

УДК 535.71

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ ЗЕРЕН ПИРОКСИЛИНОВОГО ПОРОХА МАРКИ 5/7 ПЛЕНКОЙ ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЯ НА ПЕРЕХОД ПОСЛОЙНОГО ГОРЕНИЯ В КОНВЕКТИВНОЕ

© 2023 г. В. Е. Храповский*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: khrapovsky@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022;

после доработки 29.04.2022;

принята в печать 20.05.2022

Исследовался переход послойного горения в конвективное на образцах из гранул пироксилинового пороха марки 5/7 с плотностью 1.34–1.47 г/см³ и пористостью 7–15%. Эксперименты проводили в манометрической бомбе и модельном ракетном двигателе. Использовали исходные частицы и частицы, покрытые по боковой поверхности пленкой поливинилбутираля в количестве 4.1%. На образцах с исходными частицами переход на конвективный режим происходит при близком к постоянному или слабо возрастающему давлении. Давление срыва послойного горения повышается с уменьшением пористости. Использование бронированных гранул приводит к увеличению длительности послойного горения. Переход послойного горения в конвективное происходит при падающем давлении. Давление срыва снижается с уменьшением пористости.

Ключевые слова: послойное горение, конвективное горение, пористость, бронированные частицы, поливинилбутираль.

DOI: 10.31857/S0207401X23030068, **EDN:** LYBUFH

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений увеличения дульной скорости метаемого тела является повышение плотности заряжания с применением высокоплотных зарядов, сгорающих в режиме конвективного горения и низкоскоростной детонации [1–4]. При низкоскоростной детонации развитие процесса происходит со скоростями 800–2200 м/с, что позволяет использовать ее в устройствах с временами работы до 1 мс [4]. При конвективном горении фронт пламени распространяется по имеющимся порам заряда с меньшими скоростями (0.5–700 м/с), что делает возможным его применение в ракетных двигателях и ствольных системах с временами работы в несколько миллисекунд [1]. Величину скорости и ее зависимость от давления можно регулировать за счет изменения пористости образцов, размера используемых частиц, покрытия их внешней поверхности инертной пленкой [3, 5]. Исследования [6] горения зарядов, спрессованных из крупных семиканальных пороховых зерен марки 5/7, ингибированных по боковой поверхности пленкой поливинилбутираля, показали возможность повышения прогрессивности горе-

ния пороха, улучшения заполнения индикаторной диаграммы давления, увеличения дульной скорости снаряда на 12% при неизменном максимальном давлении выстрела. Теоретическая модель конвективного горения высокоплотных зарядов, изготовленных из таких зерен, описана в работе [7]. Однако начальная стадия процесса – возникновение конвективного горения практически не исследовалась.

Многочисленные эксперименты по переходу послойного горения в конвективное проводились в 1960–1970-х годах на взрывчатых веществах (тротил, тэн, гексоген и др.), смесевых составах на основе перхлората аммония и калия и иницирующих веществах: гремучая ртуть, азид свинца с добавкой 2% парафина [8–10]. Размер используемых частиц варьировался от 5–20 до 500 мкм, удельная поверхность – от 500–700 до 7000–10000 см²/г. Пористость образцов изменялась от 3 до 50%, газопроницаемость – от 10⁻⁵ до 10⁻³ Д (Дарси, 1 Д ≈ 1 мкм²). Сжигание осуществлялось обычно в манометрических бомбах при возрастающем давлении в объеме, регистрация которого проводилась с помощью пьезокварцевых или тензометри-

Таблица 1. Результаты измерения газопроницаемости прессованных образцов из гранул пороха марки 5/7 и 5/7 + 4.1% ПВБ

Марка пороха	Газопроницаемость, Д					
	$m = 14\%$	$m = 13\%$	$m = 11\%$	$m = 10\%$	$m = 9.5\%$	$m = 8$
5/7	–	11	–	6	–	5
5/7 + 4.1% ПВБ	12	–	9	–	6	–

Примечание: m – пористость образца.

ческих датчиков давления на шлейфовых осциллографах с частотой не более 15 кГц. В отдельных опытах одновременно с записью давления проводили оптическую съемку процесса через прозрачные окна бомбы. При послойном горении скорость изменения давления в бомбе составляла 0.01–1.0 МПа/мс [10]. В качестве основной характеристики, определяющей возникновение конвективного горения, использовалось критическое давление срыва послойного горения (P_c). За его значение принималось давление на стадии послойного горения образца, после которого начинается резкое (в 4–7 раз и более) увеличение интенсивности его нарастания. Величина P_c зависит от состава, пористости, газопроницаемости, диаметра и длины заряда, размера используемых частиц. Был построен ряд устойчивости для изученных веществ, выявлено влияние плавления на величину давления срыва. На зерновых пироксилиновых порохах переход послойного горения в конвективное и влияние на него покрытия гранул полимерной пленкой практически не изучались. Настоящая работа частично восполняет указанный пробел.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на зарядах, спрессованных из гранул семиканального пироксилинового пороха марки 5/7 и из гранул того же пороха, бронированных по боковой поверхности пленкой поливинилбутирала (ПВБ). Количество полимера составляло 4.1%, расчетная толщина пленки – 35 мкм.

