

3. Определены пределы существования промежуточной волны фильтрационного горения в условиях встречной фильтрации газа.

4. Конвективный перенос тепла фильтрующимся газовым потоком не изменяет температурный профиль ПВФГ, увеличивая или уменьшая скорость движения фронта реакции.

5. Рассчитаны основные параметры зажигания: времена инертного прогрева, установления и срыва теплового равновесия.

6. Показано, что в условиях спутной фильтрации с ростом расхода газа  $G_0$  происходит переход от кондуктивного режима зажигания к конвективному, когда  $\tau_{ин} \rightarrow 0$  и  $\tau_0 \rightarrow 0$ , а  $\tau_a \rightarrow 1$  — к величине адиабатического периода теплового взрыва.

7. Обнаружен режим квазиизотермического объемного выгорания вещества и найдена область его существования.

8. Определены критические условия воспламенения «безгазовых» составов при импульсном подводе энергии газовым потоком.

9. Вычислены критические условия зажигания при встречной фильтрации газа. Показано, что с увеличением расхода газа время зажигания увеличивается, оставаясь конечным даже в критических условиях на пределе инициирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сеплярский Б. С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1986.
2. Мержанов А. Г., Аверсон А. Э. Современное состояние тепловой теории зажигания/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1970.
3. Вилунов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.
4. Мержанов А. Г. СВС-процесс (теория и практика горения)/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1980.
5. Алдунин А. П., Сеплярский Б. С. Распределение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР.— 1978.— 241, № 1.— С. 72—75.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности.— М.: Высш. шк., 1967.
7. Зельдович Я. Б. Теория зажигания накаленной поверхностью // ЖЭТФ.— 1939.— 9, № 12.— С. 1530.

г. Куйбышев

Поступила в редакцию 12/VI 1989,  
после доработки — 29/XI 1989

УДК 536.46 + 662.311

В. Н. Маршаков

### АНАЛИЗ ПОВТОРНОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПОРОХА ПОСЛЕ СПАДА ДАВЛЕНИЯ С ПОЗИЦИИ ОЧАГОВО-ПУЛЬСИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ

Режимы горения пороха при спаде давления: непрерывный, временного погасания (погасания с повторным воспламенением), полного погасания, а также области параметров спадов, при которых они наблюдаются, рассматриваются с позиций очагово-пульсирующего механизма горения нитроглицериновых порохов. Показано, что вероятностный характер каждого режима, значительные различия в тепловой обстановке участков поверхности горения канала, большие величины и разброс значений времен задержки повторного воспламенения, колебательный характер изменения температуры продуктов сгорания, ячеистый вид поверхности горения погашенных образцов, возможность расчета кривой полного погасания по соотношению скоростей горения очагов — все это свидетельствует о неоднородности процесса горения при спаде давления и может объясняться очаговым механизмом горения.

© 1991 Маршаков В. Н.

12

Экспериментальные исследования горения порохов при спаде давления в ракетных двигателях и бомбах переменного давления (например, [1—3]) обнаружили, что кроме ожидаемых режимов непрерывного горения и погасания порохового образца, наблюдается процесс, названный временным погасанием или погасанием с повторным воспламенением. В ракетных двигателях такое явление объяснялось [1, 4] воспламенением погасшего порохового заряда из-за разогрева его поверхности теплом, запасенным в оставшихся горячих продуктах сгорания, и излучением от горячих конструкций камеры. Возможное теоретическое описание процесса представлено в [5, 6].

В опытах с бомбой переменного давления [7] (установка бомба — ресивер, где начальный уровень давления создается холодным (15—20 °С) азотом) после спада давления в контакте с пороховым образцом находятся только остывшие из-за расширения и перемешивания с азотом продукты сгорания, не способные поджечь образец. Кроме того, в условиях проведения эксперимента, в бомбе нет конструкций, разогрев которых мог бы способствовать воспламенению образца. Тем не менее, в эксперименте при определенных параметрах спада давления после его окончания через задержку  $\tau_3$  от десятков миллисекунд до более полутора секунд образец воспламеняется и сгорает при конечном уровне давления  $p_k$ .

