

УДК 6.62.311

**ВЕДУЩАЯ ЗОНА ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ
С КАТАЛИЗАТОРАМИ***А. П. Денисюк, Л. А. Демидова, В. И. Галкин**Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125190 Москва*

С помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского микрозондового анализатора исследованы структура и состав поверхности горения загашенного при различных давлениях пороха Н с катализаторами (PbO_2 , CuO , PbO_2+CuO). На основании полученных результатов рассчитан коэффициент теплопроводности слоя над поверхностью горения катализированных порохов, значение которого в 1,5–15 раз больше коэффициента теплопроводности газа. Расчет теплового баланса к-фазы пороха Н с добавками показал, что рост скорости горения обусловлен увеличением количества тепла, поступающего в к-фазу из зоны над поверхностью горения. Таким образом, ведущей стадией горения катализированных порохов является зона над поверхностью горения, а не реакционный слой к-фазы, как в случае пороха без катализаторов.

В работах [1–6] установлено, что горение баллиститных порохов — многостадийный процесс. Химические реакции протекают в широком диапазоне температур в нескольких зонах, роль которых в формировании уровня скорости горения различна.

По данным [1–3] скорость горения u порохов (в исследованном интервале давления — от вакуума до ~ 15 МПа) в основном определяется экзотермическими реакциями в конденсированной фазе (к-фаза). В [7] аналогичный вывод сделан и для порохов с катализаторами. Он основан на результатах расчета теплового баланса к-фазы, в котором для определения теплоприхода из дымогазовой (смешанной) зоны используется коэффициент теплопроводности газа λ_r , как и в случае порохов без добавок [3]. В [8–10] отмечается, что увеличение скорости горения порохов катализаторами обусловлено их действием не в к-фазе, как [7], а в зоне над поверхностью горения. Такой же вывод следует из того факта, что катализ горения пороха происходит лишь в том случае, когда на поверхности горения образуется развитый сажистый каркас [11, 12]. Аналогичное явление наблюдается и при горении динитрооксиэтилнитроамина и пикриновой кислоты с катализаторами [13–18].

Указанное выше противоречие относительно ведущей зоны горения катализированных порохов может быть устранено, если предположить, как это сделано в [19], что коэффициент теплопроводности зоны над поверхностью горения пороха с катализатором λ_k , включающей сажистый каркас со значительным количеством катализатора, существенно выше, чем у газа. С учетом этого, по данным [7], должны существенно измениться вклад зоны над поверхностью горения в тепловой баланс к-фазы и вывод о том, что катализаторы увеличивают скорость горения пороха за счет их влияния в к-фазе.

Экспериментально определить значение λ_k не представляется возможным. Однако его можно рассчитать, если установить структуру и состав зоны над поверхностью горения. Поэтому одна из задач настоящей работы состояла в изучении структуры и химического состава зоны над поверхностью горения порохов с катализаторами для расчета λ_k . Другая задача

заклучалась в определении профиля температуры в волне горения этих же образцов для расчета теплового баланса к-фазы.

Исследования проводили на порохе типа Н (57 % нитроцеллюлозы, 28 % нитроглицерина, 12 % динитротолуола, 2 % централита и 1 % вазелинового масла); катализаторы — мелкодисперсные PbO_2 и CuO , которые вводили в порох сверх 100 %. Из рис. 1 видно, что PbO_2 и особенно комбинированный катализатор оказывают сильное влияние на величину u . Их каталитический эффект, оцениваемый величиной $Z = u_k/u_0$, где u_k и u_0 — скорости горения пороха с катализатором и без него, существенно зависит от давления (табл. 1). Это приводит к изменению зависимости скорости горения пороха от давления p . Значение ν в законе горения $u = Vp^\nu$ для пороха с 2 % PbO_2 в некотором интервале p уменьшается до нуля, а для образца с комбинированным катализатором принимает отрицательное значение ($-0,4$). Оксид меди почти не влияет на u .

