

## КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР И ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХОВ

В. Н. Маршаков, А. Г. Истратов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, marsh@center.chph.ras.ru

Дан критический обзор проблемы погасания порохов при уменьшении диаметра образца за счет теплоотвода. Приведены также результаты собственных экспериментальных исследований критического диаметра горения. Сопоставление всех экспериментальных данных оказалось особенно наглядным в виде зависимости критического диаметра от скорости горения. Эти зависимости подчиняются степенному закону с показателем степени  $-1.15 \div -1.17$ . Такому же закону подчиняются зависимости размеров ячеек (очагов), образованных совокупностью поперечных волн на поверхности горения, от скорости горения. Размеры ячеек меньше критического диаметра горения в  $2.1 \div 2.3$  раза. Установлено также, что поперечная волна гаснет, если ее кривизна превышает критическое значение.

Ключевые слова: горение, порох, скорость горения, критический диаметр, поперечная волна, ячеистая структура поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования критического (предельного) диаметра горения взрывчатых веществ (ВВ) начались, по-видимому, семьдесят лет назад с работы К. К. Андреева «О горении взрывчатых веществ», представленной Н. Н. Семеновым в первый номер «Докладов Академии наук СССР» в 1935 г. [1]. В работе излагались результаты исследований скорости горения твердого кристаллического тетрила в зависимости от плотности, начальной температуры и диаметра заряда, помещенного в стеклянную трубку. Было показано, что с уменьшением диаметра заряда (трубки) скорость горения падает, а при некотором диаметре горение прерывается. Впоследствии ряд авторов в МХТИ им. Д. И. Менделеева [2–4] и в ИХФ им. Н. Н. Семенова РАН [5–8] обращались к экспериментам такого рода. Определенное несоответствие результатов этих работ обусловлено различием условий теплообмена на границах сжигаемых образцов. В связи с этим нами были выполнены эксперименты по определению критического диаметра и проведена математическая обработка известных экспериментальных данных по нитроглицериновым порохам.

Теоретические представления о природе критического диаметра были развиты Я. Б. Зельдовичем сначала для горения га-

зов [9]. Тепловые потери снижают температуру горения, от которой зависит скорость распространения пламени. Рассмотрение зависимости температуры пламени от потерь совместно с аррениусовской зависимостью скорости горения от температуры приводит к определению предела распространения пламени. При этом на пределе температура горения снижается на величину  $RT^2/E$ , а скорость распространения падает в  $\sqrt{e}$  раз. Также в одномерном приближении было теоретически рассмотрено погасание пороха из-за теплопотерь как переход в неустойчивый режим [10–12].

В двумерном приближении вопрос подробно исследовался методами математического моделирования применительно к горению безгазовых систем [13–15]. Существенно неодномерный эффект образования несгорающего слоя («чужка») у инертной стенки рассматривался в рамках одномерного подхода [16]. Предлагался также упрощенный вариант неодномерного анализа, в котором погасание определяется как предельное искривление фронта горения [17, 18]. В работе [19] для расчета критического диаметра комбинируются двумерная задача теплопроводности (для определения теплопотерь) с одномерной моделью зон химических реакций.

Общей проблемой теории является отсутствие точных данных по параметрам волны горения для корректного сравнения эксперимента с теорией.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-03-32754).

Вместе с тем установлено, что волна горения порохов представляет собой систему поперечных волн, образующих подвижную ячейку структуру (очаги) на поверхности горения [20–23]. В связи с этим такой параметр, как критический диаметр, рассматривается с позиции представлений о поперечных волнах горения.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ГОРЕНИЯ

Исследования критического диаметра горения проводились на образцах нитроглицеринового пороха Н (58 % коллоксилина, 28 % нитроглицерина, 12 % динитротолуола, стабилизатор, пластификатор), модельных порохов НБ (58 % коллоксилина, 40 % нитроглицерина, стабилизатор, пластификатор) [7, 24] и А (49 % коллоксилина, 49 % нитроглицерина, стабилизатор, пластификатор) [4]. Модельные пороха НБ и А хотя и отличаются несколько составом, имеют практически одинаковые зависимости скорости горения от давления:  $u = 0.9p^{0.65}$  для НБ и  $u = 1.0p^{0.64}$  для А, где  $[u] = \text{см/с}$ ,  $[p] = \text{атм}^*$ . Увеличение теплоотвода из зон горения в окружающую инертную среду при определении критического диаметра достигалось следующим образом: образец либо плотно вставлялся в алюминиевую или латунную обойму (аналогично [7]), либо бронировался полиэтиленовой пленкой толщиной 45 или 200 мкм с клеящим слоем и помещался в воду (аналогично [4]). Образцы воспламенялись с торца, выступающего на 3 ÷ 4 мм над обоймой или уровнем воды, нихромовой спиралью через тонкий слой быстрогорящей пасты и горели в среде азота. Температурные измерения проводились вольфрам-рениевыми термопарами толщиной 7 мкм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены зависимости критического диаметра горения  $D_{cr}$  от давления  $p$  для пороха Н, полученные разными авторами в различных условиях теплообмена образца пороха с инертной окружающей средой.

