

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОРОХОВЫМИ ГАЗАМИ

А. П. Денисюк, Ю. Г. Шепелев

(Москва)

Углеродные материалы (УМ) находят применение во многих порох. Это — сажа различных марок как компонент комбинированных катализаторов горения [1], графит для покрытия поверхности зерен пироксилиновых порохов [2], углеродное волокно, используемое в качестве теплопроводящего элемента [3]. От полноты сгорания входящих в порох УМ зависят энергетика и температура его горения, а также наличие твердой фазы в продуктах горения, приводящее к снижению их прозрачности [4]. Таким образом, вопрос о горении углеродных материалов в составе порохов важен с различных точек зрения, но до настоящего времени он оставался практически не исследованным. В данной работе изучено взаимодействие различных УМ с газами в волне горения порохов.

Экспериментальная часть

Исследования проводили на порохе А и Н, которые имеют различные теплоту взрывчатого превращения $Q_{ж}$ и кислородный баланс. Так, коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,72$ и $0,55$ соответственно, и расчет дает $Q_{ж} = 5187$ и 3846 кДж/кг. Порох А содержит по 49 % нитроцеллюлозы и нитроглицерина и по 1 % централита и вазелинового масла. В порохе вводили сажу различной дисперсности: ПМ-15 ($s_{уд} = 15$ м²/г) и КГО-250 ($s_{уд} = 250$ м²/г), а также графитированное углеродное волокно диаметром 6 мкм (длина волокна в готовом порохе составляла ~100 мкм) от 1 до 17%. Эти материалы содержат от 95 до 99,9 % углерода. Для сравнения проводили опыты с негорючей добавкой — диоксидом кремния.

О полноте горения УМ в пороховых газах судили по температуре горения, а сажи КГО-250 — также и по содержанию твердой фазы в продуктах. Для исследований применяли образцы пороха диаметром $d = 7$ мм, запрессованные в трубки из поликарбоната, что обеспечивало их горение с торца. Испытания проводили при давлении $p = 10$ МПа. В этих условиях достигается полнота горения порохов А и Н, поскольку при $p > 6$ МПа максимальная температура их пламени не зависит от давления [5]. Величина $d = 7$ мм превышает предельное значение $d_{пр}$, выше которого температура горения T_r не зависит от d [5], например для пороха Н $d_{пр} = 5,8$ мм при $p = 5,5$ МПа. Температуру горения определяли в бомбе постоянного давления объемом $V = 2000$ см³ микротермопарами, при этом проводили 3—5 опытов для каждого состава пороха и вычисляли среднее значение. Погрешность измерения температуры составляла 2,5 %.

Количество твердой фазы находили путем сбора твердого остатка после сжигания образца в бомбе. Для этой цели применяли бомбу из нержавеющей стали с $V = 300$ см³ со специальным кварцевым вкладышем для сбора остатка. Во избежание уноса частиц с газом выпуск его из бомбы, как показали специальные опыты, необходимо проводить медленно (не менее 30 мин).

Величину T_r определяли ленточными П-образными вольфрам-ренийевыми термопарами по методике [6], причем термопары в образце заделывали без клея (половинки шашки соединяли в трубочинах при нагревании). Минимальная толщина термопар, которая практически может быть использована для измерения профиля температуры, составляет

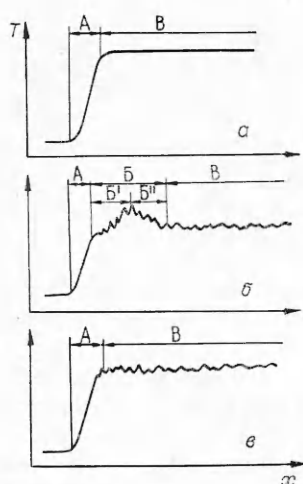


Рис. 1. Типичные осциллограммы записи температуры в волне горения порохов А и Н без добавок (а), с добавками УМ (б) и с добавками диоксида кремния (в).

