

УДК 532.5

**КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ МАЛОПОРИСТЫХ БЛОЧНЫХ ЗАРЯДОВ  
В ИМПУЛЬСНЫХ СОПЛОВЫХ УСТРОЙСТВАХ**

© 2007 г. А. А. Сулимов, Б. С. Ермолаев, В. Е. Храповский

*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова**Российской академии наук, Москва**E-mail: bse@center.chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 08.06.2007

Проведено экспериментальное изучение конвективного горения малопористых блочных зарядов в импульсных сопловых устройствах с коротким временем работы. Измерения включали фотографическую регистрацию скорости распространения фронта реакции, пьезометрическую регистрацию диаграмм давление–время в двигателе и определение удельного импульса тяги для контроля полноты горения с помощью баллистического маятника. В опытах использовали заряды с относительной плотностью 0.9–0.95, изготовленные прессованием из зернового пироксилинового пороха или смесового пороха на основе перхлората аммония. Показано, что с помощью высокоплотных зарядов конвективного горения можно получать диаграммы давления длительностью 1–5 мс пикообразной формы и длительностью от 10 мс и более платообразного вида с воспроизводимыми баллистическими характеристиками при удельном импульсе тяги выше 200 с и плотностях заряжения до 0.8–1.2 г/см<sup>3</sup>. По результатам опытов обсуждаются приемлемые условия работы соплового устройства, режимы и скорости конвективного горения, способы регулирования баллистических характеристик и полноты горения.

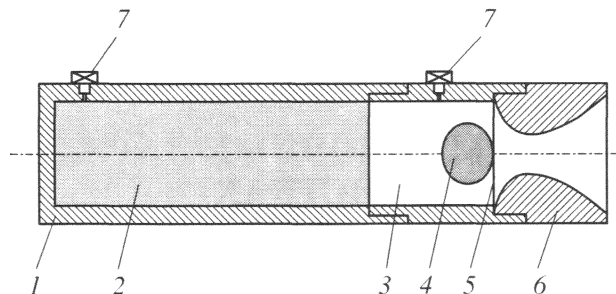
**ВВЕДЕНИЕ**

Исследования свойств конвективного горения и способов его стабилизации, суммированные в [1], привели к пересмотру традиционного отношения к этому процессу, который ранее считался неуправляемым и склонным к самоускорению. Возможность регулировать уровень скорости конвективного горения и ее изменение по длине заряда явилась отправной точкой для поисков эффективного применения конвективного горения, прежде всего, в импульсных устройствах различного назначения, которые дали позитивные результаты. Так, баллистические исследования, проведенные с блочными, высокоплотными зарядами конвективного горения (ВЗКГ), показали заметный прирост характеристик выстрела, достигаемый благодаря одновременному повышению плотности заряжения и прогрессивности горения в ствольных устройствах [2–9]. В этих работах был предложен и опробован новый подход, позволяющий управлять процессом горения за счет ингибирования тонкими пленками инертных материалов поверхности пороховых гранул, из которых прессовался заряд, разработаны физические и численные модели процесса и методы получения исходных данных, необходимых для адекватного численного моделирования выстрела.

Данная статья посвящена экспериментальному изучению конвективного горения высокоплотных пороховых зарядов торцевого горения в

модельных импульсных ракетных двигателях. Хотя условия горения в импульсных сопловых и ствольных устройствах примерно одинаковы по уровню давлений (сотни МПа) и временам работы (от единиц до нескольких десятков миллисекунд), имеются различия, связанные, главным образом, с обеспечением полноты горения. Чтобы пороховая взвесь, образующаяся за фронтом волны конвективного горения, полностью сгорела в камере сгорания данного устройства, время горения взвеси  $t_p$  должно быть меньше, чем характерное время пребывания продуктов горения в камере  $t_v$ . В отличие от ствольных систем, где время пребывания может быть увеличено за счет длины ствола или массы метаемого тела, в сопловых устройствах время  $t_v$  связано с габаритами двигателя, и достижение полноты горения представляет значительную трудность. Чтобы решить эту проблему без существенного снижения плотности заряжения, можно воздействовать на время горения взвеси  $t_p$ , уменьшая его за счет повышения давления, уменьшения размера пороховых частиц или использования пороха с высокой скоростью послойного горения. В этом случае, однако, приходится считаться с опасностью чрезмерного роста скорости конвективного горения и возникновения взрывных режимов.

Еще один круг вопросов, требующих экспериментального изучения, связан с тем, что даже при коротких временах работы для достижения наи-



**Рис. 1.** Схема модельного импульсного соплового устройства:

1 – корпус камеры с цилиндрическим каналом, 2 – блочный пороховой заряд с бронированным покрытием, 3 – предсопловая полость, 4 – иницирующий заряд с электровоспламенителем, 5 – форсажная мембрана, 6 – сопловой блок, 7 – датчики давления.

лучших характеристик соплового устройства желательнее, чтобы диаграмма давление–время в камере сгорания имела характерную платообразную форму. Применительно к конвективному горению это накладывает следующие ограничения на скорость конвективного горения: она не должна быть слишком большой, с тем чтобы время распространения горения на всю длину заряда было много больше времени горения взвеси диспергированных частиц; зависимость скорости конвективного горения от давления в камере не должна быть сильной, соответствующий показатель степени по давлению заметно ниже 1 в отличие от показателя степени по давлению в законе скорости послойного горения пороховых частиц (на него ограничение не накладывается).