Так, в работах [2, 6] использовалась методика экспериментов, предложенная в [5], а

\*Здесь и ниже сохранена размерность давления в атмосферах, как в цитируемой литературе.

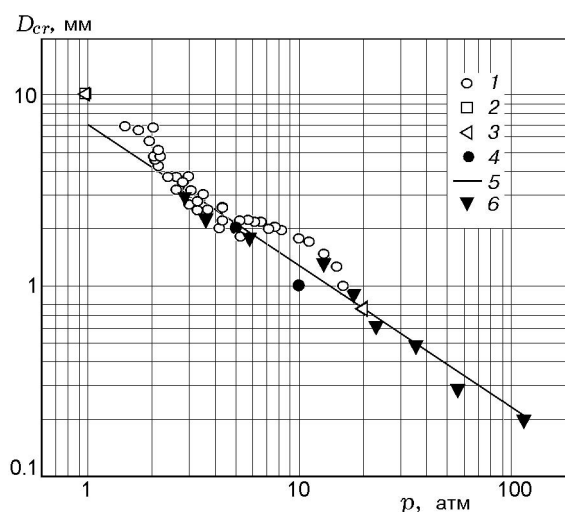


Рис. 1. Зависимость критического диаметра горения от давления для пороха Н:

1 — данные [6]; 2 — [2]; 3 — Н. Г. Беспалов (цит. по [2]), данные для образцов пороха в целлофановых, покрытых ПХВ-лаком обоймах, помещенных в воду; 4 — данные для образцов пороха в металлической обойме [7]; 5 — зависимость  $D_{cr} = 7p^{-0.74}$ , полученная обработкой данных для бронированных пленкой образцов пороха, помещенных в воду [4]; 6 — данные для бронированных пленкой образцов пороха, горящих в азоте [4]

именно: цилиндрический или конический образец вставлялся в оболочку из трех слоев целлофана, проклеенных клеем БФ-6 и покрытых снаружи и изнутри ПХВ-лаком, и вся сборка помещалась в воду (см. 1, 2 на рис. 1).

Г. Н. Беспалов в своих опытах при  $p = 20$  атм покрывал клиновидный образец слоем ПХВ-лака и помещал в воду (цитируется по [2], см. 3 на рис. 1). В работе [7] использовалась массивная дюралева или латунная обойма (см. 4 на рис. 1). В работе [4] цилиндрический или в виде пластины образец бронировался одним слоем полиэтиленовой пленки толщиной 200 мкм и также помещался в воду. Эти данные обработаны в виде степенной зависимости  $D_{cr} = 7p^{-0.74}$ , где  $[D_{cr}] = \text{мм}$ ,  $[p] = \text{атм}$  (линия 5 на рис. 1). На рисунке также приведены данные (см. 6) из той же работы [4] для бронированных пленкой образцов пороха, горящих в азоте (без помещения в воду).

Из рис. 1 видно, что представленные данные приблизительно одинаковым образом соответствуют зависимости  $D_{cr} = 7p^{-0.74}$ , даже для образцов, горящих просто в азоте, особенно если учесть, что разброс данных у каждого из авторов мог достигать  $\pm 10 \div 20 \%$ . Таким

образом, традиционное представление данных о критическом диаметре в зависимости от давления не выявляет наглядно отличий в теплоотводе из зон горения.

На рис. 2 представлены данные по критическому диаметру горения  $D_{cr}$  для пороха Н, взятые из тех же источников, что и для рис. 1, но в зависимости от скорости горения  $u$ . Под скоростью горения, если не оговорено особо, понимается так называемая адиабатическая скорость. Она наблюдается для образцов таких диаметров, при увеличении которых скорость горения уже не меняется (здесь для диаметров свыше 7 мм).