Для изучения структуры и состава зоны над поверхностью горения порохов (горящих с оттоком газов вниз) образцы гасили на медной подложке: подогретый столбик пороха диаметром ~ 7 и высотой ~ 12 мм прижимался к тщательно отполированной подложке, чем и обеспечивался надежный контакт между ними.

Исследование структуры поверхности горения загашенных образцов и определение состава агломератов на ней проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского микрозондового анализатора (РМА). Наиболее интересным представлялось изучить структуру поверхности горения порохов при давлениях, когда достигается высокий каталитический эффект и когда он незначителен. Рассмотрим результаты этих исследований.

На поверхности горения пороха без катализаторов имеются плотные сажистые образования, между которыми просматриваются участки гладкой поверхности с лунками диаметром 5–25 мкм (рис. 2). Как показал РМА, каркас на поверхности горения пороха состоит в основном из углерода (93–98 % по объему). Высота и количество образований уменьшается с ростом давления. При $p = 3$ и 7 МПа высота образований составляет ~ 30 и ~ 10 мкм соответственно. Этот эффект можно объяснить увеличением скорости взаимодействия и усилением динамического напора оттекающих с поверхности газов.

Таблица 1

Катализатор	p , МПа	u , мм/с	Z	D , мкм	$N \cdot 10^{-3}$, см ⁻²	$\beta_m, \%$		α , %	$P \cdot 10^3$, мт/см ²	h , мкм	m
						Pb	Cu				
1 % PbO_2	3,0	4,3	1,7	0,1–80	180	$67 \pm 0,4$	—	11,8	227	1620	18
	7,0	8,1	1,1	0,1–40	96	$67 \pm 0,4$	—	2,8	38	271	6
2 % PbO_2	1,5	2,8	3,0	0,1–70	2600	$67 \pm 0,4$	—	36,0	530	1893	25
	6,0	7,2	1,3	0,1–20	1000	$67 \pm 0,4$	—	5,5	30	107	5
0,5 % PbO_2 + + 1 % CuO	4,0	5,7	2,3	0,1–75	2900	$11,0 \pm 0,2$	$29,0 \pm 0,3$	16,3	126	666	7
	7,0	8,1	2,7	0,1–40	9300	$11,0 \pm 0,2$	$29,0 \pm 0,3$	27,0	141	746	13
	19,0	9,4	2,2	0,1–30	1300	$11,0 \pm 0,2$	$29,0 \pm 0,3$	15,7	65	343	9
	13,5	11,3	1,2	0,1–20	400	$11,0 \pm 0,2$	$29,0 \pm 0,3$	3,5	11	60	2

Структура поверхности пороха с 2 % PbO_2 , загашенного при $p = 1,5$ и 6 МПа, представлена на рис. 3, а, б. Видно, что при $p = 1,5$ МПа ($Z = 3,0$) поверхность образца обильно покрыта разветвленным сажистым каркасом, на котором расположено большое количество агломератов. Высота каркаса достигает ~ 70 мкм, диаметр агломератов 0,1–67 мкм. По сравнению с образцом без катализаторов количество сажи на поверхности значительно увеличилось. Агломераты располагаются в основном группами.

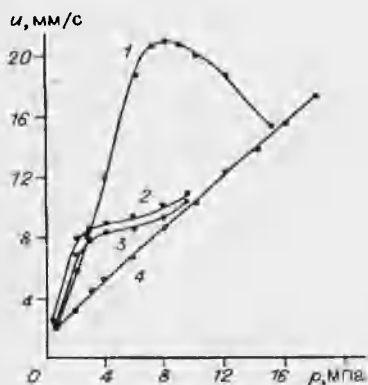


Рис. 1. Влияние катализаторов на скорость горения пороха II:
1 — 0,5 % $\text{PbO}_2 + 1,0$ % CuO ; 2 — 2 % PbO_2 ;
3 — 1 % PbO_2 ; 4 — без катализатора.



Рис. 2. Структура поверхности горения пороха II при $p = 1,5$ МПа.