В настоящее время в ракетных двигателях с коротким временем работы находят применение быстрогорящие тонкосводные пороха, сжигаемые в режиме послойного горения при низкой плотности заряжания [10]. Возможность использования высокоплотных зарядов конвективного горения практически не изучалась; в литературе по этому вопросу имеется очень скудная информация [5, 11]. В данной статье, которая устраняет этот пробел, приводится экспериментальный материал по конвективному горению высокоплотных зарядов в импульсных сопловых устройствах. Этот материал, помимо информации о баллистических характеристиках, полученных при варьировании свойств пороха, размеров порохового заряда и параметров сопловой установки, содержит также данные о скоростях распространения конвективного горения и догорания пороховой взвеси за фронтом пламени в импульсных условиях. Измерения включают фотографическую регистрацию скорости распространения фронта реакции, пьезометрическую регистрацию диаграмм давление–время в двигателе и определение удель-

ного импульса тяги для контроля полноты горения с помощью баллистического маятника. В опытах использовали ВЗКГ, изготовленные прессованием при комнатной температуре зернового пироксилинового пороха или смешанного пороха на основе перхлората аммония. Исследование показало, что с помощью ВЗКГ можно получать диаграммы давления длительностью 1–5 мс пикообразной формы и длительностью от 10 мс и более платообразного вида с воспроизводимыми баллистическими характеристиками при удельном импульсе тяги выше 200 с и плотностях заряжания до 0.8–1.2 г/см<sup>3</sup>. По результатам опытов обсуждаются приемлемые условия работы соплового устройства, режимы и скорости конвективного горения, способы регулирования баллистических характеристик и полноты горения.

## УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты с измерением импульса тяги и давления в камере проводили в сопловой установке, схема которой дана на рис. 1. Цилиндрическая камера была изготовлена из высокопрочной, термически обработанной стали и имела два отверстия под датчики давления. Между камерой и сопловым блоком размещалась форсажная мембрана (дюраль Д-16 толщиной 0.5–1 мм), срез мембраны происходил при давлении 50–100 МПа за время 0.1–0.2 мс. Исследуемый вкладной заряд бронировали по боковой поверхности, кроме воспламеняемого торца, и плотно без зазоров вводили в канал камеры. Воспламенитель размещался в предсопловой полости канала, которая в процессе горения заряда играла роль дожигательного объема. Для изучения влияния условий проведения опытов размеры установки изменяли в следующих пределах: внутренний диаметр камеры – от 15.5 до 40.5 мм, длину канала – от 83 до 208 мм, степень поджатия сопла (отношение площади сечения канала к площади критического сечения сопла,  $S_0/S_{cr}$ ) – от 2.25 до 8.9, степень расширения сопла (отношение площадей выходного и критического сечений сопла,  $S_e/S_{cr}$ ) – от 1 до 11.7, угол расширения сопла – от 10 до 50°.

Давление в камере измеряли с помощью высокочастотных пьезоэлектрических датчиков типа Kistler, сохраняющих работоспособность при пиковых нагрузках, которые в отдельных опытах могли достигать 800–900 МПа. Сигналы с пьезодатчиков поступали на усилитель и регистрировались на приборе ПИД-9. Для измерения импульса тяги использовали баллистический маятник, который представлял собой груз массой от 35 до 450 кг, подвешенный на 4 стальных тросах длиной 4.5 м, верхние концы которых попарно крепились к внешним кольцам двух шарикоподшипников, установленных на неподвижной горизонтальной оси.

Груз имел форму штанги, на которую для увеличения массы надевали сменные свинцовые диски и к которой с помощью переходного узла крепили сопловую установку. Отклонение маятника регистрировали с помощью измерительной планки. Маятник позволял измерять полный импульс тяги в диапазоне от 10 до 1000 Н·с с погрешностью около 1%. При определении величины удельного импульса тяги делали поправку на импульс тяги, создаваемый в результате сгорания воспламенителя. Соответствующую величину определяли в дополнительных опытах, когда в камеру вместо исследуемого заряда помещали инертный имитатор.

Для определения скорости распространения фронта горения вдоль заряда использовалась сопловая установка внутренним диаметром 15.5 мм, которая отличалась от установки, показанной на рис. 1, лишь тем, что ее боковая поверхность помимо двух отверстий под датчики давления имела ряд дополнительных сквозных отверстий диаметром 1 мм. Скорость определяли по фоторазверткам свечения продуктов, истекающих через эти отверстия, с помощью фоторегистратора. Для синхронизации фоторегистрограммы и записей давления отверстие и датчик давления вблизи дна камеры располагались в одном сечении напротив друг друга.

Для изготовления ВЗКГ использовали смешанной модельный порох на основе перхлората аммония (средний размер частиц 0.15 мм), который содержал 20% инертного термопластичного горючего связующего (порох "А") и мелкозернистый одноканальный пироксилиновый порох (порох "С"). Частицы пороха "А" имели цилиндрическую форму с высотой, равной диаметру, или форму параллелепипеда с эффективным диаметром (отношение объема частицы к ее поверхности, умноженное на 6), равным 5.0, 1.9, 0.9 и 0.66 мм соответственно. Использовались также частички, полученные измельчением пороховой стружки, размером менее 0.2 мм. Частицы пороха "С" имели внешний диаметр 0.52 мм, канал диаметром 0.1 мм и длину 0.5 мм. Помимо частиц исходного вида, применялись также частицы пороха "А", покрытые по наружной поверхности тонкой пленкой парафина методом осаждения из раствора в бензине с последующей сушкой, и зерна пороха "С", покрытые осаждением из спиртового раствора пленками поливинилбутираля. Из частиц пороха прессовали таблетки высотой, равной одному или двум диаметрам (при двухстороннем прессовании), до заданной плотности без подогрева. Несколько таблеток собирали в столбик нужной высоты и бронировали по боковой поверхности тонким слоем эпоксидной смолы.