На рис. 2 представлены данные работ [2, 5–7] и данные работы [4], обработанные в виде степенного закона  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$  (см. 8 и 5), в виде степенного закона  $D_{2cr} = 3.15u^{-1.15}$  (линия 6) — результат математической обработки точек 6 из рис. 1 для бронированных образцов, горевших в азоте, и, наконец, в виде степенного закона  $D_{3cr} = 1.77u_{cr}^{-1.15}$  (линия 7) — математическая обработка тех же точек 6 из рис. 1, но с использованием критиче-

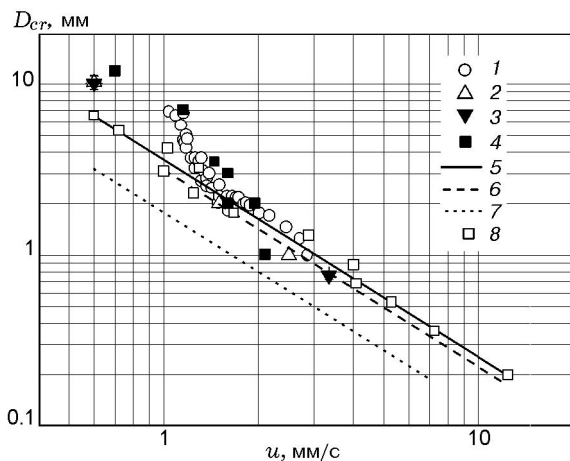


Рис. 2. Зависимость критического диаметра от скорости горения для пороха Н:

1 — данные [6]; 2 — [2 (Н. Г. Беспалов); 5]; 3 — Н. Г. Беспалов (цит. по [2]), данные для образцов пороха в целлофановых, покрытых ПХВ-лаком обоях, помещенных в воду; 4 — данные для образцов пороха в металлической обойме [7]; 5 — зависимость  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$ , полученная обработкой данных (см. линию 8) для бронированных пленкой образцов пороха, помещенных в воду [4]; 6 — зависимость  $D_{2cr} = 3.15u^{-1.15}$ , полученная обработкой данных для бронированных пленкой образцов пороха, сжигаемых в азоте [4]; 7 — зависимость  $D_{3cr} = 1.77u_{cr}^{-1.15}$  для тех же образцов [4]

ских значений скорости горения пороха вблизи предела погасания вместо адиабатических значений, применявшихся ранее. Здесь и далее  $[D_{cr}] = \text{мм}$ ,  $[u] = \text{мм/с}$ . Показатель степени определен с ошибкой  $\pm 0.04$ . Постоянный коэффициент определен с точностью  $\pm 3 \div 6 \%$ .

Аналогичные закономерности были получены и для модельного пороха А по данным [4]. Их математическая обработка представлена на рис. 3:  $D_{1cr} = 6u^{-1.17}$  (линия 1),  $D_{2cr} = 5.4u^{-1.17}$  (линия 2),  $D_{3cr} = 3u_{cr}^{-1.17}$  (линия 3) для пороха А и для сравнения  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$  для пороха Н (линия 4). Точность определения показателей степени и постоянных коэффициентов в приведенных закономерностях та же.

Обратим внимание на следующее.

1. Во всех зависимостях критического диаметра от скорости горения наблюдается единообразие закономерностей  $D_{cr} \sim u^n$ , где  $n = -1.15 \div -1.17$  вместо ожидаемого значения  $n = -1$ , т. е. в пределах точности  $n = -7/6$ .

2. При малых скоростях горения ( $0.6 \leq u \leq 1.6 \text{ мм/с}$ ) критический диаметр тем больше, чем больше теплоотвод, как это видно на рис. 2. При  $u = 0.6 \text{ мм/с}$  критический диаметр образца  $D_{cr}$ , заключенного в алюми-

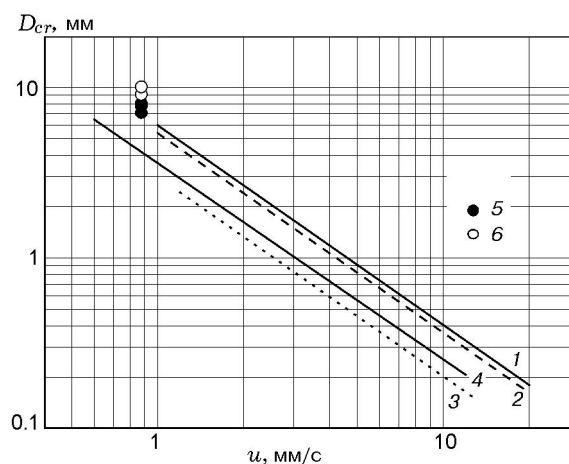


Рис. 3. Зависимость критического диаметра от скорости горения для пороха А:

1 — зависимость  $D_{1cr} = 6u^{-1.17}$  для бронированных пленкой образцов пороха, помещенных в воду [4]; 2 — зависимость  $D_{2cr} = 5.4u^{-1.17}$  для бронированных пленкой образцов пороха, сжигаемых в азоте; 3 — зависимость  $D_{3cr} = 3u_{cr}^{-1.17}$  для тех же образцов, что и в зависимости 2; 4 — зависимость  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$  для образцов пороха Н, таких же как в зависимости 1; 5 и 6 — результаты наших опытов («сгорел» и «погас» соответственно) с образцами пороха НБ в кварцевом песке

вую обойму (4 на рис. 2), в два раза больше, чем у образца, бронированного полиэтиленовой пленкой и помещенного в воду (8 на рис. 2). По мере увеличения скорости это различие уменьшается.

3. При более высоких скоростях горения ( $u > 1.6$  мм/с) условия теплоотвода практически не сказываются на величине критического диаметра в пределах разброса экспериментальных данных [2, 4–7] (см. рис. 2).

4. Вместе с тем критические диаметры для образцов как пороха Н, так и пороха А, горящих в азоте практически без теплоотдачи, более чем на 10% меньше соответствующих критических диаметров, полученных в условиях, обеспечивающих существенный теплоотвод (ср. прямые 5 и 6 на рис. 2, а также прямые 1 и 2 на рис. 3). Таким отличием можно было бы пренебречь, учитывая разброс значений, но зависимости  $D_{1cr}(u)$  и  $D_{2cr}(u)$  были получены в независимых экспериментах и в большом количестве опытов.

5. Сопоставляя данные по критическому диаметру для порохов А и Н, отметим, что критический диаметр образцов пороха А (более калорийного) при одной и той же скорости горения примерно в  $1.6 \div 1.7$  раза больше, чем у пороха Н (см. соответственно линии 1 и 4 на рис. 3).

6. По-видимому, критический диаметр желательнее было бы анализировать в зависимости от предельной скорости горения, которая и наблюдается при критическом диаметре образца (ср. 7 и 6 на рис. 2 или 3 и 2 на рис. 3), но измерения этой нестационарной скорости весьма затруднены [4], и этот вопрос пока остается открытым.

Поскольку мы рассматриваем горение нитроглицериновых порохов с позиций механизма, при котором горение осуществляется за счет поперечных волн, распространяющихся по поверхности горения и образующих ячеистую структуру (очаги горения) [20–23], сравним величину критического диаметра с размером ячеек-очагов. На рис. 4 для модельного пороха НБ и на рис. 5 для пороха Н приведены следующие данные: характерные (наиболее часто наблюдаемые) размеры очагов-ячеек (1 на рис. 4, 3 на рис. 5), вертикальными отрезками показан разброс возможных размеров очагов от максимального до минимального; средний по поверхности эквивалентный размер очагов [20] (значки 2); размеры очагов, полученные при об-

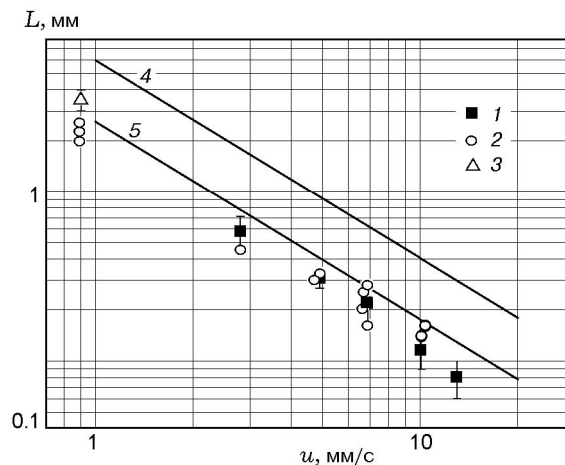


Рис. 4. Зависимость размера очагов от скорости горения для пороха НБ:

1 — характерный размер очагов; 2 — средний по поверхности эквивалентный размер очагов; 3 — размер очагов, полученный по данным видеосъемки; 4 — зависимость  $D_{1cr} = 6u^{-1.17}$ , полученная обработкой данных для бронированных пленкой образцов пороха А, помещенных в воду; 5 — зависимость  $L_{max} = 2.6u^{-1.17}$ , описывающая максимальный размер очагов-ячеек пороха НБ

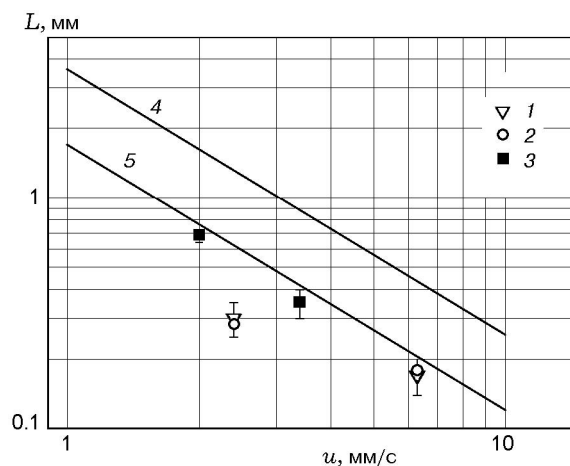


Рис. 5. Зависимость размера очагов-ячеек от скорости горения для пороха Н:

1 — размер очагов из [23]; 2 — средний по поверхности эквивалентный размер очагов; 3 — характерный размер; 2 и 3 — наши данные; 4 — зависимость  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$ , полученная обработкой данных для бронированных пленкой образцов пороха Н, помещенных в воду; 5 — зависимость  $L_{max} = 1.7u^{-1.15}$ , описывающая максимальный размер очагов-ячеек

работке кадров видеofilьмов (3 на рис. 4); размеры очагов с разбросом их значений из [23] (1 на рис. 5); зависимости критического диаметра от скорости горения  $D_{1cr} = 6u^{-1.17}$  и  $D_{1cr} = 3.6u^{-1.15}$  для порохов НБ и Н, полученные выше (линии 4 на рис. 4 и 5 соответственно); зависимости максимального размера ячеек от скорости горения  $L_{max} = 2.6u^{-1.17}$  и  $L_{max} = 1.7u^{-1.15}$  для порохов НБ и Н (линии 5 на рис. 4 и 5 соответственно), где  $D_{cr}$  и  $L_{max}$  имеют размерность мм, а скорость горения — мм/с.

Отметим сразу следующие обстоятельства.

1. Зависимости размера ячеек от скорости горения  $L_{max}(u)$  и зависимости критического диаметра от скорости  $D_{1cr}(u)$  имеют одинаковые показатели степени.

2. Для каждого из порохов при любой заданной скорости критический диаметр в  $2.1 \div 2.3$  раза больше максимального размера ячейки. Это представляется очевидным, так как минимальное количество ячеек на поверхности горения должно быть несколько больше двух, чтобы горение не прекратилось.

3. При любой заданной скорости горения как критический диаметр, так и максимальный размер ячеек у пороха НБ примерно в  $1.5 \div 1.7$  раза больше, чем у пороха Н.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

Для определения профиля поверхности горения погасший образец разрезался по диаметру. Половинки фотографировались цифровым фотоаппаратом с увеличением. Изображение профиля анализировалось на компьютере также при увеличении. Полное увеличение доходило до кратности 20.

Исследовалась поверхность горения образцов порохов НБ и Н при атмосферном давлении с диаметрами ( $d$ ), меньшими и большими критического. На рис. 6 приведены профили погасших образцов пороха НБ и показаны примеры измерения радиусов кривизны  $R_i$  и  $R_j$ .

Исследовались образцы диаметром 5, 6 и 7 мм. Эти образцы находились в массивной алюминиевой обойме и погасли, так как их диаметр меньше критического  $D_{1cr} \cong 8$  мм. Образцы диаметром 11, 13.8 и 16 мм были бронированы полиэтиленовой пленкой толщиной 45 мкм и помещены в воду. Они погасли из-за попадания воды через прогары в бронировке.

