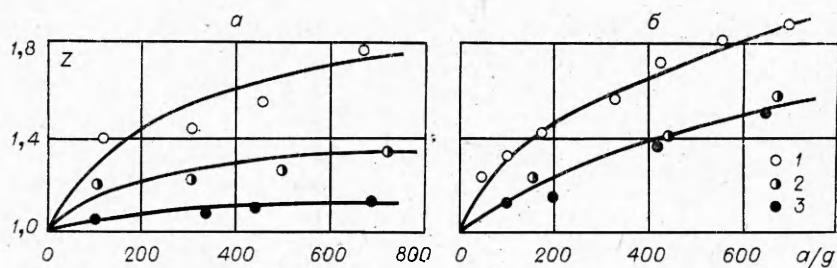


Рис. 1. Зависимость Z от перегрузок для баллиститных порохов А+15% Аl (а) и Н+15% Аl (б) при давлении, атм:
1 — 20, 2 — 50, 3 — 80.

Опытные данные по горению баллиститных безметалльных составов А и Н качественно согласуются с известными данными по влиянию перегрузок на горение пироксилиновых порохов [5] и порохов на основе НГЦ и НК [4, 6—8]. Разработанную в работе [10] теорию горения при перегрузках труднолетучих конденсированных систем применить для описания настоящих результатов не удалось, так как не было зарегистрировано входящее в теорию насыщение скорости горения при росте перегрузок. После сгорания в поле перегрузок металлизированного состава А остаются застывшие агломераты алюминия и его окиси, так же как после сгорания составов на основе перхлората аммония [1—3].

Замкнутая теория горения алюминизированных составов в поле перегрузок [2—3] предсказывает, что чувствительность скорости горения составов возрастает при понижении температуры поверхности горения $T_{\text{п}}$. $T_{\text{п}}$ горения баллиститных составов ниже, чем у смесевых на основе ПХА (700—900°С), и равна 250—450°С в зависимости от давления и состава [11]. С учетом такой температуры поверхности экспериментальные данные по горению металлизированного пороха А+15% Аl в поле перегрузок (см. рис. 1, а) удовлетворительно описываются формулой, полученной в [2, 3],

$$Z^2 (Z^2 - 1) = K \left[\frac{(T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) (T_{\text{п}}^0 - T_0)}{(T_{\text{п}} - T_0) (T_{\text{к}}^0 - T_{\text{п}}^0)} \right]^2 \frac{ap}{(1 - \omega)^2 u_0^3}, \quad (1)$$

где $K = \frac{2\lambda_r \rho_{\text{к}} (T_{\text{к}}^0 - T_{\text{п}}^0)^2}{c \rho^3 \lambda (T_{\text{п}}^0 - T_0)^2}$, $T_{\text{к}}^0$, $T_{\text{п}}^0$ — температура капли-агломерата и поверхности при горении составов на основе ПХА; $T_{\text{к}}$, $T_{\text{п}}$, T_0 — температура капли-агломерата, поверхности и начальная при горении баллиститных составов; u_0 — базовая скорость горения; $Z = u/u_0$ — относительное увеличение скорости горения при перегрузках; p — давление; ω — содержание алюминия в составе пороха; λ_r и λ — теплопроводность газа и пороха; $\rho_{\text{к}}$ и ρ — плотность капли и пороха; c — теплоемкость пороха.

Таким образом, механизм увеличения скорости горения алюминизированного высококалорийного состава А в поле перегрузок такой же, как и для составов на ПХА, и определяется удержанием у поверхности горячих капель окислов алюминия и горящего металла.

Экспериментальные данные по зависимости скорости горения металлизированного пороха Н от перегрузок (см. рис. 1 б) также можно описать с помощью соотношения (1), однако для этого необходимо взять эффективную температуру горячих капель алюминия в 1500 вместо 3000°С (температура кипения окиси алюминия) для составов на основе ПХА. Это можно объяснить уменьшением интенсивности горения алюминия вблизи от поверхности из-за недостатка активного окислителя

и сравнительно низкой температурой горения исходного пороха Н. Остаток после сгорания металлизированного пороха Н в поле перегрузок кроме окислов содержит металлический алюминий и сажу.