Размеры частиц пороха были следующими: наружный диаметр – 3.3 мм, длина – 4.7 мм, полутолщина горящего свода – 0.33 мм, диаметр канала – 0.3 мм. Внешняя удельная поверхность зерен – 10.5 см²/г, полная удельная поверхность, включая каналы, – 13.8 см²/г.

Характерные свойства ПВБ: плотность – 1.1 г/см³, температура размягчения – 65°C, температура начала интенсивного разложения ~300°C. Покрытие наносили из пятипроцентного спиртового раствора при непрерывном переме-

шивании с последующей сушкой до полного удаления спирта. Количество нанесенного полимера определяли по привесу массы.

Эксперименты проводили в манометрической бомбе объемом около 100 см³ и в модельном ракетном двигателе. Сжигания в бомбе осуществляли на образцах, приготовленных порционным прессованием ~4–5-граммовых навесок в металлические стаканчики с внутренним диаметром 20 мм и длиной 50 мм. Давление прессования изменялось от 60 до 140 МПа в зависимости от требуемой начальной плотности заряда. Высота образцов (L) составляла 21–24 мм, масса (M) – около 10 г, плотность (ρ) – 1.34–1.47 г/см³, пористость (m) – 7–15%. Измерения газопроницаемости показали, что ее величина не зависит от наличия пленки ПВБ на частицах и возрастает от 5 до 12 Д с увеличением пористости заряда от 8 до 14% (табл. 1).

В качестве воспламенителя использовали дымный ружейный порох (ДРП) с размером частиц <50 мкм и их массой от 0.04 до 0.23 г, который поджигали нихромовой спиралью. Изменяя количество ДРП, регулировали величину начального избыточного давления в объеме бомбы, которое регистрировали пьезокварцевыми датчиками AVL 2000 и Т6000 с частотой не менее 200 кГц. Система регистрации позволяла измерять давление с частотой до 400 кГц. Погрешность не превышала 5–8%.

Модельный ракетный двигатель (рис. 1) состоял из металлической оболочки 1 с внутренним каналом диаметром 19 мм, подсоединенной к дополнительному объему 3, составляющему около 300 см³. В верхней его части располагалось сопло 5 диаметром 6 или 10 мм. Образцы 2 высотой 87–88 мм и пористостью 10–12% готовили методом порционного прессования навесок массой около 7 г в канал оболочки. В качестве воспламенителя 4 применялась смесь, состоящая из дымного (1 г) и пироксилинового (2–2.5 г) порохов. Датчиками Т6000 измерялось давление в объеме бомбы (D1), в канале над зарядом (D2) и на глубине 40 (D3) и 85 мм (D4). По записям кривых зависимости $p(t)$

определялись давление (p) и время (t) возникновения послойного и конвективного горения.

В манометрической бомбе давление (P_b) и время (t_b), при которых начинается послойное горение, определялись по моменту расхождения кривых зависимости $p(t)$ при сгорании в одинаковых условиях воспламенителя с образцом из инертного состава и исследуемого заряда. На кривых зависимости $p(t)$ этот момент обозначался буквой B . В качестве инертного образца использовался песок с размером частиц меньше 200 мкм, плотностью 1.51–1.52 г/см³, высотой ~21.5 мм и массой 10.3 г. Развитие послойного горения до перехода на конвективное происходило при нарастающем, спадающем или близком к постоянному давлению в бомбе. Дифференцированием кривой зависимости $p(t)$ определялась интенсивность изменения давления во времени, dp/dt . Рассчитывалось ее среднее значение $(\Delta P/\Delta t)_{cp}$ в интервале $\Delta t = t_2 - t_1$ на обеих стадиях по формуле

$$(\Delta P/\Delta t)_{cp} = (P_2 - P_1)/(t_2 - t_1). \quad (1)$$

При нарастающем давлении значение интенсивности будет со знаком “плюс”, при спадающем — со знаком “минус”. Возникновение конвективного режима определялось по началу увеличения интенсивности нарастания давления $p(t)$. Наряду с резким изменением интенсивности наблюдалось и плавное ее повышение. За величину давления срыва послойного горения принималось давление на стадии послойного горения, после которого среднее значение $(\Delta P/\Delta t)_{cp}$ возрастало в 4 и более раза по сравнению с $(\Delta P/\Delta t)_{cp}$ при послойном горении. На записях кривых зависимости $p(t)$ этот момент обозначался буквой S с координатами P_c и t_c . Интегрированием кривой $p(t)$ в пределах от 0 до t_c вычислялись значения импульсов давления (I_c) газов, $\int p(t)dt$ (в МПа · мс), к началу конвективного горения.