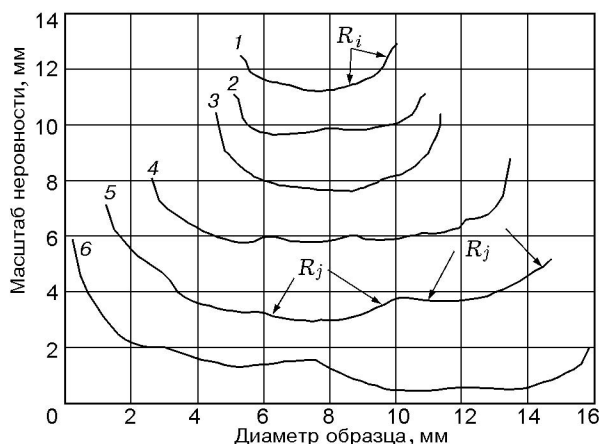


Рис. 6. Профили погасших поверхностей горения образцов пороха НБ различного диаметра:

1-3 — образцы диаметром 5, 6 и 7 мм соответственно; 4-6 — образцы диаметром 11, 14 и 16 мм соответственно, погашенные водой;  $R_i$  и  $R_j$  — радиусы кривизны поверхности у стенки и «на дне» соответственно

Анализ профилей показывает, что значения радиуса кривизны у стенок для образцов с  $d < D_{cr}$  (см. 1-3 на рис. 6) лежат в диапазоне  $R_i = 1.1 \div 2.4$  мм, на «дне» — в диапазоне  $R_j = 2.4 \div 4.5$  мм, а для образцов с  $d > D_{cr}$  (см. 4-6)  $R_i \cong 4$  мм у стенки и  $R_j = 3 \div 5$  мм «на дне». В работах [22, 23] показано, что: а) для пороха НБ поперечная волна за один «проход» выжигает слой толщиной примерно 2 мм; б) среднее значение вертикальной составляющей скорости горения равно 0.54 мм/с (как и скорости у предела горения при 1 атм для НБ); в) поперечная волна гаснет при критерии Михельсона — Маркштейна [23]  $Mi_{cr} = Ru/\alpha < 10 \div 13$ , где  $\alpha = 10^{-1}$  мм<sup>2</sup>/с — коэффициент температуропроводности.

Анализ данных рис. 6 показывает следующее.

1. Профиль состоит из набора «дуг» с различными радиусами кривизны, такими же как у поперечных волн [22, 23]. Описать профиль только величиной радиуса кривизны, как в [4, 7], невозможно.

2. Профили 1-3 образовались за один «проход» поперечной волны. У стенки критерий Михельсона — Маркштейна меньше критического,  $Mi = 6 \div 13 \leq Mi_{cr}$  и, следовательно, волна должна погаснуть.

3. Профили 4-6 образовались за  $5 \div 8$  проходов поперечной волны. У стенки  $Mi = 22 > Mi_{cr}$  и погасание образца вызвано попаданием воды на поверхность горения.

Согласно теоретическим работам [9–17] следовало ожидать, что зависимость критического диаметра от скорости горения будет иметь вид  $D_{cr} \sim u^{-1}$ . Между тем оказалось, что все экспериментальные данные соответствуют зависимости  $D_{cr} \sim u^{-7/6}$ . Такая же зависимость справедлива и для связи между размерами ячеек (очагов горения) со средней скоростью горения. Любопытно, что такое же соотношение можно получить из расчетов, выполненных для безгазовых систем в [25] для расстояния между поперечными волнами и средней скоростью горения. Физический смысл такого скейлинга  $D_{cr} \sim u^{-7/6}$  (скейлинг — понятие, подразумевающее наличие определенной масштабной инвариантности), по-видимому, связан с влиянием в качестве независимого размерного параметра толщины прогретого слоя, по которому происходит распространение поперечных волн.

### ВЫВОДЫ

1. Дан критический обзор проблемы погасания порохов за счет теплоотвода при уменьшении диаметра образца.

2. Сопоставление литературных и собственных экспериментальных данных оказалось особенно наглядным в виде зависимости критического диаметра от скорости горения. Эти зависимости подчиняются одинаковому степенному закону с показателем  $n = -1.15 \div -1.17$ .

3. Размеры ячеек (очагов), образованных совокупностью поперечных волн на поверхности горения для исследованных порохов, меньше критического диаметра горения в  $2.1 \div 2.3$  раза. Их зависимость от скорости горения оказалась такой же, как аналогичная зависимость для критического диаметра.