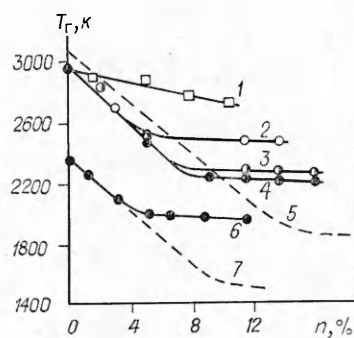


Рис. 2. Зависимость температуры горения порохов А (1—5) и Н (6, 7) от содержания введенных добавок. 1 — диоксид кремния; 2 — сажа ПМ-15; 3 — сажа КГО-250; 4, 6 — углеродное волокно; 5, 7 — углерод (расчет).

~5 мкм [6]. При такой толщине термопары определение полного профиля температуры с достаточной точностью возможно, когда скорость горения образца меньше 10 мм/с.

При $p = 10$ МПа скорость горения порохов Н и А $u = 10,8$ и 18 мм/с. Таким образом, получить истинное распределение температуры в волне горения пороха А при указанном давлении вообще не представляется возможным. Поэтому для определения только максимальной температуры горения применяли более удобные в обращении термопары толщиной 15 мкм. Однако запись профиля температуры даже такими термопарами позволила выяснить на осциллограммах ряд особенностей горения образцов, содержащих УМ и диоксид кремния.

Типичные осциллограммы записи температуры в волне горения показаны на рис. 1. Видно, что при введении в порошок сажи или диоксида кремния наблюдаются значительные пульсации температуры, амплитуда которых растет при увеличении содержания твердого остатка в продуктах горения. Если порошок не дает твердого остатка, то нет колебаний температуры. Можно предположить, что пульсации связаны с низкой жесткостью и устойчивостью термопары в газовом потоке либо с эндотермическими реакциями частиц углерода с CO_2 и H_2O на термопаре или с налипанием на термопару твердых частиц, снижающих ее теплопотери, и последующим сбросом образовавшейся корки газовым потоком. Последнее представляется наиболее убедительным, поскольку пульсации не отмечаются при горении пороха без добавок и имеются в случае горения пороха с добавкой диоксида кремния, не реагирующего с пороховыми газами.

При введении в порошок углеродного материала на осциллограммах (см. рис. 1, б) появляется участок В продолжительностью 50—100 мс, которому предшествует участок А с градиентом температуры как у исходного пороха (для пороха А, например, он равен в среднем около 6 К/мм), а за ним следует участок В постоянной температуры T_g . Зона В делится на две части: В' — температура растет, но градиент температуры в 6—15 раз ниже, чем на участке А, и В'' — температура падает. (Форма профиля температуры на участке В в случае пороха Н менее ярко выражена, чем при горении пороха А.)

При сравнении экспериментального и расчетного значений T_g порохов без добавок обнаруживается их значительное расхождение, обусловленное тепловыми потерями излучением $\Delta T_{\text{из}}$ [6], что подтверждается соответствующими расчетами. В дальнейшем при обсуждении результа-

Т а б л и ц а 1

Порох	Углеродное волокно, (УВ), %	T_r , К		ΔT_n , К
		Расчет	Эксперимент	
А	0	3063	2399	575
	4,8	2696	2149	355
	9,1	2297	1996	254
Н	0	2362	2068	300
	1,0	2278	2013	265
	2,9	2117	1893	199
	4,8	1957	1824	166

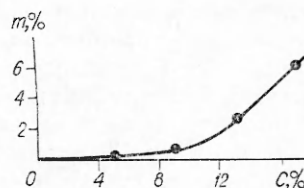
тов использовали опытные значения T_r с поправкой на ΔT_n , которую вычисляли по методике и с использованием некоторых данных из работы [6]. Для пороха Н температура горения с учетом поправки на излучение хорошо совпадает с расчетной, а для пороха А она несколько ниже, чем по термодинамическому расчету (табл. 1). Последнее, по-видимому, связано как с неточностью экстраполяции данных [6] в рассматриваемых условиях (толщина термопар, температура), так и с наличием в образце влаги до 1 %.