В модельном ракетном двигателе опытов с заменой активного заряда на инертный не проводилось. После сгорания воспламенителя давление в бомбе в течение некоторого времени — от t_1 до t_2 снижалось по экспоненциальному закону из-за истечения образовавшихся продуктов через сопло и их охлаждения за счет теплопотерь в стенки бомбы. Определялись параметры этой экспоненты, проводилась ее аппроксимация на последующие времена. Время t_b , когда давление в объеме начинало снижаться слабее, чем по экспоненте, принималось за начало послойного горения, которое возникало при соответствующем этому времени давлении P_b . За начало конвективного режима принимался момент изменения интенсивности горения с отрица-

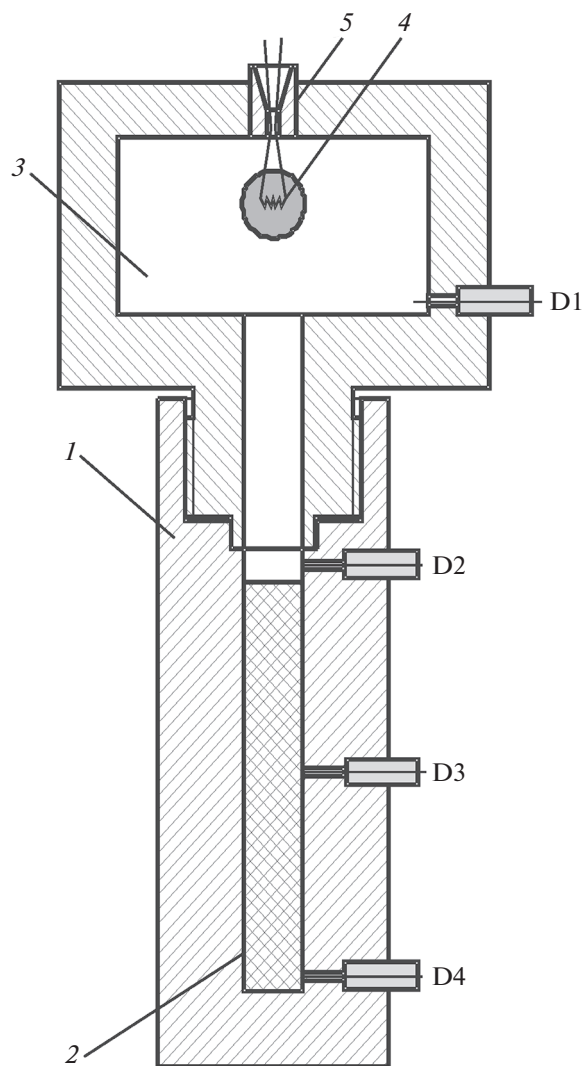


Рис. 1. Схема модельного ракетного двигателя: 1 — металлическая оболочка; 2 — исследуемый образец; 3 — свободный объем; 4 — воспламенитель; 5 — сопло; D1, D2, D3, D4 — датчики давления.

тельным градиентом на положительный, после которого ее значение возрастало в 4–7 раз и более.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования в манометрической бомбе проводили при давлениях воспламенителя $P_i \approx 0.5$ – 0.75 МПа. В этих условиях горение образцов начиналось в послойном режиме. При меньшем P_i они не воспламенялись, давление после достижения максимума снижалось из-за охлаждения газов за счет тепловых потерь в стенки бомбы и металлический стаканчик (рис. 2, кривая 1, опыт № 988). При большем $P_i \sim 0.9$ МПа конвективный режим возникал на стадии сгорания воспламе-