Горение заряда инициировали со стороны сопла воспламенителем (дымный порох + пироксилин),

создающим начальное давление, превышающее давление срыва послойного горения (10–30 МПа). В результате инициирования возникало конвективное горение, которое распространялось по длине заряда.

Было проведено несколько серий экспериментов, в которых помимо изменения свойства заряда за счет марки пороха, размера частиц пороха и наличия ингибирующей добавки варьировались также геометрические размеры заряда и камеры, параметры соплового блока и плотность заряжения (отношение массы заряда к объему камеры сгорания). Относительную плотность (пористость) зарядов во всех опытах поддерживали примерно постоянной на уровне 0.9–0.92 (8–10%) для пороха "А" и 0.93–0.95 (5–7%) для пороха "С".

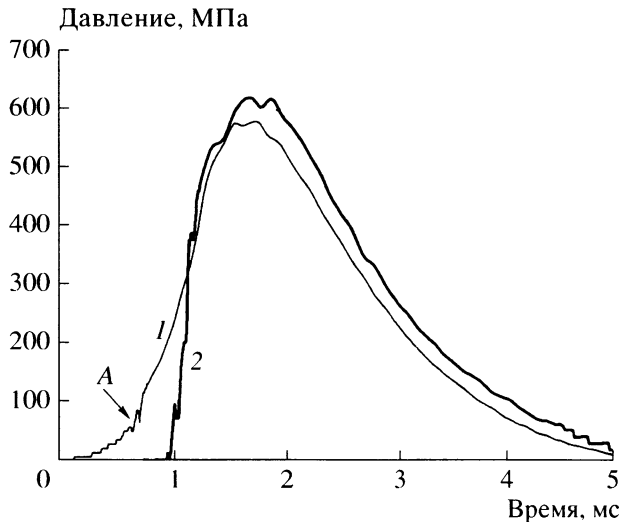
Согласно анализу под микроскопом и механическим испытаниям, блочные заряды, использованные в данных опытах, обладали равномерной пористой структурой и по прочностным характеристикам не сильно уступали сплошному пороху.

Конвективное горение порохов "А" и "С" в квазистационарном режиме (процесс, распространяющийся с примерно постоянной по длине заряда скоростью в условиях почти постоянного давления) изучалось нами ранее в установках с большим дожигательным объемом [1]. Имеются также данные по послойному горению этих порохов при высоких давлениях и по склонности к детонации. Оба пороха относятся к порохам с нормальным уровнем скорости послойного горения, величина которого составляет 100–120 мм/с при давлении 100 МПа при показателе степени по давлению около 1. Порох "А" в зарядах указанной относительной плотности с частицами размером 1.9 мм имеет критическое давление срыва послойного горения  $P_{cr} = 1$  МПа; в случае мелких частиц размером 0.2 мм  $P_{cr}$  возрастает до 10 МПа. Для инициирования низкоскоростной детонации требуются давления 1.1 и 0.8 ГПа соответственно. Заряды пороха "А" диаметром 40 мм и менее, даже заключенные в прочные стальные оболочки, не детонируют с нормальной скоростью. Что касается высокоплотных зарядов из пороха "С", то применительно к условиям данного эксперимента они обладают способностью детонировать с нормальной скоростью, пороговое давление инициирования низкоскоростной детонации близко к 1.2 ГПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Опыты с коротким импульсом длительностью несколько миллисекунд*

Опыты проводили со смешевым порохом "А". Типичные диаграммы давление–время, полученные для предсопловой полости и вблизи закрытого торца заряда, даны на рис. 2. Заряд имел диа-



**Рис. 2.** Диаграммы давление–время, полученные в опыте с ВЗКГ из пороха “А” при типовых условиях эксперимента: 1 – запись давления в предсопловой полости, 2 – запись давления у закрытого торца заряда. А – момент вскрытия диафрагмы.

метр 25 мм и длину 160 мм и был изготовлен из частиц пороха размером 1.9 мм. Плотность заряжения (отношение суммы масс заряда и воспламенителя к объему камеры) равнялась 1.22 г/см<sup>3</sup>. Камера сгорания и сопло имели следующие размеры: внутренний диаметр 25.5 мм, длина канала 208 мм,  $S_0/S_{cr} = 2.5$ ,  $S_0/S_{cr} = 5$ , угол расширения сопла 20°. Эти условия опытов приняты для удобства в качестве типовых, чтобы при описании опытов указывать лишь те параметры, которые отличаются от приведенных выше.