В рамках феноменологической теории нестационарного горения [8, 9] в узком диапазоне скоростей и глубин спада расчеты показывают принципиальную возможность существования процесса, похожего на режим, наблюдаемый в эксперименте. Следует заметить, что в этом случае расчеты дают при  $p_k$  такой низкий уровень температуры горячей поверхности пороха, что трудно представить себе возможность существования такого явления. Варианты расчетов нестационарного горения при спаде давления приведены в [8—10]. В рамках одномерной нестационарной теории горения пороха повторное воспламенение объясняется [11] конкуренцией двух процессов — тепловыделения в реакционном слое к-фазы и теплоотвода в глубь пороха. При перестройке прогретого слоя пороха в некоторый момент времени может сложиться ситуация, когда тепловыделение превысит теплоотвод и начнется разогрев теплового слоя, что и приведет к самовоспламенению пороха. В [12] показано, что для улучшения согласования результатов расчета  $\tau_3$  с экспериментом, кроме выбора соответствующих кинетических параметров для реакции в к-фазе, необходимо введение дополнительного внешнего источника тепла.

В настоящей работе предпринята попытка рассмотреть результаты экспериментальных исследований процесса горения при спаде давления с позиции гипотезы об очагово-пульсирующем механизме горения нитроглицириновых порохов и тем самым дать объяснение экспериментальным фактам, которые не находят объяснения в рамках одномерной теории. Параметры очагово-пульсирующего режима при постоянном давлении приведены в работе [13].

Методика экспериментов изложена в [2, 3, 7]. Обратим основное внимание на результаты, полученные при исследовании образцов, горящих по каналу. Размеры канала порохового образца выбраны на основании исследования [15], где показано, что каналы с отношением глубины к диаметру, меньшим 1,5, дают такие же характеристики режимов горения при спаде давления, как и цилиндрические образцы пороха, горящие с торца. Эта общность выражается в крайнем сокращении области параметров спадов давления, при которых наблюдается повторное воспламенение, и объясняется интенсивным обдувом поверхности горения в процессе спада холодными газами, создающими давление в бомбе. Поэтому образцы пороха Н имели канал с начальными размерами — диаметр 6 и глубина 35 мм. Горение проходило только по поверхности канала, который воспламенялся от электровоспламенителя МБ-2. Испытывались образцы с начальной температурой  $T_n = 22, -45$  и  $60$  °С.

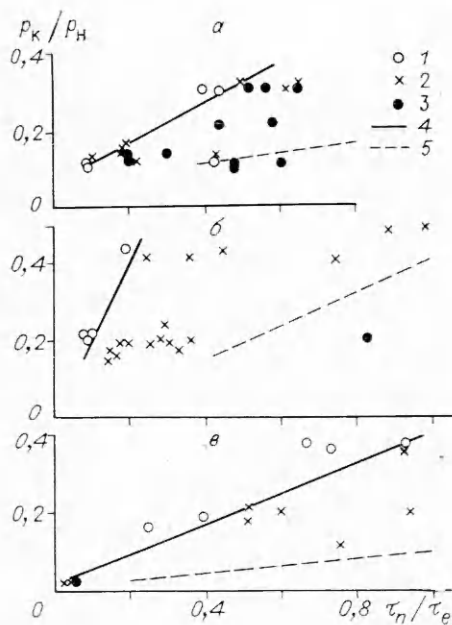


Рис. 1. Кривые временного (2, 4) и полного (3, 5) погасания для образцов пороха Н, горящих по каналу.

а —  $T_n = 22^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 60,5$  атм,  $u_n = 0,75$  см/с,  $\tau_e = 2,85$  мс; б —  $T_n = -45^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 61$  атм,  $u_n = 0,59$  см/с,  $\tau_e = 4,1$  мс; в —  $T_n = 60^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 57,5$  атм,  $u_n = 0,9$  см/с,  $\tau_e = 2,3$  мс; 1 — непрерывное горение; 4 — эксперимент; 5 — расчет.

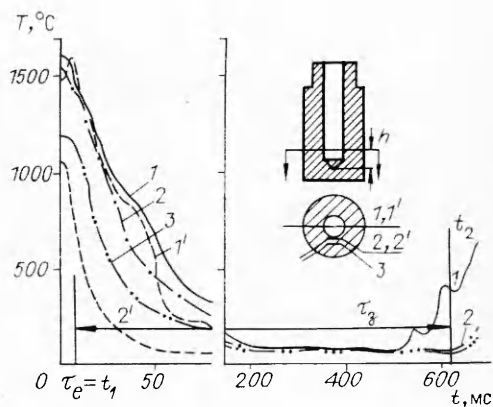


Рис. 2. Изменения температуры в канале образца при временном ( $T_n = 22^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 62$  атм,  $p_k = 8$  атм,  $\tau_e = 6,7$  мс,  $h = 3$  мм, 1 — центр канала, 2 —  $l = 840$  мкм, 3 —  $l = 380$  мкм) и полном ( $T_n = 22^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 63$  атм,  $p_k = 7$  атм,  $\tau_e = 6,5$  мс,  $h = 1,5$  мм, 1' — центр канала, 2' —  $l = 150$  мкм) погасании.