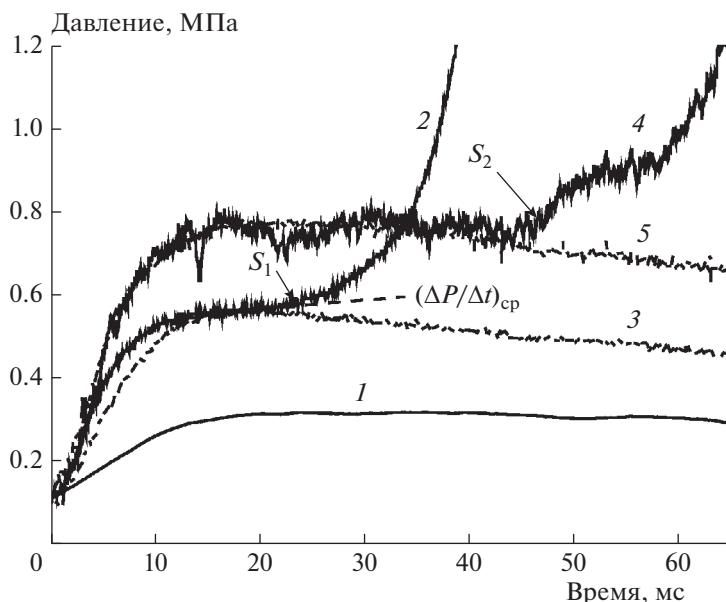


Рис. 2. Записи давление—время в манометрической бомбе при сгорании воспламенителя с инертным составом, создающего давление: 0.3 (1), 0.5 (3), 0.75 МПа (5), и при переходе послойного горения в конвективное образцов, спрессованных из зерен пороха марки 5/7 с пористостью 15 (2), 8% (4) — опыты № 987 и № 976 соответственно.

нителя без заметного протекания послойного горения.

Послойное горение образца с $m = 14\%$ из исходных частиц (рис. 2, кривая 2, опыт № 987) началось на стадии сгорания воспламенителя (кривая 3, опыт № 983) при давлении ~ 0.5 МПа и протекало при нарастающем градиенте $(\Delta P/\Delta t)_{\text{ср}} \sim 0.007$ МПа/мс. Резкого увеличения скорости подъема давления при возникновении конвективного горения не фиксировалось, что связано, по-видимому, с большей разрешающей способностью системы измерения по времени (на порядок и более) по сравнению с ранее проведенными исследованиями [8–10]. Скорость нарастания давления начала превышать 0.007 МПа/мс при $P_c = 0.57$ МПа и $t_c = 22$ мс (точка S_1), и через 10 мс ее значение выросло в 4 раза — до 0.03 МПа/мс. Такое изменение, согласно ранее проведенным работами, показывает, что развитие конвективного горения началось при указанных выше значениях P_c и t_c .

Воспламенение заряда с $m = 8\%$ (рис. 2, кривая 4, опыт № 976) происходило при увеличенном до ~ 0.75 МПа начальном давлении воспламенителя (кривая 5). Послойное горение началось на стадии его сгорания и протекало при постоянном (усредненным по пульсациям) давлении. При времени 45 мс скорость его подъема выросла до 0.05 МПа/мс, что указывает на переход в конвективный режим. В дальнейшем (в интервале от 49

до 58 мс) наблюдается снижение интенсивности нарастания давления $p(t)$, связанное с диспергированием конгломератов образца и частичным прекращением их горения [8, 5]. В дальнейшем рост dp/dt возобновляется.

Сравнивая полученные результаты, следует отметить, что на зарядах, спрессованных из гранул пороха марки 5/7, уменьшение пористости от 14 до 8% привело к росту давления P_c с 0.57 до 0.75 МПа и увеличению времени протекания послойного горения до перехода в конвективное с 22 до 45 мс.

Инициирование горения образцов пороха из бронированных гранул осуществлялось при давлении воспламенителя ~ 0.7 МПа. При $m = 15\%$ расхождение кривых зависимости $p(t)$ от сгорания заряда (рис. 3, кривая 1, опыт № 872) и воспламенителя (кривая 3) произошло при времени 50 мс (точка B_1). В последующем наблюдалось снижение давления продуктов сгорания заряда, которое протекало слабее, чем снижение давления продуктов сгорания воспламенителя. Развивалось послойное горение. Оно протекало при падающем от 0.7 до 0.6 МПа давлении. Градиент dp/dt возрастал от -0.002 (58 мс) до 0.000 МПа/мс (134 мс). Среднее значение темпа его увеличения составило $0.002/76 = 0.000026$ МПа/мс². При времени 134 мс начался подъем давления со скоростью от 0.000 (134 мс) до 0.001 МПа/мс² (144 мс). Нарастание dp/dt в единицу времени увеличилось до 0.0001 МПа/мс², что в 4 раза выше, чем при по-