Влияние перегрузок на скорость горения конденсированных систем происходит из-за поджигания к поверхности конденсированных частиц, образующихся в процессе горения. Для составов с алюминием агломераты, определяющие изменение скорости горения в поле перегрузок, известны и одинаковы для разных составов, что и позволило создать соответствующую теорию.

При горении безметалльных составов перегрузки влияют на скорость воздействием на конденсированные продукты сгорания, на частицы, внесенные извне (например, при поджигании [8]), на диспергированные частицы [4, 10], на частицы технологических добавок [6] либо на пенный слой [10] и т. д. Многообразие возможных механизмов явления, качественное изменение закономерностей горения безметалльных составов в поле перегрузок при изменении состава топлива, незначительный суммарный эффект изменения их скорости горения под действием перегрузок (как правило, не превышающий 30—50%) — основные причины, затрудняющие построение общей модели горения безметалльных составов при наличии перегрузок в отличие от общей модели горения металлизированных составов.

Пороха на основе ДЭГДН и НК

Горение безметалльного низкокалорийного пороха В под действием положительных перегрузок, превышающих некоторое критическое значение a^* , становится невозможным — выгорает лишь часть образца, а затем порох гаснет. При дальнейшем повышении уровня перегрузок образец пороха не удавалось даже поджечь (хотя промежуточный поджигающий состав из пороха Н при этом полностью сгорал). Величина критического значения перегрузок, при которых наступал срыв горения, возрастала с повышением давления и увеличением длины трубки, в которую помещался образец. В настоящих опытах применялись трубки длиной 3 или 8 см (в последнем случае длина трубки была больше радиуса центрифуги, равного 4,5 см).

Скорость горения безметалльного состава В вблизи предела, измеренная на базе сгорающей в течение опыта части образца, при давлениях 20 и 50 атм практически оказалась равна скорости горения состава в отсутствие перегрузок (рис. 2). При $p = 80$ атм и $a \leq 100$ г, меньших a^* , в коротких трубках наблюдалось некоторое возрастание скорости по сравнению с базовой скоростью горения; дальнейшее увеличение a приводило к уменьшению u до исходной и к срыву горения. При горении состава В в длинных трубках (8 см) критическое значение перегрузок наблюдалось только при 20 атм. При больших давлениях образцы горели устойчиво в изученном диапазоне изменения перегрузок. Скорость горения в этом случае воз-

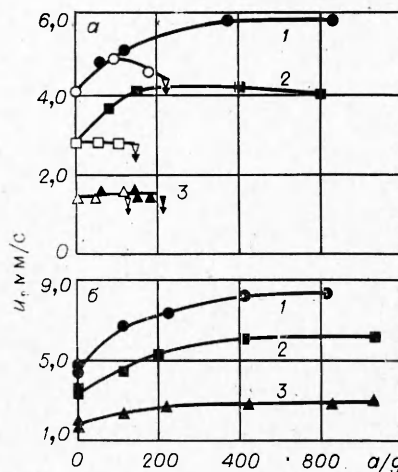


Рис. 2. Зависимость скорости горения пороха В (а) и В+15% Al (б) от перегрузок при давлении 80 (1), 50 (2), и 20 атм (3).

Светлые точки — трубки длиной 3 см; темные точки — трубки длиной 8 см. Стрелками обозначены критические значения перегрузок.

растала с повышением уровня a и при $600g$ в 1,5 раза превышала исходную (см. 2, a).

На поверхности безметаллических образцов состава В, потухших под действием перегрузок, никакого конденсированного остатка, кроме отдельных сажистых частиц, не обнаружено. Скорость горения низкокалорийного состава В+15% А1 под действием перегрузок увеличивается и при $1000g$ в 1,5—2 раза превосходит базовую скорость этого состава во всем диапазоне давлений (см. рис. 2, b) и не зависит от длины трубки. Остаток после сгорания этого состава представляет собой, как и в отсутствие перегрузок, чешуйчатую сажистую таблетку, прочность которой увеличивалась, а высота уменьшалась по мере роста перегрузок. В сажистом каркасе таблетки были распределены капельки алюминия.