Рассмотрим влияние различных добавок на температуру горения порохов (рис. 2) и сравним их с расчетными значениями. Термодинамически максимально возможное количество УМ, реагирующего с пороховыми газами, зависит от состава пороха, в частности от α . Для порохов Н и А оно составляет 10 и 17 %. Снижение значения T_r при введении УМ до указанного предельного количества связано как с разбавлением пороха, так и с эндотермическим взаимодействием их в волне горения. При дальнейшем увеличении n температура снижается только за счет разбавления системы и затрат тепла на фазовые переходы. Поэтому на расчетных кривых $T_r(n)$ имеется точка излома. Местоположение (по концентрации УМ) точек излома экспериментальных и расчетных кривых значительно отличается. И это отличие зависит от состава пороха и типа УМ.

Для пороха Н расчетные и экспериментальные данные по T_r совпадают до содержания углеродного волокна, равного 4—5 %, т. е. в волне горения успевает сгорать около 50 % термодинамически возможного углеродного материала. Это хорошо согласуется с данными по количеству твердого остатка в продуктах горения. Ощутимые его количества появляются при содержании в порохе более 4,5 % УВ. Так, для образцов с 5,9 и 13 % волокна величина твердой фазы составляет 0,6, 4,4 и 8,5 % соответственно.

Для пороха А расположение точки излома зависит от типа УМ. В этом случае экспериментальная зависимость $T_r(n)$ близка к расчетной. Для высокодисперсной сажи КГО-250 излом наблюдается при 8—9 %-ном ее содержании в порохе. Аналогичный результат получен при определении твердого остатка (рис. 3). Углеродное волокно, имея относительно низкую внешнюю удельную поверхность ($s_{уд} = 0,35 \text{ м}^2/\text{г}$), тем не менее ведет себя так же, как и сажа КГО-250 с $s_{уд} = 250 \text{ м}^2/\text{г}$. Это, вероятно, можно объяснить участием в процессе значительной (около $200 \text{ м}^2/\text{г}$) поверхности пор углеродного волокна [7]. Таким образом,

Рис. 3. Зависимость количества твердой фазы m в продуктах горения пороха А от содержания введенной в него сажи КГО-250.



в волне горения пороха А сгорает 8—9 % указанных высокодисперсных УМ, что составляет примерно 50 % от термодинамически возможного количества. Низкодисперсная сажа ПМ-15 сгорает в меньшем количестве — излом на кривой наблюдается при 5 %.

При введении сажи в пороха А и Н в количестве, превышающем пороговое, твердый остаток растет пропорционально дополнительно введенной саже.

Точка излома на кривых $T_r(n)$ делит их на два участка: на первом уменьшение T_r составляет 85 К/%, а на втором — 6—15 К/%. Последняя величина ниже, чем для диоксида кремния, который снижает T_r на 27 К/%. Он, по-видимому, успевает расплавиться ($T_{пл} = 1986$ К), приводя к дополнительному снижению температуры, в то время как углеродный материал не имеет фазовых переходов вплоть до температуры сублимации $T_c = 3800 \div 3900$ К.

Таким образом, из экспериментальных данных по температуре горения и наличию твердого остатка в продуктах следует, что в зависимости от удельной поверхности материала в волне горения реагирует 30—50 % термодинамически возможного количества УМ. Вероятно, причиной этого являются кинетические препятствия.

Обсуждение результатов

Рассмотрим, в какой зоне и за счет каких реакций происходит горение углеродного материала. Для этого разберем детально характер осциллограмм (см. рис. 1, б) записи температуры в волне горения порохов, содержащих УМ.