Как видно из этого рисунка, подъем давления у торца заряда начинается с почти миллисекундной задержкой, в течение которой порох воспламеняется, и горение распространяется на всю длину заряда. Диаграмма давления в предсопловой

полости отличается от диаграммы вблизи торца заряда более пологим участком нарастания давления и более низкой величиной его в максимуме. Разрыв диафрагмы проявляется в виде нескольких коротких пульсаций на участке подъема давления. По диаграмме давления в предсопловой полости определялись две характеристики работы двигателя: время работы  $\tau$  (время между точками 5%-ной амплитуды, взятыми на участках нарастания и спада давления) и среднеинтегральное давление  $P_{av} = (\int_0^t P dt)/\tau$ . Для анализа работы двигателя представляют интерес также максимальное давление  $P_m$ , действующее на стенки двигателя (его значение определяли по показанию датчика, размещенного вблизи дна камеры). Примеры этих характеристик вместе с результатами измерений удельного импульса тяги и условиями опытов даны в табл. 1.

В опытах с фотографической регистрацией свечения продуктов горения оба датчика давления размещали по длине заряда. Типичные диаграммы давление–время для датчиков, расположенных на расстоянии 15 и 155 мм от открытого торца заряда, даны на рис. 3. Условия опыта отличались от типовых лишь меньшим диаметром заряда (15 мм вместо 25) и меньшей степенью поджатия сопла  $S_0/S_{cr} = 2.0$ .

На диаграмме, полученной первым датчиком, можно выделить следующие характерные участки: передний фронт с быстрым нарастанием давления, излом с переходом на участок более медленного роста давления вплоть до достижения максимума и участок спада давления. Согласно представлениям о структуре волны конвективного горения [1], точка излома соответствует прохождению фронта пламени, и давление в точке излома  $P^*$  (в данном опыте  $P^* = 210$  МПа) можно принять в качестве давления во фронте пламени. Участок за точкой излома соответствует зоне горения диспергированной взвеси пороховых ча-

**Таблица 1.** Влияние условий проведения опытов на внутрибаллистические характеристики соплового устройства типовых размеров

Порох	“А” (80% перхлората аммония + 20% горючего связующего)						“А” + 2.5% парафина	
	0.66	0.9	1.9	5.0	1.9	1.9	0.9	0.9
Плотность заряжения, г/см <sup>3</sup>	1.22						0.9	0.9
Размер гранул, мм	0.66	0.9	1.9	5.0	1.9	1.9	0.9	0.9
Степень поджатия, $S_0/S_{cr}$	2.5	2.25	2.25	2.5	4.8	4.0	5.2	5.2
Длина заряда, мм	65	160	65	160	65	160	90	90
$V_0/S_{cr}$ , мм	210	460	190	415	400	820	810	810
Удельный импульс, с	178	205	130	190	205	180	218	187
$P_m$ , МПа	700	750	370	620	770	650	850	295
$P_{av}$ , МПа	245	325	140	265	285	260	350	120
$\tau$ , мс	1.1	2.8	1.7	4.1	2.6	5.4	4.1	8

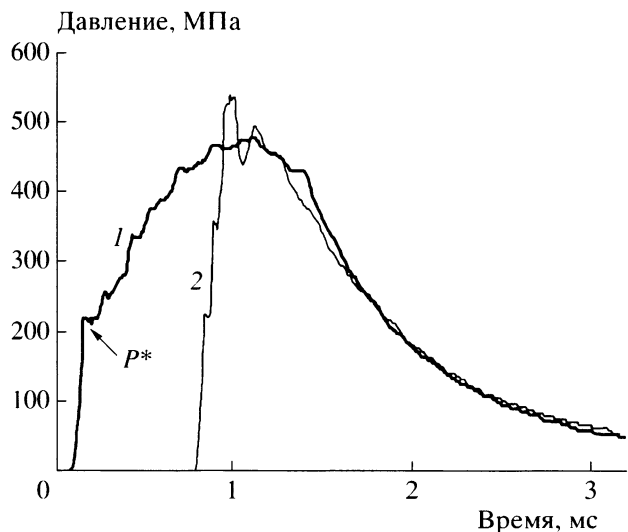


Рис. 3. Диаграммы давление–время в двух точках по длине заряда: 15 (1) и 155 мм (2) от открытого торца заряда соответственно. ВЗКГ из пороха “А”, диаметр заряда 15 мм.

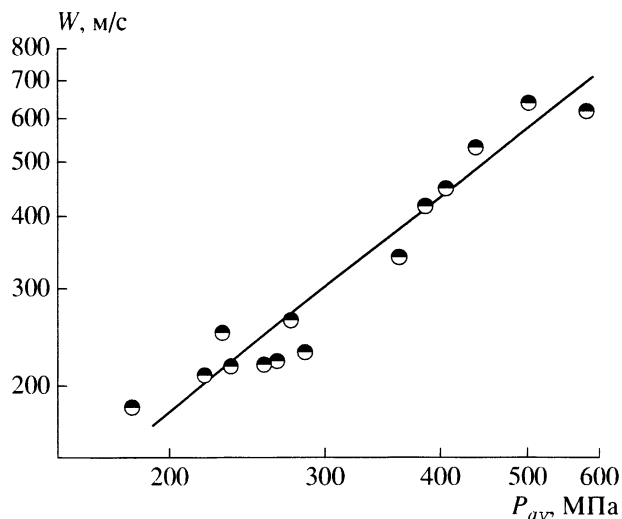


Рис. 4. Зависимость скорости конвективного горения  $W$  от давления во фронте пламени в условиях импульсного соплового устройства. ВЗКГ из пороха “А” с размером частиц 1.9 мм.

стиц (зоне догорания). Спад давления происходит после завершения процесса распространения конвективного горения на всю длину заряда.

Зная расстояние между двумя датчиками, можно оценить среднюю скорость конвективного горения на участке измерения. Для данного опыта она составила около 190 м/с.