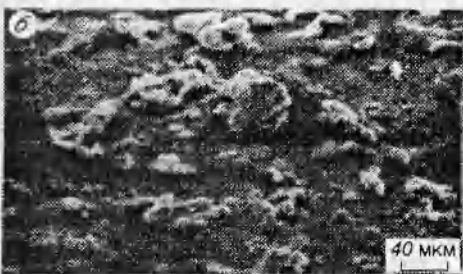


Рис. 3. Структура поверхности горения пороха II+2 % PbO_2 при $p = 1,5$ (а) и 6 МПа (б, в).

В случае $p = 6$ МПа ($Z = 1,3$) структура поверхности существенно изменилась: на гладкой поверхности очень редко наблюдаются плотные сажистые образования высотой до 15 мкм и группы агломератов диаметром до 20 мкм.

Структура поверхности горения пороха с 2 % CuO исследована при

$p = 1,5$ МПа ($Z = 1,2$). Установлено, что введение в порох CuO значительно уменьшает количество сажи на поверхности горения. Невысокие (до 20 мкм) сажистые образования лишь незначительно покрывают гладкую поверхность образца. Редко наблюдаются отдельные агломераты диаметром до ~ 45 мкм.

Электронно-микроскопические исследования структуры поверхности горения пороха с 0,5 % $\text{PbO}_2 + 1$ % CuO , загашенного при различных давлениях, показали, что при $p = 7,0$ МПа, когда достигается наибольший каталитический эффект ($Z = 2,7$), на поверхности горения наблюдается наибольшее количество сажи и агломератов. При $p = 4,0$ МПа ($Z = 2,3$) и $p = 9$ МПа ($Z = 2,2$) поверхность образцов приблизительно в равной степени покрыта сажистыми образованиями и агломератами, такими же по форме, как и для образца с CuO . С увеличением давления до 13,5 МПа, когда $Z = 1,2$, количество сажи на поверхности сильно уменьшается и очень редко встречаются отдельные агломераты.

Таким образом, из анализа полученных результатов следует, что значительный каталитический эффект возникает лишь в случае, когда на поверхности горения образуется разветвленный сажистый каркас, на котором удерживается большое количество агломератов. Чем больше размер агломератов и их количество, тем выше Z . Отметим, что PbO_2 способствует появлению сажи на поверхности горения, как это отмечалось в [5], а CuO , наоборот, способствует ее исчезновению.

Далее определены размеры и количество агломератов на загашенной поверхности исследуемых образцов. Этот подсчет проводили на 2–3 параллельно загашенных образцах площадью 5 см². Диаметр агломератов измерялся на каждом образце на 5–10 участках площадью $(1,8 \div 118) \cdot 10^{-4}$ см². Для определения содержания катализатора в агломератах с помощью РМА на каждом участке анализировали 8–12 агломератов различного диаметра.

Полученные экспериментальные данные и результаты расчетов, отнесенные к 1 см² загашенной поверхности, сведены в табл. 1, где D — диаметр агломератов, N — число агломератов, α — степень покрытия агломератами поверхности горения, β — объемное содержание металла в агломератах, P — масса катализатора на 1 см² загашенной поверхности, h — высота порохового образца, после сгорания которого накопилось количество катализатора, равное P , m — степень накопления катализатора в поверхностном слое пороха.

Отметим основные результаты экспериментальных данных и проведенных расчетов.

1. На поверхности горения всех катализированных порохов отмечено наличие агломератов размером от десятых долей до нескольких десятков микрон. Чаще всего агломераты имеют шарообразную форму и расположены отдельно или группами.

2. В агломератах содержатся только восстановленные до металлического состояния свинец или медь. Объемная доля частиц металла составляет 11–67 %, а остальное — углерод. Полученные данные согласуются с [20–22]. В [22] сделано предположение, что восстановление катализатора при горении может частично происходить уже в k -фазе пороха, но участие кислорода катализатора в реакциях в k -фазе и на ее поверхности не может привести к заметному увеличению скорости горения пороха.

