

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ



**VI Международная молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики»**

16–18 ноября 2016 г., Томск



Издательство Томского университета
2017

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАРЯЖАНИЯ
ПРИ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ МЕТАНИЯ +20 °С****А.И. Зыкова, Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров**

Главными характеристиками проведения баллистического эксперимента являются максимальное давление в камере сгорания P_{\max} и скорость метаемого элемента в момент вылета из ствола U_d . В ходе работы определялся закон горения нового высокоэнергетического топлива в условиях баллистического эксперимента. Этот закон использовался при проведении параметрического исследования зависимости P_{\max} и U_d от массы порохового заряда в камере и дополнительного присоединенного заряда при начальной температуре метания +20 °С. Были получены оптимальные условия заряжания, при которых дульную скорость удалось повысить на 14,9 %. Под оптимальными условиями понимаются такие условия заряжания, при которых удастся получить наибольшее значение дульной скорости метаемого элемента в диапазоне давлений до 600 МПа.

**DETERMINATION OF OPTIMAL LOADING CONDITIONS AT THE INITIAL
TEMPERATURE OF +20 °C****A.I. Zyкова, N.M. Samorokova, A.D. Sidorov**

The main characteristics of ballistic experiment are the maximum pressure in the combustion chamber P_{\max} and the projectile velocity at the time of barrel leaving U_d . During the work the burning law of the new high-energy fuel was determined in a ballistic experiment. This burning law was used for a parametric study of depending P_{\max} and U_d from a powder charge mass and a traveling charge at initial temperature of + 20 °C was carried out. The optimal conditions for loading were obtained for improving the muzzle velocity by 14.9%. Under optimal loading, there is defined the conditions, which is possible to get the greatest value muzzle velocity projectile at pressures up to 600 MPa.

Введение

Повышение дульной скорости метаемого элемента (МЭ) является одной из основных задач внутрибаллистического проектирования артиллерийских систем. Поиск путей ее решения заставляет исследовать новые перспективные схемы метания. Одна из них – метание с присоединенным зарядом (ПЗ). Настоящая работа способствует совершенствованию традиционного артиллерийского вооружения.

Существуют классические и нетрадиционные схемы метания. В классической схеме ускорение МЭ происходит только за счет сгорания порохового заряда в камере. Схема с ПЗ – это нетрадиционная схема метания, в которой используются перспективные высокоэнергетические топлива конвективного горения. Присоединенный заряд располагается непосредственно за снарядом и движется вместе с ним. МЭ движется по цилиндрическому каналу под действием газов, образующихся при постепенном горении топлива в двух областях, в которых расположены традиционный пороховой заряд и ПЗ (рис. 1).

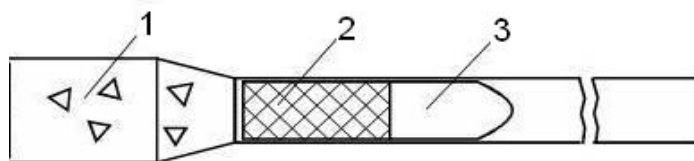


Рис. 1. Общая схема метания с ПЗ: 1 – традиционный пороховой заряд; 2 – присоединенный заряд; 3 – МЭ

Присоединенный заряд воспламеняется спустя некоторое время, которое называется временем задержки воспламенения, после зажигания основного, порохового, заряда и горит с торца, удаленного от снаряда. В процессе ускорения давление метаемого газа меняется вследствие двух основных факторов. Приход газов из-за горения элементов метательного заряда способствует возрастанию давления, а увеличение объема за МЭ – его уменьшению. Поддержание давления на достаточно высоком уровне возможно путем применения в составе метательного заряда прогрессивно сгорающих элементов. В этом отношении большие перспективы имеют новые пастообразные топлива с прогрессивным характером горения.

Использование ПЗ позволяет повысить дульную скорость МЭ без повышения максимального давления в камере за счет повышения энергии метательного заряда; повышения давления в глубине ствола непосредственно у дна МЭ; реактивного подгона МЭ, появляющегося из-за оттока продуктов сгорания ПЗ.

Целью данной работы было определение закона горения перспективного высокоэнергетического топлива при стандартной лабораторной температуре +20 °С, на основании серии баллистических экспериментов, а также проведение параметрического исследования связи параметров заряжания с баллистическими параметрами эксперимента. Это исследование позволит оценить потенциальные возможности нового топлива по увеличению скорости МЭ, а также войдет в работу по изучению влияния температур на процессы метания.