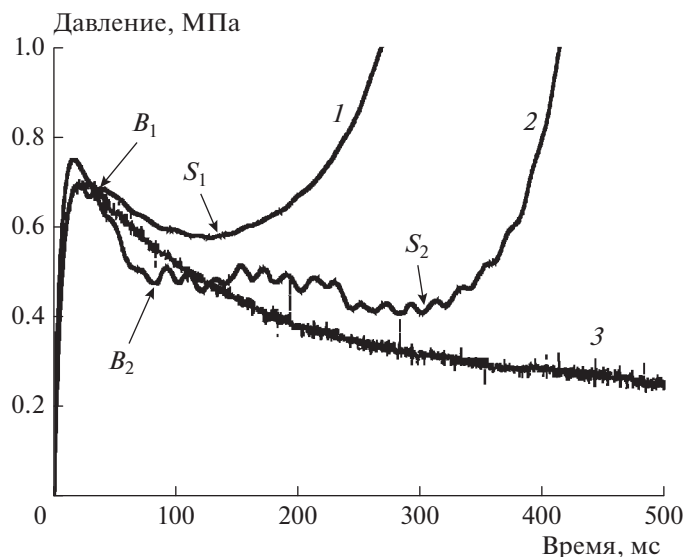


Рис. 3. Диаграммы давление–время в манометрической бомбе при переходе послойного горения в конвективное зарядов из бронированных зерен пороха марки 5/7 с пористостью: 1 – 15% (опыт № 872), 2 – 7% (опыт № 977), 3 – при сгорании воспламенителя с инертным составом, создающего давление 0.7 МПа.

слоином горении. Последующий рост давления протекал с большей интенсивностью. Приведенные данные указывают, что при $P_c = 0.6$ МПа и $t_c = 134$ мс произошел переход послойного горения в конвективное.

На образцах с пористостью 7% снижение давления $p(t)$ после сгорания воспламенителя (кривая 2 рис. 3) сначала происходит интенсивнее, чем снижение $p(t)$ продуктов сгорания инициатора (кривая 3). Возможно, это связано с увеличенными потерями на прогрев и удаление пленки ПВБ, плотность которой, по-видимому, возросла при увеличении давления прессования заряда. При давлении ~ 0.5 МПа (84 мс, точка B_2) скорость падения $p(t)$ стала меньше, чем для воспламенителя. Началось послойное горение заряда, которое до времени 175 мс проходило при давлении, близком к постоянному среднему давлению. Дальнейшее (до времени ~ 300 мс) его развитие протекало при снижении $p(t)$ до 0.4 МПа со средним значением $\Delta p/\Delta t = -0.0005$ МПа/мс. При времени 304 мс (точка S_2 на кривой 2 рис. 3) давление начало возрастать. Величина $\Delta p/\Delta t$ в интервале времени от 300 до 350 мс составила $+0.002$ МПа/мс, что в четыре раза выше темпа снижения давления. Последующее увеличение $p(t)$ происходило с большей скоростью. Переход от падающего давления к возрастающему, увеличение интенсивности его подъема показывает, что при давлении 0.4 МПа (304 мс) появилось конвективное горение.

Использование в образцах бронированных гранул привело к увеличению времени послойно-

го горения и протеканию последнего при падающем давлении. Конвективный режим начался при давлении ниже создаваемого воспламенителем, а его величина снижалась с уменьшением пористости.

Последний результат отличается от полученного ранее [8] на образцах гексогена пористостью

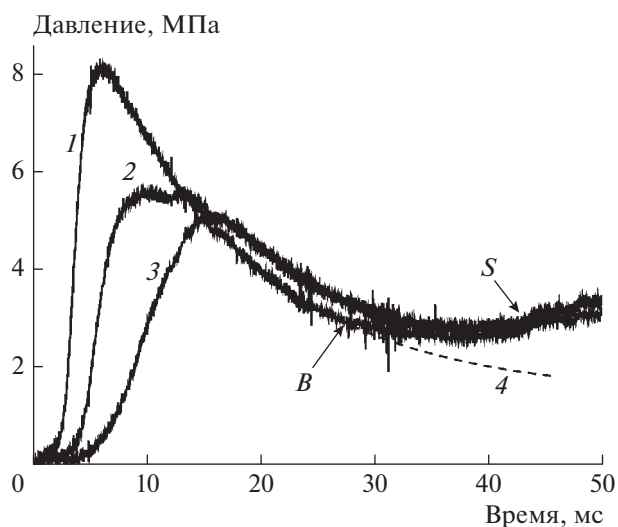


Рис. 4. Изменение давления во времени в модельном ракетном двигателе (опыт № 904): 1 – над образцом из гранул пороха состава 5/7 + 4.1% ПВБ с $m = 12\%$; 2, 3 – на глубине 40 и 85 мм при возникновении конвективного горения; 4 – кривая экстраполяции падения давления в объеме бомбы (I) при 10–26 мс, продолженная до 45 мс.