3. Частицы катализаторов расположены в агломератах хаотично, их размер соответствует исходному размеру частиц катализаторов. Частицы не сливаются даже в условиях $Z = 1$. Данное заключение принципиально отличается от вывода, сделанного в [8], где предполагается, что если сажистый каркас на поверхности горения не образуется, то частицы катализа-

тора сливаются, что приводит к резкому уменьшению каталитической поверхности и исчезновению каталитического эффекта. Однако такое предположение неточно, так как оно сделано только на основании результатов электронно-микроскопических исследований структуры поверхности горения образца пороха с PbO без анализа состава и структуры полученных агломератов.

Более детальный анализ поверхности горения пороха (50 % НЦ и 50 % НГЦ) с PbO и сажей показал, что на его поверхности в случае $Z > 1,0$ крупные агломераты размером до нескольких десятков микрон состоят из частиц Pb, соответствующих по размеру исходным частицам катализатора, разделенных между собой сажистыми перегородками.

4. Состав и структура агломератов постоянны для каждого катализированного пороха, не зависят от размера агломерата и давления, при котором происходит горение. Можно полагать, что формирование агломератов, вероятно, связано с неравномерным распределением частиц катализатора в исходном порохе.

5. Значительный каталитический эффект наблюдается лишь в том случае, если на поверхности горения имеется большое количество агломератов. Если они встречаются редко, каталитический эффект незначителен. Существует прямая зависимость между эффективностью действия катализаторов (PbO₂, PbO₂+CuO) и степенью покрытия агломератами поверхности горения. Чем больше α , тем больше величина Z .

Эти выводы согласуются с результатами работ [13–18], где впервые показано формирование агломератов при горении дины и пикриновой кислоты при атмосферном давлении. (Заметим, что эти исследования проведены в условиях, не соответствующих стационарному горению, которые способствовали накоплению катализаторов в поверхностном слое при зажигании образцов [23].) Появление светящихся очагов на поверхности горения порохов при $Z > 1$ отмечалось и в [8].

6. Большое количество агломератов образуется лишь при наличии сажистого каркаса. Отсюда следует, что главная его роль в катализе заключается в накоплении и удержании агломератов на поверхности горения.

Агломераты могут удержаться на сажистых образованиях лишь в случае, если сила адгезии больше силы оттока газа от поверхности горения. Из расчета [24] следует, что для удержания агломератов диаметром 40 мкм, состоящих в основном из Al и Mg, достаточно ножки из смолообразных продуктов полураспада пороха радиусом $\geq 10^{-2}$ мкм. Анализ структуры сажистых образований, удерживающих агломераты, показал, что их диаметр значительно превосходит эту величину.

Итак, проведенные исследования показали, что во всех без исключения случаях, когда наблюдается значительный каталитический эффект ($Z > 1,5$), на поверхности горения порохов имеется разветвленный сажистый каркас, удерживающий большое количество агломератов, состоящих из частиц восстановленных до металла катализаторов, разделенных между собой сажистыми перегородками. Таким образом, при горении катализированных порохов над поверхностью горения формируется особая зона, протяженностью до нескольких десятков микрон, состоящая из агломератов, скрепленных между собой сажистыми образованиями.

Возникает вопрос, каким образом формируется такая структура. Уже высказывалось предположение о том, что формирование агломератов может происходить из-за неравномерной концентрации частиц катализатора в порохе. Поэтому исследовано распределение частиц катализаторов в зоне под поверхностью горения загашенных образцов и в исходных порохах с помощью РМА. Объем области изменялся от 0,1 до 10^6 мкм³.

Установлено, что катализаторы в зоне под поверхностью горения не восстанавливаются, все добавки в прогретом слое, также как и в исходном образце, содержатся в виде оксидов металлов. При этом имеются области, обедненные катализатором и с повышенной его концентрацией. Это свидетельствует о неравномерном распределении частиц катализаторов в исходных порохах. Можно полагать, что это и приводит к формированию сложной надповерхностной структуры: области скопления частиц катализаторов (агломераты) выходят на поверхность горения и удерживаются на ней сажистыми образованиями.

Из-за газодинамического взаимодействия периодически локально сбрасывается сажистый каркас. Одновременно с этим на других участках поверхности происходит рост сажистых образований. Поэтому после выхода горения на стационарный режим структура поверхности горения практически не меняется. Можно полагать, что после воспламенения пороха некоторое время идет формирование сажистого каркаса, высота которого затем остается в среднем постоянной по всей поверхности горения.