Обрабатывая фоторегистрограммы свечения совместно с диаграммами давления, можно получить более точные локальные значения скорости фронта пламени по длине заряда и связать эти значения с давлением во фронте пламени. Опыты показали, что скорость конвективного горения увеличивается по длине заряда и существенным образом зависит от размера частиц пороха и наличия ингибитора. Для пороха с частицами менее 0.2 мм процесс горения, начавшийся при скорости около 260 м/с, быстро ускоряется и на длине около 100 мм переходит в низкоскоростную детонацию, скорость которой стабилизируется на уровне около 2300 м/с. Увеличение размера частиц до 1.9 мм снимает опасность переходных явлений при длинах заряда до 160 мм. Скорость конвективного горения заметно снижается, составляя на большей части длины заряда 180–250 м/с, и лишь при подходе к концу заряда возрастает до уровня около 400 м/с. Нанесение ингибирующей пленки на частицы размером 1.9 мм (2.5% парафина) делает заряд полностью взрывобезопасным; скорость конвективного горения еще больше снижается, изменяясь по длине заряда от 40 до 170 м/с.

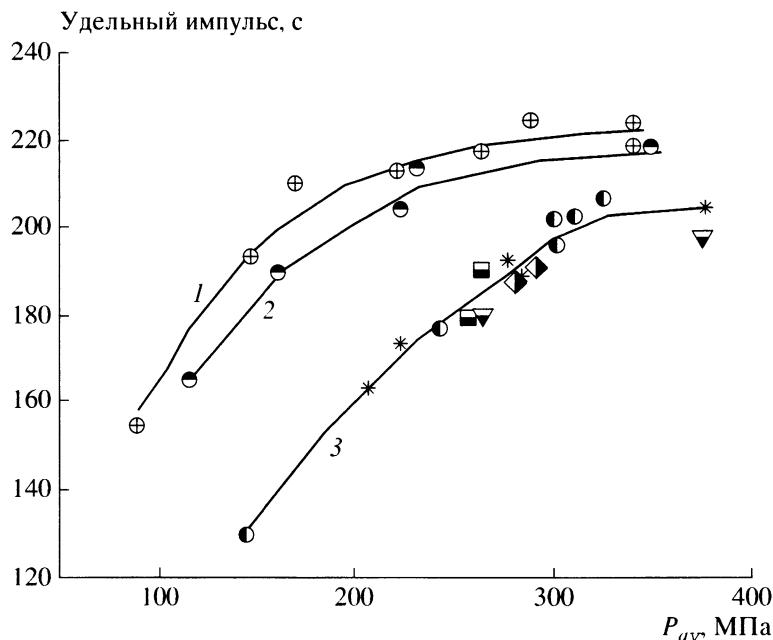
На рис. 4 показана взаимосвязь между локальной скоростью конвективного горения и давлением во фронте пламени для частиц пороха разме-

ром 1.9 мм без ингибитора. Данные получены в нескольких опытах, различающихся длиной заряда и критическим диаметром сопла. Точки укладываются на степенную зависимость от давления с показателем степени около 1.27. Эта зависимость лишь немного слабее по сравнению с той, на которую укладываются данные по квазистационарному конвективному горению высокоплотных зарядов этого пороха, полученные нами ранее для диапазона более низких давлений в установке с большим дожигательным объемом [1, 2].

Рассмотрим результаты экспериментов, представленные в табл. 1. Из-за импульсного характера диаграмм давления среднее давление в камере оказалось примерно в 2.5–3 раза меньше максимального давления у дна. Как среднее, так и максимальное давления снижаются при уменьшении длины заряда, увеличении диаметра сопла, увеличении размера частиц пороха и нанесении ингибирующего покрытия.

Время работы  $\tau$  находится в корреляции с величиной, равной отношению объема камеры к площади критического сечения сопла,  $V_0/S_{cr}$ . Это связано с тем, что большая часть диаграммы давления в полости камеры приходится на участок спада после максимума давления. А, как известно, характерное время истечения газов из двигателя прямо пропорционально величине  $V_0/S_{cr}$ . Нанесение ингибитора и увеличение размера частиц пороха при прочих равных условиях приводят к увеличению  $\tau$  за счет снижения скорости конвективного горения и давления в камере.

Массив данных, отражающий воздействие условий опыта на удельный импульс тяги, частич-



**Рис. 5.** Зависимость удельного импульса тяги от среднего давления в камере при разных плотностях заряжения ( $\text{г/см}^3$ ): 1 – 0.7, 2 – 0.9, 3 – 1.22. Обозначения: кружки относятся к зарядам диаметром 25 мм и длиной 65–80 мм из пороха “А” с частицами размером 1.9 мм; звездочки – к зарядам с частицами размером 0.66 и 0.9 мм, треугольники – к зарядам с частицами размером 5 мм, квадраты – к зарядам диаметром 40 мм.

но показан на рис. 5. В качестве независимой переменной выбрано среднее давление в камере. Видно, что результаты опытов, полученные при варьировании критического сечения сопла, длины и диаметра заряда, размера частиц пороха “А”, группируются вдоль кривых в соответствии с плотностью заряжения. По мере роста давления при постоянной плотности заряжения удельный импульс растет; однако при больших давлениях, достигнув величины удельного импульса 205–220 с, зависимость насыщается. Чем выше плотность заряжения, тем при более высоких давлениях происходит насыщение зависимости. Таким образом, если в качестве условной нижней границы удельного им-

пульса принять значение 200 с, то, как показывает анализ, для достижения этого уровня при плотности заряжения 0.7, 0.9, 1.1 и 1.22  $\text{г/см}^3$  среднее давление в камере должно быть не ниже 160, 200, 280 и 310 МПа соответственно.