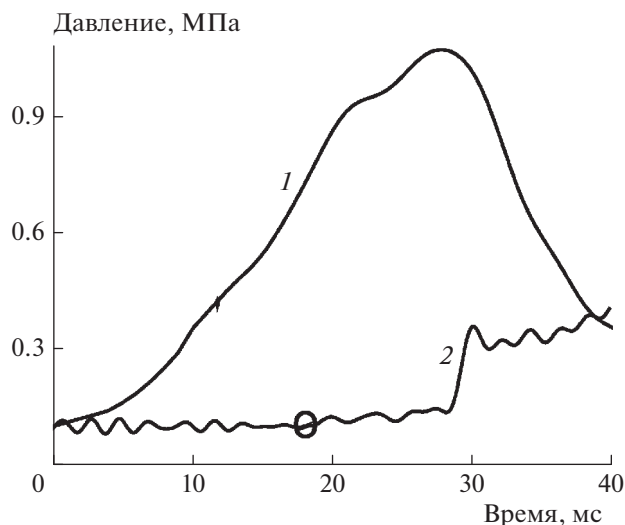


Рис. 5. Записи давление—время в модельном ракетном двигателе (опыт № 969): 1 — над торцом заряда из гранул пороха марки 5/7 с $m = 10\%$, 2 — на глубине 39 мм при фильтрации продуктов сгорания воспламенителя.

от 10 до 50% и размером частиц 200 мкм. Покрытие их парафином в количестве 10% не повлияло на величину критического давления срыва. Вероятно, это связано с меньшей толщиной пленки (3 мкм) и низкой термостойкостью парафина.

В условиях модельного ракетного двигателя возникновение послышного и конвективного горения образцов с близкими значениями пористости происходило при повышенных, по сравнению с условиями сжигания в манометрической бомбе, начальных давлениях. При давлении ~ 1.1 МПа горения образца из небронированных частиц с $m = 10\%$ не возникало. Для воспламенения заряда с $m = 12\%$ из бронированных гранул давление воспламенителя пришлось увеличить до ~ 8 МПа (рис. 4, кривая 1, опыт № 904).

После достижения максимального значения давление в бомбе в интервале времени от 7.5 до 26 мс снижалось до 3 МПа по экспоненциальному закону:

$$P = 109 \exp(-t/13.7) + 13.5. \quad (2)$$

Происходили истечение продуктов сгорания воспламенителя через сопло и их охлаждение за счет теплоотдачи в стенки установки.

Экстраполяцией указанной зависимости на время до 45 мс (рис. 4, кривая 4) установлено, что при времени 27.5 мс и давлении 2.9 МПа (точка В) давление в бомбе начинает превышать давление продуктов сгорания воспламенителя. Возникает послышное горение, которое протекает при пада-

ющем давлении. Скорость его снижения уменьшается от -0.1 МПа/мс при 27.5 мс до 0 при 36 мс. Средняя скорость изменения $(\Delta P/\Delta t)_{\text{ср}}$ составила ~ 0.01 МПа/мс². При времени 39 мс (2.6 МПа) давление начинает повышаться. Градиент dp/dt за 3 мс увеличился от 0 до 0.2 МПа/мс со средней скоростью ~ 0.07 МПа/мс², что 7 раз выше, чем при послышном горении. Отмеченное изменение в интенсивности повышения давления указывает на то, что в этот момент (39 мс, 2.6 МПа) возникло конвективное горение.

Увеличение давления, при котором начинается послышное и конвективное горение в модельном ракетном двигателе, возможно, обусловлено следующими причинами: 1) изменением состава воспламенителя: в манометрической бомбе использовался ДРП, при сгорании которого образуется большое количество раскаленных частиц; в двигателе использовалась смесь из одной части ДРП и двух-пяти частей пироксилина или пироксилинового пороха “Сокол”, в продуктах сгорания которой таких частиц меньше; 2) увеличением объема установки и возможностью истечения продуктов сгорания через сопло. Для выяснения влияния перечисленных факторов требуется проведение дополнительных исследований.

Записи давления в двигателе над зарядом (кривая 1 на рис. 4) и на глубине 40 (кривая 2) и 85 мм (кривая 3) показывают, что к моменту возникновения конвективного горения давление в порах совпадает с давлением над торцом заряда, т.е. произошло заполнение его пор по всей длине продуктами сгорания воспламенителя. Для проверки степени заполнения пор заряда продуктами сгорания воспламенителя к началу конвективного горения в условиях манометрической бомбы были проведены эксперименты в модельном двигателе с образцом пористостью $m = 10\%$, спрессованным из небронированных частиц, при начальном давлении ~ 1.1 МПа. Его газопроницаемость близка к газопроницаемости образца с пористостью $m = 8\%$ (табл. 1). Состав не воспламенился. Произошла только фильтрация продуктов сгорания воспламенителя на длину от 40 до 80 мм (рис. 5). Ее передний фронт зафиксировался на длине в 40 мм при времени 18 мс (отмечено кружком на кривой 2 рис. 5), а при времени 40 мс давление в порах сравнялось с давлением над торцом. Датчик на глубине в 80 мм подъем $p(t)$ не записал.