Поскольку на сажистом каркасе в агломератах содержится большое количество металла, ожидается, что коэффициент λ_k будет превышать коэффициент теплопроводности газа ($\lambda_r = 8,38 \cdot 10^{-4}$ Дж/(см · с · К)), который используется при расчете теплового баланса к-фазы порохов без добавок и с катализаторами. Для последних это неправильно.

Коэффициент теплопроводности слоя над поверхностью горения катализированных порохов, т. е. системы газ — сажистый каркас — агломераты с частицами металла, можно определить расчетным путем в три этапа по формулам, предложенным в [25].

Коэффициент теплопроводности агломератов $\lambda_{агл}$ рассчитывался по формуле для структуры с замкнутыми включениями

$$\lambda_{агл} = \left(1 - \frac{1 - \beta_m}{\frac{1}{1 - \lambda_c/\lambda_m} - \frac{\beta}{3}} \right) \lambda_m,$$

где $\lambda_c = 23,4 \cdot 10^{-4}$ Дж/(см · с · К) — коэффициент теплопроводности углерода при $T = 1073$ К [26]; λ_m — коэффициент теплопроводности свинца или меди при $T = 1073$ К; $\lambda_{Pb} = 0,18$ Дж/(см · с · К); $\lambda_{Cu} = 3,56$ Дж/(см · с · К); β_m — объемная доля металла в агломератах (см. табл. 1).

По данным [8], температура «горячих» очагов на поверхности горения пороха со свинцово-медными катализаторами составляет 1073 К. Поэтому коэффициенты теплопроводности принимались при этой температуре. Коэффициент теплопроводности системы газ — сажистый каркас рассчитывался по формуле для структуры со взаимопроникающими элементами с учетом искривлений линий тока

$$\lambda_{r-c} = \left\{ \left[\frac{1-C}{C^2} + \frac{\Phi}{C} \right]^{-1} + \frac{\lambda_r}{\lambda_c} (1-C)^2 + \frac{2C(1-C) \cdot \lambda_r/\lambda_c}{1 + \frac{\lambda_r}{\lambda_c} - C} \right\} \cdot \lambda_c,$$

$$\frac{\Phi - \Phi_1}{1 - \Phi_1} = \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_c} \right)^2 \left[7,5 - 11 \frac{\lambda_r}{\lambda_c} + 4,5 \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_c} \right)^2 \right],$$

$$\Phi_1 = \left(\frac{C}{2-C} \right)^{0,5},$$

где C — относительный размер сажистого каркаса; $\beta_c = 2C^3 - 3C^2 + 1$ — объемная доля сажи. Значение λ_c принималось также при $T = 1073$ К [8].

Коэффициент теплопроводности системы газ — сажистый каркас — агломераты с катализатором определялся по формуле для структуры с

замкнутыми включениями

$$\lambda_k = \left(1 - \frac{1 - \beta_{\text{агл}}}{\frac{1}{1 - \lambda_{\text{г.с}}/\lambda_{\text{агл}}} - \frac{\beta_{\text{агл}}}{3}} \right) \lambda_{\text{агл}},$$

где $\beta_{\text{агл}}$ — объемная доля агломератов в приповерхностном слое, которая определялась по данным электронно-микроскопических исследований.

Установлено, что в зависимости от состава зоны значение λ_k в 1,5–15 раз превосходит коэффициент теплопроводности газа (табл. 2).