Сильная связь удельного импульса с давлением в камере определяется двумя причинами. Во-первых, согласно термодинамическим расчетам (которые проводились для уравнения состояния идеального газа в предположении, что давление в камере постоянно и давление на срезе сопла равно атмосферному), величина удельного импульса заметно возрастает с ростом давления в камере за счет увеличения степени расширения продуктов горения в сопле. Для пороха “А” рассчитанный прирост удельного импульса при увеличении давления от 4 до 300 МПа составляет 60 с (от 215 до 275 с). Во-вторых, с ростом давления в камере снижается время горения частиц пороха и, как следствие, повышается полнота горения. В целом, однако, даже на участке насыщения кривых удельный импульс–давление в камере экспериментальные значения удельного импульса остаются заметно ниже идеальных расчетных значений.

Основной вклад в потери импульса, помимо отмеченной выше неполноты горения, дают, скорее всего, потери из-за неполного расширения продуктов горения в сопле. В результате давление на срезе сопла оказывается выше атмосферного. Влияние параметров соплового блока на

**Таблица 2.** Влияние параметров соплового блока на удельный импульс тяги. (Типовые условия опыта. Порох “А” с размером частиц 1.9 мм, плотность заряжения 0.9  $\text{г/см}^3$ )

$S_c/S_c = 10$				
Угол раствора сопла, град	20	30	40	50
Удельный импульс тяги, с	232	227	223	221
Угол раствора сопла 20°				
$S_c/S_c$	10	5.0	1	
Удельный импульс тяги, с	232	218	185	

удельный импульс тяги иллюстрируется результатами опытов, которые приведены в табл. 2. Видно, что при увеличении степени расширения сопла и уменьшении угла расширения удельный импульс тяги растет (суммарные потери импульса снижаются, соответственно, до 15%); таким образом, оптимальные условия по параметрам соплового блока, очевидно, не достигнуты.

Результаты опытов с зарядами разного диаметра приведены в табл. 3. Опыты проводились с зарядами 15, 25 и 40 мм и не обнаружили влияния диаметра заряда на баллистические характеристики установки при условии, что сохраняются одинаковыми длина заряда, плотность заряжания и относительные характеристики сопла.

В заключение этого раздела рассмотрим данные по воспроизводимости результатов измерений. Несмотря на импульсный характер процесса в камере, баллистические характеристики имеют хорошую воспроизводимость. Так, в серии из 10 параллельных опытов с порохом "А" в тех же условиях опыта отклонения от средних измеренных значений составили: по удельному импульсу  $\pm 2\%$ , по максимальному давлению на дно камеры  $\pm 10\%$ , по времени работы  $\pm 8\%$ .

**Опыты с диаграммой давления платообразной формы длительностью от 10 мс**

Опыты проводили на зарядах диаметром от 15 до 31 мм, изготовленных из пороха "С" с 7.5% поливинилбутирала. Заряды имели плотность 1.41–1.46 г/см<sup>3</sup>, пористость 5–7%. Плотность заряжания изменяли от 0.4 до 0.8 г/см<sup>3</sup>, варьируя длину заряда и предсопловой полости в диапазоне 35–110 мм и 50–120 мм соответственно. Количество воспламенителя подбирали таким образом, чтобы создаваемое им давление было близко к ожидаемому рабочему давлению в камере.

Данные по квазистационарному конвективному горению пороха "С" с 7.5% поливинилбутирала, полученные нами ранее и частично взятые из [1], приведены в табл. 4. Этот порох был выбран, исходя из следующих соображений: во-первых, показатель степени по давлению для скорости конвективного горения заметно меньше 1; во-вторых, сильная зависимость скорости послойного горения пороха от давления (показатель степени 0.93 в диапазоне давлений до 100 МПа) в данном случае играет положительную роль, позволяя эффективно снижать время горения пороховых частиц; в-третьих, длина зоны догорания, которая вычисляется как произведение времени горения частиц на скорость их оттока (способ определения этих параметров при конвективном горении и соответствующие данные рассмотрены в [1]), при давлениях выше 50 МПа становится меньше длины предсопловой полости двигателя. Отметим

**Таблица 3. Влияние диаметра заряда на внутрибаллистические характеристики. (Типовые условия опыта, порох "А" с размером частиц 0.9 мм,  $S_0/S_{cr} = 2.25$ )**

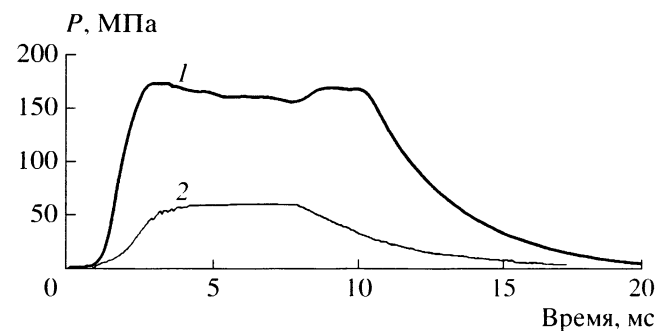
Диаметр заряда, мм	Удельный импульс, с	Полный импульс, Н·с	$P_{mr}$ , МПа	$P_{avr}$ , МПа	$\tau$ , мс
15	205	90	720	280	2.8
25	205	250	750	285	2.8
40	200	625	780	290	3.0