Главной задачей этого исследования было определить, на сколько процентов можно увеличить дульную скорость МЭ в допустимом для конкретной установки диапазоне давлений до 600 МПа и необходимые для этого условия заряжания.

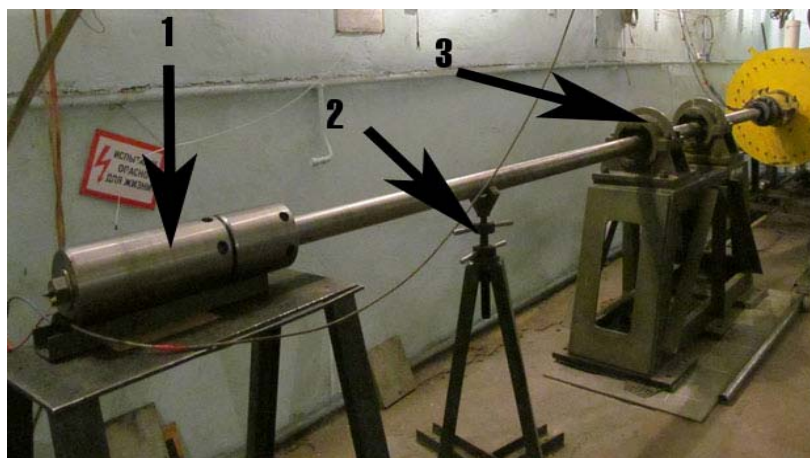


Рис. 2. Баллистическая установка:

1 – камера сгорания; 2 – опора казенной части установки; 3 – лафет

Обработка экспериментальных данных

Производитель определяет термодинамические характеристики топлив и продуктов сгорания: плотность, температуру горения, силу, ковалюм, показатель адиабаты, молекулярный вес. Также определяет закон горения топлива в условиях постоянного объема. Однако существует необходимость определения закона горения топлива в баллистическом эксперименте, так как горение может отличаться.

В ходе работы в 70-м отделе НИИ ПММ ТГУ проводились лабораторные эксперименты по классической и нетрадиционной схемам метания на баллистической

установке (рис. 2). В экспериментах измерялись давление в камере сгорания $P(t)$ и максимальное давление в камере P_{\max} (пьезокристаллический датчик 2Т6000), скорость МЭ при движении по каналу ствола U (ДДС 6000) и в момент вылета $U_{\text{д}}$ (датчик дульной скорости). В экспериментах использовался инертный МЭ фиксированной массы, зерненный пороховой заряд. ПЗ из перспективного пастообразного топлива размещался в полиэтиленовом контейнере (рис. 3), с одного конца контейнер накрыт сеткой, которая препятствует вытеканию топлива. В экспериментах с классической схемой метания использовался полиэтиленовый имитатор такой же массы и размера, как ПЗ в контейнере. Таким образом, сохранялись стартовая масса сборки, начальное положение снаряда и, следовательно, давление форсирования $P_{\text{ф}}$ (давление при страгивании МЭ) во всей серии экспериментов.

Рис. 3. Слева направо: ПЗ в полиэтиленовом контейнере, МЭ



На рис. 4 представлены зависимости давления в камере и скорости от времени при разных схемах метания. На начальном этапе скорости МЭ практически совпадают. Но в точке А можем видеть момент резкого увеличения скорости, что соответствует началу ускоренного режима горения ПЗ.

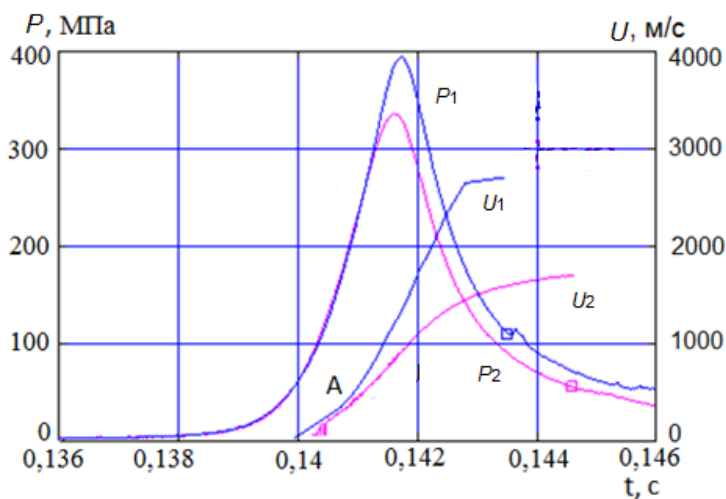


Рис. 4. Зависимость максимального давления и дульной скорости МЭ от изменения массы штатного заряда в камере