Конвективный механизм затухания низкокалорийного пороха

Под действием положительных перегрузок может происходить срыв горения летучих ВВ [12] или чистого ПХА [5], что объясняется в [13, 14] усилением конвективного теплообмена и охлаждением горячей поверхности продуктами сгорания. В [14] проведено решение такой задачи в случае бесконечно длинного канала, когда охлаждение газа происходит только на стенках. Влияние конвективного охлаждения поверхности возрастает с понижением базовой скорости горения, поэтому низкокалорийные составы, горящие с очень низкими скоростями, весьма интересны как объекты для изучения этого явления. Отметим, что конвективный механизм гашения конденсированных систем при перегрузках является гипотетическим, прямых экспериментальных доказательств, что именно этим механизмом определяется устойчивость горения составов при перегрузках, до сих пор не найдено.

Интенсивность конвективного охлаждения горячей поверхности существенно связана с геометрическими размерами горячей системы и канала, в котором горение происходит. В случае горения заряда в бесконечно длинной трубке имеется только один параметр — размерности длины — диаметр канала d ; если же применяется трубка конечной длины, то добавляется еще один параметр — длина трубки l . Критерий предела горения будет в этом случае функцией отношения l/d . С уменьшением длины трубки критические значения перегрузок (при постоянных d и p) должны уменьшаться, так как будет усиливаться подсос холодного газа из внешней атмосферы. Для бесконечно длинного канала холодный газ уже не может достигнуть горячей поверхности, и срыв горения определяется только теплопотерями с поверхности за счет влияния охлажденных на стенках канала газовых продуктов сгорания.

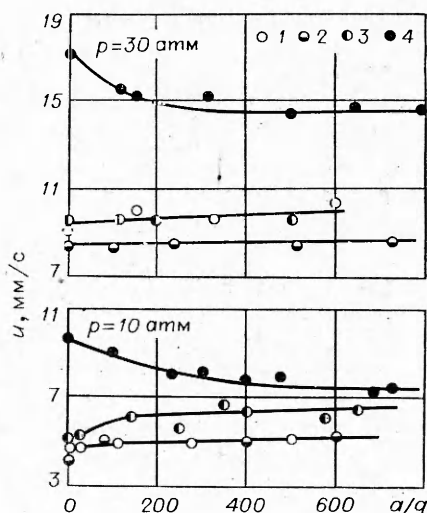
Условия проведения опытов в настоящей работе соответствуют случаям горения образцов в каналах конечного размера (для коротких трубок) и бесконечно длинных (для длинных трубок). В последнем случае это достигалось тем, что выбиралась длина трубки больше радиуса центрифуги; конвективный подсос в канал холодного газа из внешней атмосферы был при этом невозможен.

Полученные в работе результаты по гашению низкокалорийного безметаллического пороха В качественно согласуются с изложенными выше соображениями. Горение образцов пороха в длинных трубках оказалось значительно устойчивее, чем в коротких (см. рис. 2, a). Независимость скорости горения состава В+15% А1 при перегрузках от длины трубки и в отсутствие критических перегрузок также находится в соответствии с конвективным механизмом срыва горения для безметаллического состава, так как при горении металлизированного состава над поверхностью образуется мощный каркас, препятствующий развитию конвективных потоков.

Пороха с добавками катализаторов

Добавление 5% сажи ПМ-50 ($S_{уд} = 50 \text{ м}^2/\text{г}$) или 10% окиси свинца с размером частиц 1 мкм в состав пороха А незначительно влияет на его базовую скорость горения (рис. 3). Совместное введение этих добавок приводит к более чем двукратному увеличению базовой скорости горения, что находится в соответствии с известными результатами о значительном повышении каталитической активности окиси свинца

Рис. 3. Зависимость скорости горения составов на основе пороха А от перегрузок.
1 — А; 2 — А+5% сажи; 3 — А+10% PbO; 4 — А+5% сажи+10% PbO.



в присутствии сажи для высококалорийных порохов [15—17].