Повышенная и пониженная температура образцов создавалась с помощью термостатов с электроподогревом или охлаждением сухим льдом либо жидким азотом. Опыты проводились в установке бомба — ресивер, позволяющей независимо варьировать глубину и скорость спадов давления. Начальный уровень давления во всех опытах  $p_n \approx 60$  атм создавался азотом, конечный  $p_k$  изменялся от 1 атм при  $T_n = 60^\circ\text{C}$  до  $\sim 30$  атм при других  $T_n$ . В верхнее сечение образца, расположенное на 5 мм ниже торца у открытого конца канала, и в нижнее сечение, на 1,5—5 мм выше дна канала, заделывались П-образные вольфрам-ренийевые термопары толщиной  $\sim 7$  мкм на таком расстоянии от поверхности канала, чтобы в момент начала спада давления они находились вблизи поверхности горения (в основном, в газовой фазе). Показания термопар позволили провести анализ тепловой обстановки в волне горения и установить режимы [3]: горения, погасания с повторным воспламенением (или временного погасания) и полного погасания пороха.

В плоскости координат глубина — скорость спада давления получена кривая погасания, разделяющая параметры спадов, приводящих к непрерывному режиму горения и временному или полному погасанию при  $T_n = 22^\circ\text{C}$ . Основное внимание в [3] уделено описанию изменения температуры в газовой фазе при спадах давления, определяющих эти три режима горения.

Рассмотрим результаты экспериментов, которым не уделено внимание в [3, 12]. На рисунках приведены более полные записи изменения температуры в газовой фазе вблизи поверхности горения, в основном, для временного погасания. Характеристики спадов давления и расположение термопар даны в подписях к рисункам ( $l$  — расстояние от термопары до поверхности горения в момент начала спада давления). На рис. 1, а—в представлены кривые погасания в координатах безразмерная глубина спада  $p_k/p_n$  от безразмерного параметра  $\tau_n/\tau_e$ , характеризующего скорость спада давления ( $\tau_n = \kappa/u_n^2$  — время релаксации прогретого слоя пороха при  $p_n$ ,  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности,

$u_n$  — стационарная скорость,  $\tau_e$  — характерное время спада давления, определяющееся из  $p - p_k + (p_n - p_k) \exp(-t/\tau_e)$ .

В [3] даны характеристики режимов горения при спаде давления: при непрерывном горении температура продуктов сгорания во время спада давления и после него близка к значениям, соответствующим квазистационарному горению; при временном и полном погасании температура продуктов падает и после спада давления до значений, более низких квазистационарных, но если при погасании она в конце концов снижается до температуры окружающей среды и горение прекращается, то в режиме временного погасания температура, снизившись до нескольких десятков градусов, спустя некоторое время задержки, начинает расти и образец сгорает в нормальном режиме, который отвечает конечному уровню давления. Величину  $\tau_3$  для повторного воспламенения в районе данной термопары определяли как время от момента  $t_1$ , когда давление достигало уровня  $p_e = p_k + (p_n - p_k)/e$ , и до момента  $t_2$ , когда термопара после регистрации минимальной температуры начинает показывать ее подъем, завершающийся выходом на стационарный режим горения (рис. 2, 2, 3). Выбор моментов  $t_1$  и  $t_2$  условный и в основном определяется удобством их нахождения. В оправдание выбора  $t_1$  можно указать, что в этот момент для спадов давления, отвечающих кривой временного погасания, приблизительно выполняется соотношение  $\tau_{e\text{кр}} \approx \tau_n(p_e)$ , а при  $p_e > p > p_k$   $\tau_n(p) > \tau_e$ . За  $t_2$  правильнее было бы взять момент, когда термопара начнет показывать температуру, соответствующую стационарному горению при  $p_k$  и ее положению относительно поверхности горения, но при колебательном характере нарастания температуры и из-за неточностей определения положения термопары после спада, это внесло бы дополнительные сложности в определение  $\tau_3$ .