Образцы в манометрической бомбе были короче: 21–24 мм. Соответственно, фильтрация на эту длину пройдет за меньшее время, выравнивание давлений произойдет быстрее, и к моменту

возникновения конвективного горения в зарядах из небронированных частиц с $m = 8\%$ (45 мс) давления в порах и в объеме будут одинаковыми.

Газопроницаемость образцов с $m = 15\%$ примерно в 2 раза больше, скорость фильтрации в них выше. Время ее распространения по всему заряду сократится, и выравнивание давления произойдет быстрее.

При нанесении поливинилбутираля на поверхность частиц время до возникновения конвективного горения увеличивается. При одинаковой газопроницаемости зарядов выравнивание давления будет происходить за те же времена, что и для образцов из небронированных гранул, т.е. до начала конвективного горения.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что к моменту начала конвективного горения в манометрической бомбе в образцах из исходных и бронированных зерен пороха 5/7 их поры заполнены продуктами сгорания воспламенителя до давления, близкого к давлению в объеме. Существуют противоречивые данные о влиянии заполнения пор инертным газом на возникновение и развитие конвективного горения. В исследованиях [9, 10] показано, что предварительное заполнение пористых образцов ($m = 24\%$) мелкозернистого тэна (размер частиц – 20 мкм) инертным газом – азотом в 10–15 раз повышает давление срыва послыного горения и снижает скорость распространения конвективного режима. В работе [5] на низкопористых зарядах ($m = 5\%$) из гранул смесового топлива с размером частиц 0.96 мм, бронированных 5% парафина, предварительное заполнение пор продуктами сгорания воспламенителя не повлияло на величину скорости конвективного горения при начальном давлении ~ 18 МПа. По-видимому, предварительное заполнение пор азотом и фильтрующимися в процессе опыта продуктами сгорания воспламенителя не одинаково влияет на возникновение и развитие конвективного горения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В большинстве работ по изучению перехода послыного горения в конвективное в манометрической бомбе основное внимание уделялось определению давления, при котором он происходит, влиянию на него состава, размера частиц, газопроницаемости и пористости образца. Динамику протекания процесса практически не рассматривали. Однако анализ изменения кривой зависимости $p(t)$ до времени t_c позволяет оценить, как меняется величина поверхности послыного горения до начала конвективного режима.

Постоянство давления при горении образцов из исходных гранул при $m = 8\%$ (кривая 4 рис. 2) показывает, что его подъем в результате поступления газов компенсируется снижением из-за их фильтрации в поры заряда и охлаждения, связанного с нагревом поверхности бомбы и стаканчика с зарядом. Скорость послыного горения в этом случае остается неизменной, количество поступающих газов также не меняется, что указывает на протекание горения с постоянной величиной поверхности.

Послыное горение заряда с большей пористостью $m = 14\%$ (кривая 2 рис. 2) начинается при меньшем давлении, которое повышается со временем. В этом случае потери тепла ниже его поступления от продуктов горения. Количество последних возрастает по мере протекания процесса. Давление, при котором развивается послыное горение, ниже по сравнению с давлением, при котором горят образцы с $m = 8\%$, и скорость горения ниже. С учетом этих факторов повышение давления со временем определяется увеличением поверхности горения.

При использовании бронированных гранул время до возникновения послыного горения увеличилось (рис. 2, 3). Полимерная пленка препятствует передаче тепла от продуктов сгорания воспламенителя к поверхности пороха. Для его поджигания требуется сначала нагреть и удалить пленку (хотя бы в отдельных очагах), создать на поверхности пороха нужные для воспламенения

Таблица 2. Результаты экспериментов в манометрической бомбе и расчета импульса давления I_c к началу конвективного горения

№ опыта	Состав	M , г	L , мм	ρ , г/см ³	m , %	P_c , МПа	t_c , мс	$(\Delta P/\Delta t)_{cp}$, МПа/мс	I_c , МПа · мс
987	5/7	10.2	23.5	1.38	14	0.57	22	0.007	10.7
976	5/7	9.95	21.5	1.47	8	0.75	45	0	31.4
872	5/7 + 4.1% ПВБ	10.2	24.1	1.34	15	0.6	134	-0.001	81.5
977	5/7 + 4.1% ПВБ	10.0	21.7	1.46	7	0.4	304	-0.0005	151.7

толщину прогретого слоя и температуру, что требует дополнительного времени. Воспламенение пороха происходит в отдельных очагах с низкой поверхностью горения. Поступающее с продуктами горения тепло не компенсирует потерь на нагрев стенок бомбы, стаканчика, удаление пленки с пороха. В результате газы охлаждаются и давление в бомбе снижается. С течением времени очаги разгораются, их поверхность возрастает, поступление газов и тепла увеличивается, падение давления замедляется. Проникновение горения в поры заряда приводит к существенному (в несколько раз) увеличению поверхности горения, снижение давления сменяется ростом и возникает конвективное горение. С уменьшением пористости длительность послынного горения увеличивается, конвективный режим начинается при меньшем давлении P_c .