Под действием перегрузок, направленных по нормали к поверхности горения, скорость горения состава А без добавок или с какой-либо одной добавкой несколько увеличивается, а скорость горения состава А+10% PbO+5% сажи по мере возрастания перегрузок уменьшается (см. рис. 3). При $p = 10 \text{ атм}$ u состава с комбинированной добавкой уменьшается до u состава А+10% PbO, т. е. наблюдается как бы выключение действия комбинированного катализатора окись свинца — сажа при перегрузках. Механизм катализа пороха Н окисью свинца близок к механизму катализа состава А+10% PbO+5% сажи, так как горение системы Н+PbO сопровождается образованием из динитротолуола «углистого» каркаса.

С возрастанием перегрузок скорость горения пороха Н+5% PbO увеличивается медленнее, чем у пороха Н, поэтому в поле перегрузок наблюдается тенденция к сближению кривых $u(g)$ для этих составов, т. е. и в этом случае имеет место эффект выключения действия катализатора (рис. 4). Комбинированный катализатор PbO₂—CuO (размер частиц менее 1 мкм) — один из наиболее сильных известных в настоящее время катализаторов горения пороха Н [18, 19], с его помощью можно достичь почти трехкратного увеличения скорости горения в отсутствие перегрузок. Характер влияния перегрузок на горение этой системы существенно связан с уровнем давления, при котором проводится эксперимент. При $p > 70 \text{ атм}$ наблюдается увеличение скорости горения под действием перегрузок, а при $p = 20—50 \text{ атм}$ — ее уменьшение.

В работе проведено также принудительное гашение образцов пороха и исследование погашенной поверхности пороха под микроскопом. В этих опытах образцы пороха приклеивались к массивным медным поддонам и затем сжигались в нормальных условиях либо в условиях воздействия перегрузок. При перегрузках после сгорания образцов пороха с добавками окислов металла оставался остаток из сажи и отдельных крупных (~1 мм и больше) капель с металлическим блеском (по-видимому, свинца), в отсутствие перегрузок крупных частиц металла (или его окислов) не наблюдалось.

Расчет показывает, что перегрузки (по крайней мере, в исследованном диапазоне изменения) не могут существенно влиять на газовые продукты горения пороха или на сплошную конденсированную фазу при его горении. Они влияют лишь на конденсированные продукты разложения (горения) пороха, находящиеся в двухфазной (газ+твер-

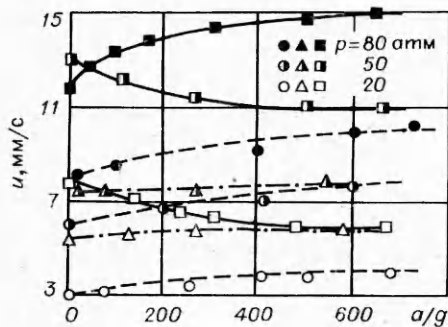


Рис. 4. Зависимость скорости горения составов на основе пороха Н от перегрузок.
 ○ — Н; △ — Н+5% PbO; □ — Н+0,5% PbO₂+
 +1,5% CuO.

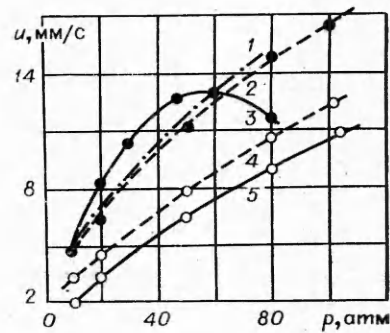


Рис. 5. Зависимость скорости горения порохов от давления при нормальных условиях.
 1 — Н+0,1% PbO₂+1,9% CuO; 2, 3 —
 Н+0,5% PbO₂+1,5% CuO; 4, 5 — Н (1, 3,
 5 из [18] и 2, 4 в условиях воздействия
 перегрузок 500 g).