Режим непрерывного горения наблюдается при вполне определенных скоростях и глубинах спада давления. Области существования временного и полного погасания определяются менее четко (см. рис. 1, 4). Анализ всей совокупности экспериментальных результатов показывает, что наряду с общей тенденцией смены непрерывного горения на временное погасание, а затем на полное, с увеличением скорости спада  $\tau_n/\tau_e$  при фиксированной глубине  $p_k/p_n$  или с ростом  $p_k/p_n$  при фиксированной величине  $\tau_n/\tau_e$  режим временного погасания вносит некоторую неопределенность в эту зависимость.

Обратим внимание на характерные черты режима временного погасания. Для наглядности приведем типичные результаты опытов при разных  $T_n$ , так как эти характерные черты наблюдались при  $T_n = 60 \div -45^\circ\text{C}$ .

1. Из рис. 1 и 2 видно, что режимы временного и полного погасания могут наблюдаться при одних и тех же параметрах спада (см. рис. 2), т. е. осуществление этих режимов в некоторой области носит вероятностный характер. Непрерывное горение и временное погасание наблюдаются при одних и тех же критических параметрах спада давления, отвечающих кривой временного погасания (см. рис. 1, 4). Последний факт собственно и позволил построить кривую временного погасания.

2. Тепловая обстановка в конкретном опыте с режимом временного погасания вблизи отдельных участков поверхности горения в одном сечении канала может значительно отличаться (рис. 3, а).

3. Минимальный уровень температуры после спада в одном сечении канала (в центре) практически такой же, как и вблизи поверхности горения (см. рис. 2, 1—3). Это означает, что во время задержки воспламенения в течение нескольких сот миллисекунд отсутствует тепловой поток из  $\gamma$ -фазы к поверхности. Вместе с тем, «задержка воспламенения» в центре канала меньше задержки воспламенения у поверхности горения.

4. Минимальный уровень температур у поверхности горения в верхнем сечении канала значительно выше, реже такой же, как в нижнем

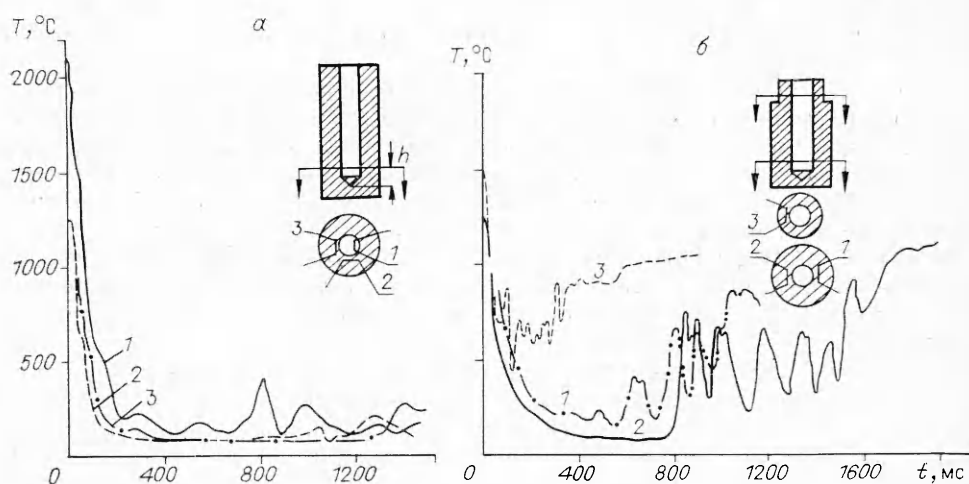


Рис. 3. Изменения температуры в канале образца при временном погасании.  
*a* —  $T_H = 22^\circ\text{C}$ ,  $p_H = 64$  атм,  $p_K = 9,5$  атм,  $\tau_e = 16$  мс,  $h = 3$  мм,  $l = 1300$  (1), 230 (2) и 230 мкм (3);  
*б* —  $T_H = -47^\circ\text{C}$ ,  $p_H = 62,5$  атм,  $p_K = 14$  атм,  $\tau_e = 16,5$  мс,  $l = 630$  (1), 490 (2) и 550 мкм (3).

сечении. Соответственно, и задержка воспламенения в верхнем сечении значительно (в несколько раз) меньше по сравнению с нижним (рис. 3, б).

5. Задержки воспламенения в одном опыте или в разных, но с близкими параметрами спадов, могут значительно отличаться (см. рис. 3, б, 1, 2). Величина задержек воспламенения может превышать 1,5 с, а время восстановления стационарного режима горения после задержки в зависимости от характеристик спада давления может составлять как десятки миллисекунд, так и быть более одной секунды (см. рис. 3, б, 2).