4. Анализ профиля погасшей поверхности позволил установить, что поперечная волна затухает, если ее кривизна превышает критическое значение, определяемое критерием Михельсона — Маркштейна.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К. О горении взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1935. Т. 1. С. 220–225.
2. Андреев К. К. Термическое разложение и горение ВВ. М.: Наука, 1966.
3. Кондриков Б. Н. Об устойчивости горения взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 1. С. 51–60.
4. Вишневский И. Я., Денисюк А. П., Фогельманг А. Е. Критические условия горения баллиститных порохов // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 1. С. 12–18.
5. Андреев К. К., Попова П. П. О способности предохранительных взрывчатых веществ к горению // Докл. АН СССР. 1960. Т. 134, № 5. С. 1142–1145.
6. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ. М.: Наука, 1976.
7. Зенин А. А., Лейпунский О. И., Писковский С. В., Пучков В. М. Горение и погасание баллиститного пороха вблизи критического диаметра // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 2. С. 179–185.
8. Ананьев А. В., Маршаков В. Н. Критический диаметр горения перхлората аммония // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 12. С. 65–67.
9. Зельдович Я. Б. Теория распространения тухлого пламени // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1941. Т. 11, № 1. С. 159–168.
10. Зельдович Я. Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1942. Т. 12. С. 498.
11. Кондриков Б. Н., Новожилов Б. В. О критическом диаметре горения конденсированных частиц // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 661–668.
12. Зенин А. А., Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Пучков В. М. О критическом диаметре горения баллиститного пороха // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 1. С. 41–45.
13. Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г. О горении безгазовых составов при наличии теплопотерь // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 3. С. 46–52.
14. Александров В. В., Давыденко А. А., Еремин А. Ф. и др. Определение кинетических параметров по зависимости скорости безгазового горения от температуры // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 79–83.
15. Александров В. В., Давыденко А. А., Коваленко Ю. А., Поддубный Н. П. О влиянии двумерности фронта при теплопотерях на пределы стационарного безгазового горения // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 2. С. 70–80.
16. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Скорость и пределы горения термически толстого слоя конденсированного вещества при теплообмене с инертной средой // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 16–25.
17. Rybanin S. S. The propagation velocity of the spinning wave // 4th Intern. Symp. on Behavior of Dense Media under High Dynamic Pressures. HDP IV. 1995. Tours — France. P. 85–90.

18. **Истратов А. Г., Маршаков В. Н.** О критическом диаметре горения конденсированных веществ // Ракетные двигатели и их применения для освоения космического пространства. К 100-летию идеи К. Э. Циолковского: Тез. докл. междунар. конф. Space'2003. Москва; Калуга: РАН, 2003. С. 65–66.
19. **Романов О. Я.** К теории критического диаметра горения // XIII Симпоз. по горению и взрыву, 2005, Черногоровка: Сб. докл. CD-диск, content: «Romanov». [http://orel3.rsl.ru/nettext/russian/gor\\_i\\_vzr/content/Romanov.pdf](http://orel3.rsl.ru/nettext/russian/gor_i_vzr/content/Romanov.pdf).
20. **Маршаков В. Н.** Параметры очагово-пульсирующего режима горения нитроглицеринового пороха // Хим. физика. 1987. Т. 6, № 4. С. 530–537.
21. **Ананьев А. В., Истратов А. Г. и др.** Неустойчивость при установившемся горении порохов и взрывчатых веществ // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 12. С. 47–52.
22. **Маршаков В. Н., Истратов А. Г., Пучков В. М.** Неоднородный фронт горения составов на основе нитроклетчатки и нитроглицерина // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 100–106.
23. **Marshakov V. N., Istratov A. G.** Wave structure of the solid-propellant combustion front // Progress in Combustion and Detonation / A. A. Borisov, S. M. Frolov, A. L. Kuhl (Eds). (Intern. Conf. on Combustion and Detonation. Zel'dovich Memorial, 30.08–03.09. 2004. Moscow, Russia). M.: Torus Press Ltd, 2004. CD-disk. Paper W2–2.
24. **Зенин А. А.** Процессы в зонах горения баллистических порохов // Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980. С. 68–105.
25. **Рыбанин С. С.** Поперечные волны при горении энергетических конденсированных систем // Материалы 2-й всерос. конф. «Энергетические конденсированные системы». 2004. С. 70–71.

*Поступила в редакцию 21/XII 2005 г.*

---