Если предположить, что взаимодействие УМ с продуктами сгорания пороха протекает с заметной скоростью начиная уже от поверхности горения, то температурный профиль должен быть аналогичен профилю для пороха без добавки, но с более низким градиентом температуры, меньшим значением T_r и без участка падения температуры B'' . В действительности наблюдается своеобразная форма температурного профиля с характерным участком B , начинающимся при $T = 1200—1500$ К и состоящим из частей B' и B'' . Падение температуры в зоне B'' может быть обусловлено протеканием только эндотермических реакций взаимодействия углерода с CO_2 и H_2O :



Равновесие этих реакций при атмосферном давлении сдвинуто в сторону образования CO практически целиком при $T > 1500$ К (для реакции $C + CO_2$ степень превращения углерода составляет 99,9 % [8]). Повышение давления приводит к противоположному сдвигу равновесия, однако в случае реакции $C + CO_2$ с $p = 10$ МПа и $T = 1500$ К отношение CO/CO_2 остается значительным (~ 10). При горении пороха развивается температура до 2000—3000 К. Как следует из оценочного расчета, проведенного на основании данных [9], в этих условиях даже для $p = 300$ МПа $CO/CO_2 \approx 10$.

Эндотермические реакции протекают и в зоне B' , для которой температурный интервал составляет 200—500 К (в зависимости от типа и количества УМ, а также типа пороха). Это следует из того, что максимальная температура в области B' ниже T_r с учетом разбавления системы. Кроме того, температурный интервал участка B'' , равный 70—200 К, перекрывается интервалом области B' , что также свидетельствует о протекании указанных реакций.

На отрезке A , предшествующем на осциллограммах участку B , величина градиента температуры (6 К/мкм) такая же, как и у пороха без добавок, т. е. в этой зоне эндотермические реакции с заметной скоростью не идут. Температура верхней границы зоны A составляет 1200—1500 К, т. е. отвечает максимальной температуре дымогазовой

зоны [10], в которой протекают реакции взаимодействия NO_2 с продуктами разложения пороха. На участке B температура остается постоянной вплоть до окончания горения образца (время пребывания частиц в этой зоне составляло 7—10 мс, что в 10—20 раз больше, чем в зоне B). Это означает практическое отсутствие эндотермических реакций, несмотря на то, что в области B в продуктах горения еще присутствуют CO_2 и H_2O . Однако пониженная их концентрация (ввиду того, что часть CO_2 и H_2O прореагировала в зоне B) при относительно низкой температуре приводит к резкому снижению скорости их взаимодействия с УМ.

Температурный интервал участка B (200—500 К) достаточно узок по сравнению со средним уровнем температуры в ней (порядка 2000 К). Это говорит о том, что основная реакция, протекающая там, имеет высокую энергию активации. По закону Аррениуса константа скорости реакции падает в 10 раз в температурном интервале $\Delta T = 2,3 RT^2/E$. Реакция $\text{C} + \text{CO}_2$ имеет высокую энергию активации (356 кДж/моль), и в данном случае ее скорость падает на порядок в интервале 215 К, а в интервале 500 К — более чем в 200 раз, что подтверждает возможность протекания именно этой реакции в указанной зоне.

Таким образом, участок B , в котором протекают реакции $\text{C} + \text{CO}_2$ и $\text{C} + \text{H}_2\text{O}$, находится в температурном интервале 200—500 К (что соответствует части B' , температурный интервал которой перекрывает всю зону B).

Теперь оценим время, необходимое для полного взаимодействия частиц углерода с CO_2 и H_2O , и сопоставим его со временем пребывания этих частиц в продуктах сгорания пороха. Рассмотрим поведем на примере реакции $\text{C} + \text{CO}_2$, в первом приближении принимая, что скорости взаимодействия углерода с CO_2 и H_2O близки.