дые частицы) зоне горения, где происходят достаточно интенсивные химические реакции с образованием газообразных продуктов. Целостность конденсированной фазы в этой зоне нарушена, хотя сажистый каркас может оставаться. Наблюдаемое в настоящей работе изменение скорости горения порохов с добавками катализаторов в результате воздействия на них поля перегрузок указывает на то, что это двухфазная зона имеет существенное значение в механизме горения изучаемых систем. Рассмотрим возможные механизмы влияния перегрузок на горение конкретных катализированных систем.

Большая эффективность комбинированного катализатора горения баллиститного пороха типа окись свинца — сажа связана с тем, что сажа образует на поверхности горения сажистый каркас, который препятствует агломерации металла и способствует поддержанию высокой эффективной поверхности катализатора (соединений свинца) [15, 16, 20]. Модель горения в этом случае предполагает наличие углеродных нитей, на которых висят микроскопические частицы соединений свинца. В поле перегрузок наряду с удержанием инерционными силами вблизи поверхности горения оторвавшихся конденсированных частиц (сажистых и металлических) должно наблюдаться расслоение частиц более тяжелых свинца и легких сажистых. Оторванные от сажистого каркаса легкоплавкие частицы свинца будут стремиться слиться в большие капли, которые обнаружены в настоящих опытах по гашению образцов в поле перегрузок. Эффективная поверхность катализаторов при этом может значительно сокращаться, что приведет при возрастании перегрузок к уменьшению каталитического эффекта вплоть до полного его исчезновения (см. рис. 3, 4).

Рассмотрим закономерности горения системы Н+0,5% PbO₂+ +1,5% CuO с двухкомпонентным катализатором. Для наглядности представим результаты исследования в координатах $u(p)$ (рис. 5, 3). В отсутствие перегрузок кривая $u(p)$ для этого состава характеризуется наличием горба, т. е. с возрастанием давления скорость горения сначала возрастает, проходит через максимум, а затем наблюдается ниспадающий участок [18]. В поле перегрузок ход кривой резко меняется — в изученной области давлений горб пропадает и скорость горения монотонно возрастает с повышением давления. Происходит пересечение кривых $u(p)$ для пороха с добавкой комбинированного катализатора, измеренных при нормальных условиях и при наличии перегрузок. В области давлений 10—60 атм под действием перегрузок скорость горения этого состава уменьшается, а при $p > 70$ атм она уве-

личивается. В точках пересечения кривых, т. е. в области давлений ~ 10 атм и 60—70 атм, перегрузки не влияют на скорость горения. Таким образом, эффект исчезновения горба на кривой $u(p)$ под действием перегрузок, обнаруженный в настоящей работе, приводит к тому, что скорость горения этого состава в поле перегрузок может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от давления, при котором проводится сжигание образца.

Рассмотрим механизм изменения характера кривой $u(p)$ под действием перегрузок для систем с двухкомпонентным катализатором. В этом случае наряду с расслоением конденсированных продуктов горения пороха под действием перегрузок, агрегацией металла и уменьшением по этой причине активной поверхности катализатора может происходить изменение соотношения между активными поверхностями компонентов катализаторов. Степень агломерации более легкоплавкого свинца может быть значительно больше, чем у более тугоплавкой меди и ее окислов. Происходит не только суммарное уменьшение активной поверхности катализатора, но и уменьшение активной поверхности более легкоплавкого компонента катализатора по отношению ко второму компоненту. Состав катализатора в зоне, ведущей горение, в поле перегрузок отличается от состава катализатора, который действует при нормальных условиях. В то же время известно, что закон горения пороха Н с комбинированным свинцово-медным катализатором существенным образом зависит от процентного соотношения между компонентами в составе катализатора [18].

Сравнение полученной в настоящей работе зависимости $u(p)$ для состава $H+0,5\%PbO_2+1,5\%CuO$ в условиях воздействия перегрузок (при $a=500g$) с семейством кривых, полученных в работе [18] при нормальных условиях ($1g$) для составов, в которых менялось соотношение между компонентами свинцово-медного катализатора, показывает, что первая кривая практически совпадает с кривой для состава $H+0,1\%PbO_2+1,9\%CuO$, в котором, действительно, содержание свинца по отношению к меди заметно уменьшено (см. рис. 5).