6. В период задержки воспламенения в одном сечении канала можно наблюдать, что две термопары у поверхности горения показывают минимальные одинаковые и практически постоянные значения температуры, а третья — более высокую с значительными (в несколько сот градусов) пульсациями (см. рис. 3, а). Особенно большие низкочастотные колебания температуры наблюдаются при повторном воспламенении во время выхода на стационарный режим горения (см. рис. 3, б), причем частота этих колебаний совпадает с частотой очагово-пульсирующего режима [13], который наблюдается в бомбе постоянного давления при  $p = p_K$ .

7. На поверхности горения погасших образцов видна ячеистая структура. Отдельные ячейки имеют неправильную форму и выделяются благодаря отсутствию сажи на их границах (рис. 4). Средний размер ячеек совпадает с размером ячеек — очагов, определенным в [13].

Отмеченные выше характерные особенности режимов горения пороха не могут быть объяснены с позиций одномерной теории. Поэтому об-

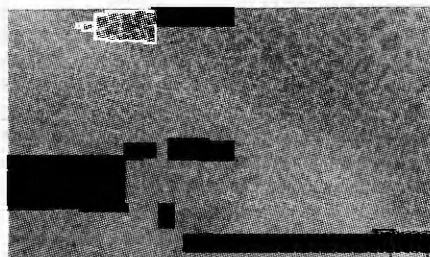


Рис. 4. Вид погасшей поверхности порохового канала в проходящем свете.

ратимся к гипотезе об очагово-пульсирующем механизме горения нитроглицериновых порохов. Согласно гипотезе [14], поверхность горения состоит из отдельных очагов, которые в каждый момент времени горят с существенно отличающимися скоростями  $u$ . Для отдельного очага  $u$  меняется во времени, и очаги выгорают с определенной периодичностью, зависящей от давления. Наличие трех режимов горения при спаде давлений получает новое объяснение. При спадах давления с параметрами, отнесенными к области, названной областью непрерывного горения, все очаги, образующие горящую поверхность образца или заряда во время и после спада, горят непрерывно. Причем, чем ближе характеристики спада к критическим, отвечающим кривой временного погасания, тем значительнее нестационарность процесса. При критических спадах, соответствующих кривой временного погасания, гаснут очаги, которые в начальный момент горели с минимально возможной скоростью.

В области параметров спада, отнесенных к режиму временного погасания (погасания с повторным воспламенением), в зависимости от количества очагов с разными скоростями горения при  $p_n$ , в процессе спада давления происходит погасание меньшей или большей части очагов, другими словами — погасание большей или меньшей поверхности горения канала (возможно погасание и всей поверхности горения). Вместе с тем, благодаря сохранившимся очагам, в течение некоторого времени задержки воспламеняется вся погасшая поверхность. И, наконец, при критических параметрах, отвечающих кривой полного погасания, в процессе спада давления гаснут все очаги и повторное воспламенение отсутствует.

Привлечение механизма, основанного на том, что поверхность горения состоит из отдельных очагов, горящих с переменной скоростью и не в одной фазе, позволяет легко объяснить все приведенные выше характерные черты режима временного погасания. Вероятностный характер появления очагов, которые выживают во время спада давления, дает возможность представить себе и механизм повторного воспламенения всего канала образца. Отдельные очаги, сохраняющиеся, по-видимому, преимущественно в нижней части канала, с одной стороны, поджигают соседние участки порохового канала, с другой — и это представляется определяющим, формируют высокотемпературную газовую зону у открытого конца канала, где погасание очагов облегчено. В свою очередь, эта газовая зона и осуществляет воспламенение всего канала, перемещаясь от открытого конца канала к его дну.

В эксперименте кривая полного погасания не определена, так как необходимые параметры спада находились на пределе возможностей существующей установки. Кривую полного погасания можно рассчитать, зная параметры кривой временного погасания, из соотношения минимально и максимально возможных скоростей горения очагов при  $p_n$  [13]. Для каждой глубины  $p_n/p_n$  критическая скорость спада в режиме полного погасания будет больше критической скорости в режиме временного погасания (в безразмерных координатах) во столько раз, во сколько время релаксации прогретого слоя пороха при  $p_n$  для медленногорящего очага больше времени релаксации быстрогорящего очага. Для данного случая:

$$\tau_{n \min} / \tau_{n \max} = u_{n \max}^2 / u_{n \min}^2 \simeq (1,03/0,46)^2 \simeq 5.$$