Удельная скорость взаимодействия K_s углеродной частицы с газами определяется формулами [11]

$$K_s = \frac{\beta c_0}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{1}{\alpha}}, \quad \alpha = K \left(1 + \frac{S_i}{S_a} \right),$$

$$K = K_0 \exp(-E/RT), \quad \alpha_d = \frac{\text{Nu}_d D}{d_c},$$

$$\text{Nu}_d = \frac{0,7 \sqrt{\text{Re}}}{1 - \exp(-0,35 \sqrt{\text{Re}})},$$

где c_0 — концентрация окисляющего газа в потоке; β — стехиометрический фактор (для реакции $2\text{C} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3\text{CO} + \text{H}_2$ рассчитывался как соотношение $2 \cdot 12 : (44 + 18) = 0,387$ кг углерода на 1 кг окислителя); α_d — константа переноса вещества в газовой фазе; Nu_d — диффузный аналог критерия Нуссельта; D — коэффициент диффузии реагента в газовой фазе; d_c — определяющий размер частицы; Re — критерий Рейнольдса; α — коэффициент реакционного газообмена — аналог константы скорости химической реакции для пористого тела, характеризующий интенсивность обменных процессов на границе раздела фаз; K — константа скорости реакции; K_0 , E — предэкспонент и энергия активации; S_i — внутренняя поверхность на единицу объема частицы (поверхность пор); S_a — общая поверхность частицы (внутренняя и внешняя). Для реакции $\text{C} + \text{CO}_2$ $K_0 = 1,6 \cdot 10^9$ см/с, $E = 356$ кДж/моль [12].

В условиях $p = 10$ МПа, $T = 2000$ К, $d_c = 0,012 \div 6$ мкм, скорость газового потока 1—2 м/с, $S_i = 200$ м²/г (для углеродного волокна) расчет приводит к следующим значениям параметров: $K = 0,95$ см/с, $\alpha = 1 \div 556$ см/с, $D = 1,1$ см²/г, $\text{Re} = 0,023 \div 2,3$, $\text{Nu}_d = 2,0 \div 2,6$, $\alpha_d = (5-2000) \cdot 10^3$ см/с. Таким образом, вследствие малых размеров частиц сажи и углеродного волокна наблюдается соотношение $\alpha \ll \alpha_d$, что означает протекание процесса в квазикинетическом режиме, когда диффузия в газовой фазе не является лимитирующей. Удельная скорость взаимодействия определяется формулой $K_s = \beta c_0 \alpha$.

Исходные (до начала горения углерода) концентрации CO_2 и H_2O , образовавшихся в дымогазовой зоне, не известны. Углекислый газ и вода дополнительно образуются в более высокотемпературной зоне в волне горения за счет реакций $\text{CO} + 2\text{NO}$ и $2\text{H}_2 + 2\text{NO}$. Кинетические параметры реакции третьего порядка $\text{CO} + 2\text{NO}$ определены в [13]: $K_0 = 2 \cdot 10^{10} \text{ л}^2/(\text{моль} \cdot \text{с})$, $E = 207,7 \text{ кДж/моль}$. При $T = 2000 \text{ К}$ скорости реакций $\text{CO} + 2\text{NO}$ и $\text{C} + \text{CO}_2$ имеют один порядок величины и, таким образом, они протекают параллельно в интервале температур 1500—2000 К. Поэтому в расчетах удельной скорости взаимодействия УМ с газами использовали равновесную конечную концентрацию CO_2 в пороховых газах при средней температуре на участке *Б* (см. рис. 1, б), что позволяет оценить максимально возможную скорость в данных условиях и минимальное время, необходимое для полного сгорания УМ. Учитывая одновременное наличие в продуктах сгорания CO_2 и H_2O , в выражение для K_s подставляли суммарную концентрацию этих реагентов.

Время, требуемое для полного сгорания частицы углерода радиусом r и плотностью ρ с массовой скоростью горения K_s , находим из выражения [11]

$$\tau = r\rho/K_s \cdot \Phi(\eta),$$

где $\Phi(\eta)$ — функция коэффициента избытка окислителя, который равен отношению массы имеющегося в единице объема окислителя к массе окислителя, требующегося для сгорания всех углеродных частиц в том же объеме. Функция характеризует снижение концентрации окислителя в процессе горения, поскольку оно происходит не в неограниченной среде, а при определенном избытке окислителя; график этой функции при $\eta > 1$ имеет гиперболический вид.