С использованием значений λ_k рассчитан тепловой баланс к-фазы

$$c_p(T_{\text{п}} - T_0) = q_k + \frac{\lambda}{\rho u} \cdot \frac{dT}{dx},$$

где $c_p = 1,47$ Дж/(г · К) — теплоемкость к-фазы пороха; $T_{\text{п}}$ — температура поверхности горения, К; T_0 — начальная температура пороха, К; $Q = c_p(T_{\text{п}} - T_0)$ — необходимое количество тепла для распространения горения; q — количество тепла, выделяющегося в к-фазе пороха, Дж/г; $q_{\lambda} = \frac{\lambda}{\rho u} \cdot \frac{dT}{dx}$ — количество тепла, поступающего в к-фазу теплопроводностью из зоны над поверхностью горения, Дж/г; $\rho = 1,6$ г/см³ — плотность пороха; u — скорость горения, см/с; $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры над поверхностью горения, К/см (для катализированных порохов $\frac{dT}{dx}$ в 1,5–2 раза выше, чем для пороха без добавок).

Таблица 2

Катализатор	p , МПа	Z	$\lambda_k \cdot 10^4$, Дж/(см·с·К)	$T_{\text{п}}$, К	$\frac{dT}{dx} \cdot 10^4$, К/см	ϵ , %
—	2–10	1,0	8,4	640–720	6–10	10–17
1 % PbO ₂	3,0	1,7	26	643	10,0	40
	7,0	1,1	12	693	13,0	19
2 % PbO ₂	1,5	3,0	51	600	8,5	75
	6,0	1,3	14	678	14,0	22
0,5 % PbO ₂ + + 1,0 % CuO	4,0	2,3	106	653	8,5	89
	7,0	2,7	131	688	14,0	94
	9,0	2,2	107	704	15,0	81
	13,5	1,2	50	747	17,0	48

Отношение величин q_{λ}/Q характеризует долю тепла ϵ , поступающего в к-фазу из зоны, над поверхностью. Для пороха без катализаторов $\epsilon = 10 \div 15$ % при $p = 3 \div 14$ МПа. Из табл. 2 видно, что если катализаторы увеличивают скорость горения пороха, то величина ϵ значительно больше, чем для пороха без добавок. При этом чем больше ϵ , тем выше Z .

Таким образом, увеличение скорости горения пороха катализаторами обусловлен ростом количества тепла, поступающего в к-фазу из зоны над поверхностью горения, которая при $Z > 1,5$ играет ведущую роль в распространении горения.

Влияние катализаторов в к-фазе, по-видимому, также проявляется. Об этом свидетельствуют экспериментальные факты по влиянию катализаторов на развитие вспышки нитроцеллюлозы [27]. Однако, ввиду малой (десятые доли процента) объемной доли катализаторов в реакционном

слое к-фазы, их действие только в этой зоне при горении не может привести к заметному увеличению скорости.

Полученные результаты позволяют объяснить сложную зависимость $u(p)$ для катализированных образцов, например образование участка плато. В начале этого участка (см. рис. 1), когда величина Z максимальна для данного образца, поверхность горения покрыта хорошо разветвленным сажистым каркасом с большим количеством агломератов. С повышением давления сажистых образований на поверхности горения становится меньше и они способны удержать лишь незначительное количество агломератов, что приводит к снижению величины Z .

Эти результаты объясняют и зависимость Z от количества катализатора, имеющую «насыщающийся» характер. С увеличением количества вводимого катализатора растет число агломератов на поверхности горения, поэтому величина Z возрастает. Но такое может происходить только до некоторого значения Z , так как сажистый каркас, образующийся на поверхности горения пороха, способен удержать только определенное количество агломератов. Дальнейшее повышение содержания катализатора в порохе не будет приводить к увеличению степени покрытия агломератами поверхности горения, поэтому Z остается постоянной. Если рост скорости горения пороха происходил за счет действия катализаторов в к-фазе, то упомянутое выше «насыщение» наблюдалось бы при гораздо большем содержании добавки.