**Таблица 4. Данные по квазистационарному конвективному горению пороха "С" с 7.5% поливинилбутирала: плотность заряда 1.41–1.46 г/см<sup>3</sup>, относительная плотность 0.93–0.95**

Давление, МПа	Скорость, м/с	Показатель степени по давлению	Время догорания, мс	Ширина зоны догорания, мм
41	7.5	0.53	10	300
70	10		2	80
150	15.1		1	40

вклад канала порохового зерна, позволяющего уменьшить толщину свода и тем самым существенно снизить полное время горения зерен пороха. В пробных опытах, проведенных на аналогичном порохе, но с бесканальными зёрнами, время догорания которых при давлении около 60 МПа составило ~ 10 мс (или в 5 раз больше, чем при зерне с каналом), диаграмма давления имела пикообразную форму.

Типичные диаграммы давление–время, записанные в предсопловой полости камеры, показаны на рис. 6. Диаграмма состоит из участка выхода на режим длительностью 2–3 мс, платообразного участка с примерно постоянным давлением



**Рис. 6.** Примеры диаграмм давление–время платообразного типа, различающиеся уровнем рабочего давления: 1 – опыт 789, 2 – опыт 842. Порох "С" + 7.5% поливинилбутирала.

Таблица 5. Условия и результаты некоторых опытов с диаграммой давления платообразной формы.  
(Порох "С" + 7.5% поливинилбутирала)

Номер опыта	Диаметр (длина) заряда, мм	Вес заряда, г; (плотность заряжения, г/см <sup>3</sup> )	Диаметр сопла, мм	Среднее давление на плато, МПа	Время работы (длина плато), мс	Импульс тяги, Н · с	Удельный импульс тяги, с
789	15 (107)	28 (0.8)	6.0	165	17.4 (8.4)		
831	22.5 (35.8)	20 (0.42)	9.6	62	13 (4.5)	59	192
832	22.5 (69.4)	40 (0.56)	9.6	53	20 (10)	96	191
834	22.5 (34.7)	20 (0.41)	9.6	60	14 (4.3)	57	187
842	22.5 (35)	20 (0.46)	9.6	60.5	14 (4.5)	58	190
843	31 (36.3)	39 (0.48)	13.4	105	10 (3.5)	133	211

Примечание: опыт № 789 был проведен без измерения импульса тяги.

и завершающего участка экспоненциального спада давления. Результаты измерений вместе с условиями опытов представлены в табл. 5. Можно сделать следующие выводы.

Диаграммы давление–время с участком платообразной формы получены в диапазоне амплитуд от 60 до 160 МПа при полном времени работы 10–20 мс. Среднее давление на участке “плато” можно изменять главным образом за счет варьирования степени поджатия сопла. Увеличение длины заряда (и, соответственно, плотности заряжения) при прочих равных условиях (опыты 831 и 832) не приводит к росту давления, однако платообразный участок удлиняется. Наблюдается качественное согласие между измеренными значениями протяженности участка плато и оценками времени распространения конвективного горения на весь заряд, которые можно получить, исходя из длины заряда и скоростей конвективного горения, приведенных в табл. 4.

Измерения удельного импульса при давлении около 60 МПа дают значения в диапазоне 187–192 с. Если увеличить давление в камере до 90–100 МПа за счет степени поджатия сопла, удельный импульс возрастает до 205–210 с. Расчетная величина удельного импульса при давлении 100 МПа с учетом снижения силы пороха за счет добавки поливинилбутирала составляет около 250 с; таким образом, суммарные потери слегка превышают 15%.

Опыты с зарядами разного диаметра не обнаружили каких-либо эффектов, которые можно было бы отнести на счет влияния диаметра заряда. Наконец, два опыта (831 и 834), проведенные в одинаковых условиях, дали очень близкие результаты как по величине удельного импульса,

так и по диаграмме давления, что свидетельствует о повторяемости измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные, которые дают представление о возможностях использования высокоплотных зарядов конвективного горения в ракетных устройствах с короткими временами работы. Подбор подходящих параметров ВЗКГ и характеристик его горения проводили, опираясь на способы управления конвективным горением, которые были изучены ранее и опробованы применительно к условиям ствольных устройств. Однако импульсные сопловые устройства потребовали дополнительного изучения, прежде всего, из-за более жестких требований, предъявляемых ко времени горения диспергированных частиц пороха за фронтом волны конвективного горения. Вследствие этого, способ ингибирования поверхности пороховых гранул тонкими пленками инертных материалов, применяемый для управления характеристиками процесса и сопровождающийся ростом времени горения пороховых частиц, в импульсных сопловых устройствах лишается некоторых своих достоинств, поскольку здесь не требуется поддерживать горение с высокой прогрессивностью.