Результаты расчетов для углеродного волокна и саж ПМ-15 и КГО-250 в составе порохов А и Н приведены в табл. 2. Точность расчета определяется в основном точностью величин энергии активации процесса E и температуры, при которой он протекает. Из обзора литературы [12] следует, что для реакции $\text{C} + \text{CO}_2$ $E = 343 \div 377 \text{ кДж/моль}$ и в среднем равна 356 кДж/моль. Оценка показывает, что при одновременном изменении E с 356 кДж/моль на $\pm 6\%$ ($\pm 21 \text{ кДж/моль}$) и температуры с 2000 К на $\pm 2,5\%$ ($\pm 50 \text{ К}$) расчетная величина требуемого для взаимодействия времени пребывания может измениться в большую или меньшую сторону не более чем в 5 раз, т. е. расчет верно определяет порядок величины τ .

Время пребывания частиц углерода в зоне реакций в волне горения t определяли по времени прохождения этой зоны термопарой (по осциллограмме) и скоростям горения пороха и оттока газов. Поскольку на осциллограммах имеются значительные пульсации, то не представлялось возможным выявить разницу во временах для образцов с различным содержанием УМ, поэтому в табл. 2 представлены усредненные по всем образцам данные для времени пребывания частиц в зоне реакции. По полученным осциллограммам оно находится как сумма времен пребывания в участках *Б'* (0,1—0,4 мс) и *Б''* (0,4—0,6 мс) и составляет 0,5—1,0 мс. Однако использованные для измерения температуры термопары обладают повышенной инерционностью, что приводит к растяжению по времени измеренного профиля относительно действительного распределения температуры [6]. Например, для пороха А в данном случае вблизи T_r при $p = 10 \text{ МПа}$ градиент температуры $\varphi_n = 6 \text{ К/мкм}$. Для близкого по энергетике и скорости горения к пороху А пороха НБ при использовании термопар толщиной 2—3 мкм и $p = 1 \text{ МПа}$ ($u = 3,9 \text{ мм/с}$), $\varphi_n = 5,5 \text{ К/мкм}$, а при 5 МПа ($u = 11,2 \text{ мм/с}$) $\varphi_n = 13 \text{ К/мкм}$. Зависимость $\varphi_n(p)$ носит насыщающийся характер и при $p > 5 \text{ МПа}$ φ_n увеличивается незначительно. Таким образом, применение толстых (15 мкм) термопар приводит к завышению характерных времен для зон горения примерно в 2 раза. Следовательно, время пре-

Т а б л и ц а 2

Порох	n, %	(T), К	τ , мс	t, мс
А	КГО-250			
	2,0	2660	0,004	0,25—0,5
	4,8	2330	0,02	
	6,5	2120	0,16	
	9,1	2070	0,37	
	10,5	2020	0,89	
	13,8	1980	2,9	
	16,0	1960	14,3	
	ПМ-15			
	3,0	2490	0,14	0,25—0,5
	4,8	2320	0,50	
	6,5	2310	0,52	
	9,1	2310	0,87	
	10,5	2300	1,4	
	13,8	2240	4,3	
	16,0	2050	99,6	
	Углеродное волокно			
	4,8	2330	0,02	0,25—0,5
6,5	2120	0,14		
9,1	2100	0,25		
10,5	2080	0,43		
13,8	2050	1,2		
16,0	2030	6,0		
Н	Углеродное волокно			
	1,0	2280	0,08	0,22—0,45
	2,9	2080	0,37	
	4,8	1910	2,3	
	6,5	1880	4,8	
	9,1	1870	15,7	
10,5	1860	>200		

Пр и м е ч а н и е. (T) — средняя температура в зоне реакции.

бывания частиц УМ в зоне В оценивается вдвое меньшей величиной, а именно 0,25—0,5 мс.