Таким образом, показано, что под действием перегрузок, направленных по нормали к поверхности горения порохов с добавками катализаторов, происходит уменьшение эффективности их действия, вплоть до полного выключения катализатора. Существенно может меняться также закон горения таких систем. Изменение активности катализаторов объясняется уменьшением под действием перегрузок его эффективной поверхности в зоне влияния для однокомпонентного катализатора и изменением соотношения между активными поверхностями компонентов с различной тугоплавкостью для многокомпонентных катализаторов.

Поступила в редакцию
22/X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Виллугби, С. Кроув, К. Бейкер. ВРТ, 1967, 7, 28.
2. С. К. Орджоникидзе, А. Д. Марголин и др. ФГВ, 1971, 7, 4, 536.
3. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1978, 14, 3.
4. Б. И. Гончаренко, Б. Т. Ерохин и др. Автореф. докл. II Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М., «Наука», 1969.
5. Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов. ФГВ, 1972, 8, 4, 517.
6. Г. Нортам. РТК, 1973, 11, 6, 99.
7. Н. Abraham III, D. Netzer. Combustion Science and Technology, 1975, 11, 1—2, 75.
8. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1975, 11, 5, 702.
9. М. Булман, Д. Нетцер. РТК, 1970, 8, 6, 212.
10. В. И. Юхвид, Э. И. Максимов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 28.

11. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
12. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2, 197.
13. В. С. Бабкин, С. С. Хлевой. ФГВ, 1972, 8, 4, 597.
14. Э. И. Штессель, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1973, 9, 6, 855.
15. Р. Прекел. РТК, 1965, 3, 2, 238.
16. А. П. Денисюк, Т. М. Козырева, В. Г. Хубаев. ФГВ, 1975, 11, 2, 315.
17. D. I. Hewkin, I. A. Hicks a. o. Combustion Science and Technology, 1971, 2, 5—6, 307.
18. А. С. Андросов, А. П. Денисюк, Н. П. Токарев. ФГВ, 1976, 12, 5, 780.
19. В. М. Мальцев, М. Самерфильд. ФГВ, 1973, 9, 1, 133.
20. А. П. Денисюк, А. Д. Марголин и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 576.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПOTЕРЬ НА ПРОЦЕСС ЗАЖИГАНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин

(Черноголовка)

Распространение фронта горения в реальных условиях всегда сопровождается теплопотерями, которые могут привести к срыву горения. Впервые процесс зажигания, сопровождающийся теплопотерями, рассмотрен Зельдовичем для случая, когда объем газа заключался между стенками с различной температурой [1]. Пределы распространения пламени при наличии теплопотерь исследовались в [2]. В работе [3] рассмотрены критические явления, возникающие при торцевом зажигании накаленной стенкой цилиндрического образца с теплопотерями через боковую поверхность. Анализ процесса горения безгазовых систем [4, 5] показал, что наличие теплопотерь сказывается не только на пределе и величине скорости горения, но и на границе между стационарными и автоколебательными режимами горения.

Автоколебания расширяют область отсутствия горения. Влияние теплопотерь на развитие процесса при инициировании реакции в безгазовой системе тепловой волной горящего воспламенителя исследовалось в [6]. В этой работе показана связь предельных коэффициентов теплоотдачи по горению и зажиганию с параметрами реагирующих систем. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния теплопотерь на развитие процесса зажигания и переходные режимы горения безгазовых систем, инициируемых волной горения воспламенителя.

Постановка и проведение эксперимента

Изучение процесса зажигания при наличии теплопотерь, как и в [7], проводилось на модельных безгазовых системах — железотитановом и хромово-циркониевом термитах. Состав воспламенителя и поджигаемой системы различался лишь процентом разбавления исходных компонентов конечным продуктом реакции. Данные о выбранных термитных составах приведены в табл. 1. Коэффициенты температуропроводности определялись по методике [8]. Температура горения термитов измерялась в центре образца вольфрам-рениевой термопарой диаметром $5 \cdot 10^{-5}$ м [9]. Значения температур, приведенные в табл. 1, средние из