Опыты проводились на блочных зарядах, изготовленных из частиц пороха холодным прессованием до относительной плотности 0.9–0.95, применительно к двум различным режимам работы двигателя. Для получения импульсных диаграмм давления с временами работы несколько миллисекунд использовался ускоряющийся по длине заряда режим конвективного горения со скоростями несколько сотен метров в секунду. Заряды диаметром 15–40 мм и длиной до 160 мм изготавливали из смесового пороха на основе перхлора-



та аммония и инертного горючего связующего, гранулы пороха обычно не покрывались ингибирующей пленкой. Плотность заряжания изменялась в диапазоне от 0.7 до 1.22 г/см<sup>3</sup>. На зарядах, изготовленных из частиц мелкоизмельченного пороха, конвективное горение быстро достигает высоких скоростей и переходит в низкоскоростную детонацию. Чтобы исключить опасность переходных явлений, высокоплотные заряды изготавливали из крупных частиц миллиметровых размеров. Поэтому основные трудности возникали из-за сравнительно больших времен горения пороховых частиц. Чтобы обеспечить миллисекундные времена работы двигателя при удельном импульсе выше 200 с, потребовалось существенно повысить давление в камере (среднее давление до 300 МПа при максимальном давлении у дна камеры до 800 МПа). Полученные диаграммы давление–время имеют пикообразную форму, длина заряда оказывает непосредственное влияние на работу двигателя, вызывая изменение давления в камере. Несмотря на импульсный характер горения и сильную зависимость скорости конвективного горения от величины давления, наблюдается хорошая повторяемость рабочих характеристик в серии параллельных опытов.

При временах работы двигателя свыше 10 мс удалось использовать конвективное горение, распространяющееся в режиме, близком к квазистационарному. В результате были получены диаграммы давления более совершенной формы с платообразным участком. Для этих опытов высокоплотные заряды изготавливали из гранул тонко-сводного пироксилинового пороха, покрытых ингибирующей пленкой поливинилбутирала. Опыты проводили при плотности заряжания 0.4–0.8 г/см<sup>3</sup> на зарядах диаметром от 15 до 31 мм и длиной от 35 до 110 мм при рабочем давлении в камере в диапазоне 60–170 МПа. Конвективное горение этих зарядов при данных давлениях отличает слабая зависимость скорости конвективного горения от давления (показатель степени 0.53) при уровне скоростей 7–15 м/с и времени сгорания частиц пороха 1–2 мс. Проведенные измерения показали, что платообразный участок диаграммы давления соответствует стадии распространения конвективного горения вдоль заряда. Увеличение длины заряда не приводит к росту давления в двигателе, но при этом растет протяженность платообразного участка. При повышении давления в камере удельный импульс тяги растет. Значения, превышающие уровень 200 с, были получены при давлении в камере на уровне 90–100 МПа. Суммарные потери импульса (относительно величины, рассчитанной для данного уровня давлений) составили около 15%. Эти потери складываются из нескольких составляющих (неполнота горения пороха в камере, неполнота расширения продук-

тов горения в сопле, потери на нестационарных участках и др.); их анализ и поиск путей снижения составляют предмет дальнейших исследований.

Важная роль в интерпретации наблюдаемых закономерностей и выборе наилучших параметров двигателя принадлежит численному моделированию. Для таких исследований могут быть использованы теоретические модели конвективного горения высокоплотных зарядов, которые были разработаны и опробованы ранее применительно к ствольным устройствам [5, 7, 8]. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, составляют хорошую основу для калибровки и проверки предсказательной способности этих моделей. Среди других направлений возможных исследований следует назвать снижение уровня рабочего давления в двигателе, который в данной работе был довольно высоким, и дальнейшее повышение плотности заряжания. Оба пороха, которые исследовались в данной работе, относятся к порохам с нормальным уровнем скорости послонного горения (100–120 мм/с при давлении 100 МПа). Чтобы получить приемлемые времена горения диспергированных частиц пороха и обеспечить полноту горения при более низких давлениях, могут быть использованы быстрогорящие пороха. Однако они обладают более высокой взрывоопасностью, что вносит очевидные ограничения.

Что касается плотности заряжания, то, как показало проведенное исследование, в случае зарядов с диаграммами давления пикообразной формы повышение плотности заряжания достигается ценой роста давления в двигателе. Иначе обстоит дело для зарядов с платообразными диаграммами давления, получаемыми в режиме квазистационарного конвективного горения. Здесь, при соблюдении условий, необходимых для завершения горения диспергированных частиц в пределах предсопловой полости, которая сохраняется неизменной, существует реальная возможность дальнейшего повышения плотности заряжания за счет увеличения длины заряда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. // Хим. физика. 1997. Т. 16. № 9. С. 51.
2. Sulimov A.A., Ermolaev B.S. Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Application / Eds. Roy G.D. et al. M.: ENAS Publishers, 1999. P. 241.
3. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Михайлов Ю.М. и др. Метательный заряд: Патент № 2153144. РФ // Б.И. 2000. № 20. С. 25.
4. Королев В.П., Сулимов А.А., Михайлов Ю.М. и др. // Мат-лы Второй Всерос. конф. "Энергети-

- ческие конденсированные системы". Черногловка: ИПХФ РАН, 2004. С. 43.
5. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. С. 254.
  6. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Жукова Б.П. М.: Янус-К, 1999. С. 232.
  7. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 7. С. 79.
  8. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Беляев А.А. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 1. С. 84.
  9. Simmons R.L., Juhasz A., Heimerl J. et al. // Proc. 28th Intern. Annual Conf. ICT. Karlsruhe. Germany, 1997. P. 1–1.
  10. Кенти К., Кембелл М. // Вопр. ракетной техники. 1971. № 8. С. 156.
  11. Королев В.П., Сулимов А.А., Михайлов Ю.М. // Труды междунар. конф. по горению (ICOS 93). М.–СПб.: ИПМ УрО РАН, 1993. С. 22.