Из сопоставления расчетного времени, требуемого для полного взаимодействия, и времени пребывания частиц в зоне реакции в волне горения, определенного опытным путем, несмотря на приближенность этих величин, следует, что кинетические препятствия действительно ограничивают возможность сгорания углеродных материалов в пороховых газах и являются причиной несоответствия экспериментальных данных по горению УМ и данных термодинамического расчета

Выводы

Изучена полнота взаимодействия различных углеродных материалов с пороховыми газами в волне горения баллиститных порохов. Показано, что предел по содержанию углеродных материалов, выше которого прекращается взаимодействие УМ с продуктами сгорания пороха, зависит от удельной поверхности материала и не зависит от коэффициента избытка окислителя пороха.

Для высокодисперсных (200—250 м²/г) материалов (углеродное волокно и сажа КГО-250) этот предел составляет около 50 % термодинамического значения, которое равно 10 % для пороха Н ($\alpha = 0,55$) и 17 % для пороха А ($\alpha = 0,72$), а для сажи ПМ-15 с более низкой удельной поверхностью (15 м²/г) — ~30 %.

Неполное сгорание объясняется наличием кинетических препятствий для взаимодействия углерода с диоксидом углерода и водой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисюк А. П., Марголин А. Д., Токарев Н. П. и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 576.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет.— М.: Оборонгиз, 1962.
3. Патент 4072546 США. Применение графитовых элементов для увеличения скорости горения ТРТ.
4. Лосев С. А. Газодипламические лазеры.— М.: Наука, 1977.
5. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения.— М.: Химия, 1977.
6. Зенин А. А. ПМТФ, 1963, 5, 125.
7. Конкин А. А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы.— М.: Химия, 1974.
8. Лавров Н. В., Коробов В. В., Филиппова В. Н. Термодинамика реакций газификации и синтеза из газов.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.
9. Уокер Ф., Русинко Ф., Остин Г. Реакции углерода с газами.— М.: ИЛ, 1963.
10. Зенин А. А. // Физические процессы при горении и взрыве.— М.: Атомиздат, 1980.
11. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.
12. Лавров Н. В. Физико-химические основы процесса горения топлива.— М.: Наука, 1971.
13. Fenimore C. P. J. Am. Chem. Soc., 1947, 69, 12, 3143.

Поступила в редакцию 14/IX 1987,
после доработки — 10/V 1988

УДК 536.46

О МЕХАНИЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. К. Булгаков, А. М. Липанов, В. Н. Вилюнов, А. И. Карпов
(Хабаровск—Москва)

В работе [1] при экспериментальном исследовании влияния обдувающего потока на скорость горения баллистического пороха Н обнаружено явление отрицательной эрозии, т. е. уменьшение скорости горения при обдуве поверхности. В ответ на существовавшее мнение о том, что эффект отрицательной эрозии есть следствие систематической погрешности эксперимента, а не реальное физическое явление, в [2] решающим экспериментом непосредственно подтверждена отрицательная эрозия при горении порохов. К настоящему времени высказано несколько гипотез, объясняющих отрицательную эрозию [1, 3]. Ниже приводятся результаты численного эксперимента, теоретически подтверждающие механизм отрицательной эрозии, аналогичный предложенному в [3].

Физическая суть новой гипотезы состоит в следующем. Отрицательная эрозия не связана с турбулентностью. При обдуве поверхности горения пороха увеличивается поперечная составляющая скорость в волне горения газовой фазы, т. е. по отношению к нормальному горению повышается эффект конвекции в газовой фазе. Это приводит к оттеснению зоны реакций в газовой фазе от поверхности топлива, к растяжению температурного профиля и как результат — к уменьшению теплового потока в топливо, а следовательно, к снижению скорости горения.

Численный эксперимент, подтверждающий описанный механизм отрицательной эрозии, состоял в следующем. На базе полных уравнений Навье — Стокса рассчитывалось горение топлива в плоском канале, образованном поверхностями горения. Необходимость решения такой задачи (более сложной по сравнению с методикой расчета на базе уравнений пограничного слоя [4]) объясняется возможностью более корректно рассмотреть процессы, протекающие в окрестности входного сечения канала, где отрицательная эрозия проявляется наиболее сильно.

Постановка задачи использует следующие допущения: 1) химические реакции в газовой фазе описываются одной брутто-реакцией;