На рис. 1, 5 показаны расчетные кривые полного погасания. Видно, что расчетные кривые не противоречат и согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Основной вывод работы: нестационарное горение пороха при спаде давления может быть детально описано только с привлечением очагово-пульсирующего механизма горения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ciepluch C. C. Effect of rapid pressure decay on solid propellant combustion // ARS J.— 1961.— 31.— P. 1584—1586.
2. Маршаков В. Н., Лейпунский О. И. К вопросу о механизме горения пороха при спаде давления // ФГВ.— 1969.— 5, № 1.— С. 3—7.
3. Земских В. И., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. и др. Три характерных режима горения баллистических порохов при спаде давления // ФГВ.— 1977.— 13, № 1.— С. 14—19.
4. Tobioka K. The experimental study on the spontaneous reignition phenomena of solid propellant rocket motor // Intern. X Symp. on Space Techn. and Sci.— Tokyo, 1973.— P. 73—82.
5. Hanzawa M. Extinction transients of solid propellant induced by rapid pressure decay // Ibid.— P. 115—122.
6. Hanzawa M. Theoretical study on depressurization induced extinction of solid propellant // AIAA Pap. 1976, N 76—635.— P. 10.
7. Маршаков В. Н., Лейпунский О. И. Горение и потухание пороха при быстром спаде давления // ФГВ.— 1967.— 3, № 2.— С. 231—235.
8. Фрост В. А., Юмашев В. Л. Исследование погасания пороха в модели горения с переменной температурой поверхности // ПМТФ.— 1973.— № 2.— С. 92—100.
9. Лидский Б. В., Новожилов Б. В., Попов А. Г. Нестационарное горение твердого топлива вблизи границы погасания при спаде давления // Хим. физика.— 1985.— 4, № 5.— С. 724—727.
10. Donde R., Riva G., DeLuca L. Experimental and theoretical extinction of solid rocket propellants by fast depressurization // Acta Astronautica.— 1984.— 11, N 9.— P. 569—576.
11. Ассовский И. Г., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. О самовоспламенении конденсированного топлива // Докл. АН СССР.— 1978.— 239, № 3.— С. 625—628.
12. Земских В. И., Лейпунский О. И. Повторное воспламенение конденсированных реагирующих веществ // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 3—10.
13. Маршаков В. Н. Параметры очагово-пульсирующего режима горения нитроглицеринового пороха // Хим. физика.— 1987.— 6, № 4.— С. 530—537.
14. Синаев К. И. Очагово-пульсирующее горение нитроцеллюлозных порохов // I Всесоюз. симп. по горению и взрыву: Тез. докл.— М.: Наука, 1968.— С. 59—63.
15. Земских В. И., Лейпунский О. И., Маршаков В. Н. Горение и потухание порохового канала при спаде давления // IV Всесоюз. симп. по горению и взрыву: Сб. Горение и взрыв.— М.: Наука, 1977.— С. 273—277.

*г. Москва*

*Поступила в редакцию 13/IV 1990*

УДК 541.126.4

*В. И. Устимов, Ю. В. Бунаков, А. Н. Урюпин*

### ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСЕЙ $H_2 + O_2 + HBr$

Исследуется горение смеси  $H_2 + O_2 + HBr$  при постоянной плотности (объеме). При временах, меньших времени задержки самовоспламенения  $\tau_3$ , рассматриваются приближенные методы решения системы кинетических уравнений. Приведены редуцированные детальные кинетические механизмы. При  $p \leq 4 \cdot 10^4$  Па получена оценка  $\tau_3$  в линейном приближении, при  $p \geq 4 \cdot 10^5$  Па показана справедливость линейных соотношений между концентрациями различных компонентов горючей смеси.

Время задержки самовоспламенения  $\tau_3$  — важнейший параметр процесса горения, в частности, его величина характеризует протекание предвзрывных процессов в системе. Как правило, при времени  $t < \tau_3$  превалирует цепной механизм развития реакции [1]. Величина  $\tau_3$  может служить мерой эффективности как ингибиторов, так и катализаторов горения [2].

Как экспериментальное определение, так и численные расчеты значений  $\tau_3$  связаны со значительными трудностями. Так, при математическом моделировании горения возникает необходимость интегрирования системы жестких нелинейных дифференциальных уравнений — совокупности кинетических уравнений, дополненной уравнениями сохранения энергии, импульса и момента импульса. Число кинетических уравнений

© 1991 Устимов В. И., Бунаков Ю. В., Урюпин А. Н.