Объяснение возникновения конвективного горения при падающем давлении приведено в работе [11], где показана возможность самопроизвольного проникания горения в пору шириной ~ 0.1 мм из пластин вторичного ВВ (гексогена) и оргстекла при отрицательных градиентах давления ($-0.5, -1.5$ МПа/с).

Сравнение устойчивости энергетических материалов к переходу послынного горения в конвективное в настоящее время проводится по значениям давления срыва, полученным в манометрической бомбе при одинаковых условиях сжигания, размерах частиц и образцов, и значениях их газопроницаемости [10]. Считается, что составы с увеличенными значениями P_c обладают большей устойчивостью. Длительность послынного горения и интенсивность изменения давления при его протекании не учитываются. По этому критерию заряды из бронированных гранул пироксилинового пороха марки 5/7, имеющие более низкие по сравнению с образцами из исходных гранул значения P_c , менее устойчивы к переходу послынного горения в конвективное. Однако их воспламенение происходит с увеличенной задержкой; при этом возрастает длительность послынного горения, уменьшаются его поверхность и интенсивность, что приводит к распространению горения при падающем давлении (рис. 3). Для сравнения устойчивости образцов предлагается дополнительно учитывать значения импульса давления I_c при одинаковых или близких условиях их сжигания в манометрической бомбе, рассчитанные к началу конвективного горения. Чем они больше, тем выше устойчивость. Эти значения для исследуемых составов приведены в табл. 2. Увеличение плотности зарядов, использование в них частиц,

покрытых пленкой полимера, приводит к возрастанию I_c , что свидетельствует о повышении их устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Послойное горение образцов из гранул пироксилинового пороха марки 5/7 в манометрической бомбе развивается при близком к постоянному или слабо возрастающем давлении. Увеличение пористости с 8 до 14% приводит к снижению давления, при котором оно начинается, увеличению интенсивности его протекания, уменьшению времени и давления возникновения конвективного режима.

2. Использование в зарядах гранул, бронированных поливинилбутиралем, увеличивает задержку возникновения послынного горения, снижает интенсивность горения, которое протекает при падающем давлении. Возрастает время и уменьшается давление перехода на конвективный режим. Величина давления повышается с увеличением пористости.

3. В манометрической бомбе и в модельном ракетном двигателе конвективное горение начинается при заполнении пор образцов по всей длине продуктами сгорания воспламенителя до давления, близкого к давлению над торцом заряда.

4. Пороговые значения давлений возникновения послынного и конвективного горения в зарядах с близкими значениями пористости зависят от условий сжигания — в манометрической бомбе они ниже, чем в модельном ракетном двигателе.

5. Показана возможность возникновения, протекания и перехода послынного горения в конвективное на зарядах из бронированных частиц при интенсивности снижения давления на ~ 2 порядка выше, чем в манометрической бомбе.

Автор выражает благодарность главному научному сотруднику А.А. Сулимову за полезные замечания, сделанные при подготовке статьи.

Работа выполнена за счет субсидирования, выделенного ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 49.2300822018-0004 (регистрационный номер ААААА18-1180331590088-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Королев В.П., Михайлов Ю.М. и др. // Матер. 2-й Всерос. конф. "Энергетические конденсированные системы". Черногетовка: ИПХФ, 2004. С. 226.
2. Комиссаров П.В., Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 21; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080063>

3. Храповский В.Е., Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 8; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21010040>
4. Ермолаев Б.С., Романьков А.В., Сулимов А.А., Храповский В.Е. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 57; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21040063>
5. Храповский В.Е., Сулимов А.А. // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24. № 2. С. 39.
6. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Храповский В.Е. и др. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 5. С. 47; <https://doi.org/10.7868/S0207401X15050040>
7. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Беляев А.А. и др. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 1. С. 84.
8. Боболев В.К., Карпунин И.А., Чуйко С.В. // Науч.-технич. пробл. горения и взрыва. 1965. № 1. С. 44.
9. Андреев К.К., Чуйко С.В. // ЖФХ. 1963. Т. 37. № 6. С. 1304.
10. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
11. Боболев В.К., Марголин А.Д., Чуйко С.В. // Докл. АН СССР. 1965. Т. 162. С. 388.