Таким образом, ведущая стадия горения катализированных порохов при $Z > 1,5$ — это зона над поверхностью горения пороха, а не реакционный слой в к-фазе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф. О механизме горения бездымных порохов // Физика взрыва / АН СССР. Ин-т хим. физики. 1953. Сб. 2. С. 181–212.
2. Жуков Б. П. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИХТИ, 1951.
3. Зенин А. А. Дис. ... канд. техн. наук. М.: ИХФ АН СССР. 1970.
4. Зельдович Я. Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // Журн. эксперим. и теор. физики. 1942. Т. 12. Вып. 11–12. С. 498–524.
5. Grawford V. L., Huggett C., Brady J. J. The mechanism of the burming of double-based propellants // J. Phys. and Colloid. Chem. 1950. V. 54, N 6. P. 854.
6. Combustion Processes / Ed. by V. Lewis, R. N. Pease, H. S. Taylor. Princeton, 1956.
7. Денисюк А. П., Фогельзанг А. Е. Температурные профили при горении баллиститного пороха с аномальной зависимостью скорости горения от давления / Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. 1971. Т. 14. № 6. С. 861–863.
8. Hewkin D. J., Hicks J. A., Powling J., Watts S. H. The combustion of nitric ester-based propellants: ballistic modification by lead compounds. // Combust. Sci. Technol. 1971. V. 2, N 5–6. P. 307–327.
9. Сингх, Рао . Образование платообразного участка на графике зависимости скорости горения от давления в случае баллиститных порохов // Ракет. техника и космонавтика: Пер. AIAA Journal. Т. 15, № 11. С. 12–17.
10. Кубота, Олемиллер, Кавени, Саммерфилд. Место и механизм действия каталитических добавок, приводящих к образованию плато в случае двухосновных твердых топлив // Ракетн. техника и космонавтика: Пер. AIAA Journal. 1974. Т. 12, № 12. С. 118–121.
11. Денисюк А. П., Марголин А. Д., Токарев Н. П. и др. Роль сажи при горении баллистичных порохов со свинецсодержащими катализаторами // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 4. С. 576–584.
12. Марголин А. Д., Крупкин В. Г., Хубаев В. Г. и др. Закономерности горения баллиститных составов при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 6. С. 29–35.

13. Александров В. В., Тухтаев Р. К., Болдырева А. В., Болдырев В. В. О горении дины при атмосферном давлении и действии некоторых добавок // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 543-546.
14. Александров В. В., Тухтаев Р. К., Болдырев В. В. О горении дины с добавками соединений хрома // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 6. С. 951-955.
15. Тухтаев Р. К., Александров В. В., Болдырев В. В. Образование раскаленных тел на поверхности и увеличение скорости горения конденсированных систем добавками соединений хрома // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 2. С. 278-281.
16. Aleksandrov V. V., Tukhtaev R. K., Boldyrev V. V., Boldyreva A. V. Mechanism of catalytic additive effects on diethylnitramine dinitrate combustion rates // Combust. and Flame. 1979. V. 35, N 1. P. 1-15.
17. Тухтаев Р. К. Исследование механизма действия каталитических добавок на скорость горения взрывчатых веществ и порохов / Дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск: ИХКиГ СО АН СССР, 1976.
18. Александров В. В., Болдырева А. В., Болдырев В. В., Тухтаев Р. К. Механизм действия некоторых добавок на скорость горения дины // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210, № 1. С. 161-163.
19. Денисюк А. Р., Архипов А. Г., Калашников И. В., Пашкова О. В. Зависимость скорости горения от температуры поверхности для различных составов на основе нитроцеллюлозы // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 26-29.
20. Preckel R. F. Plateau ballistics in nitrocellulose propellants // AIAA Journal. 1965. V. 3, N 2. P. 346-347.
21. Кочаков В. Д. Дис... канд. физ.-мат. наук. Казань, 1982.
22. Андросов А. С., Денисюк А. П., Токарев Н. П. О некоторых закономерностях влияния свинцово-медных катализаторов на скорость горения баллистического пороха // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 5. С. 780-782.
23. Денисюк А. П., Хубаев В. Г., Шепелев Ю. Г. К вопросу о влиянии катализаторов на горение дины // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 1. С. 138-139.
24. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
25. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
26. Мармер З. Н. Углеродистые материалы. М.: Metallurgy, 1973.
27. Андросов А. С., Демидова Л. А., Денисюк А. П., Токарев Н. П. Изучение влияния катализаторов на вспышку ВВ для исследования их действия при горении // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 2. С. 197-202.

*Поступила в редакцию 8/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 3/X 1994 г.*