Для исследования приведенной схемы метания использовалась математическая модель, разработанная в 70-м отделе НИИ ПММ ТГУ [1]. Она позволяет решать прямую задачу внутренней баллистики для различных схем метания. То есть для заданных параметров установки, заряда и МЭ определить давление и скорость МЭ.

Для проведенных экспериментов неизвестны такие параметры, как давление форсирования P_f и трение при движении по стволу τ , которые нет возможности измерить. Такие неизмеряемые параметры определяются на основании экспериментов с имитатором как параметрами согласования экспериментальных и расчетных данных. То есть в серии расчетов они меняются в определенном диапазоне с целью достижения максимально возможного совпадения экспериментальных и расчетных величин P_{\max} и U_d и соответственно кривых $P(t)$ и $U(t)$, как показано на рис. 5. При этом использовались штатные параметры порохового заряда.

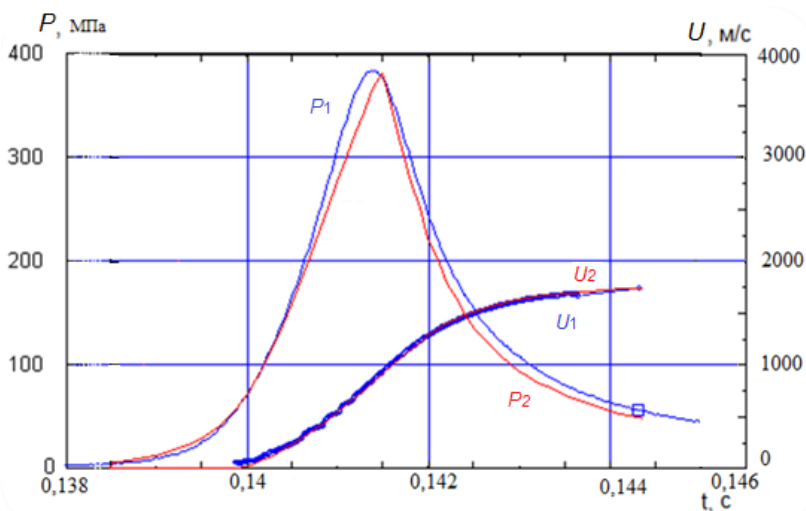


Рис. 5. Типичный график зависимости давления в камере (P) и скорости МЭ (U) от времени

В табл. 1 представлены параметры согласования классической схемы метания, полученные при расчете экспериментов при стандартной температуре $T_1 = 20$ °С, и расхождение расчетных и экспериментальных значений максимального давления (ΔP_{\max}) и дульной скорости МЭ (ΔU). Затем полученные параметры использовались во всех расчетах для определения закона горения топлива, используемого как ПЗ в нетрадиционной схеме метания.

Таблица 1. Параметры согласования для классической схемы метания

P_f , МПа	τ , МПа	ΔP_{\max} , %	ΔU , %
60	1	0,77	0,3

При теоретическом анализе считалось, что пороховой заряд в камере мгновенно воспламеняется и горит с известной линейной скоростью. ПЗ воспламеняется через некоторое время после начала горения порохового заряда в камере. Момент воспламенения задается импульсом задержки воспламенения $I = I_1$. Горение ПЗ характеризуется двумя периодами: более медленного со скоростью $u = B_1 \cdot P^v$ и более быстрого

горения $u = B_2 \cdot P^{\nu}$, а момент перехода определяется достижением импульсом значения импульса перехода в ускоренный режим горения $I = I_2$ (где u – скорость горения, B_i – коэффициент скорости, P – давление за фронтом горения, ν_i – степенной коэффициент, $I = \int_0^t P dt$). Параметры закона горения I_i , B_i , ν_i зависят от свойств топлива и определялись как параметры согласования в табл. 2.

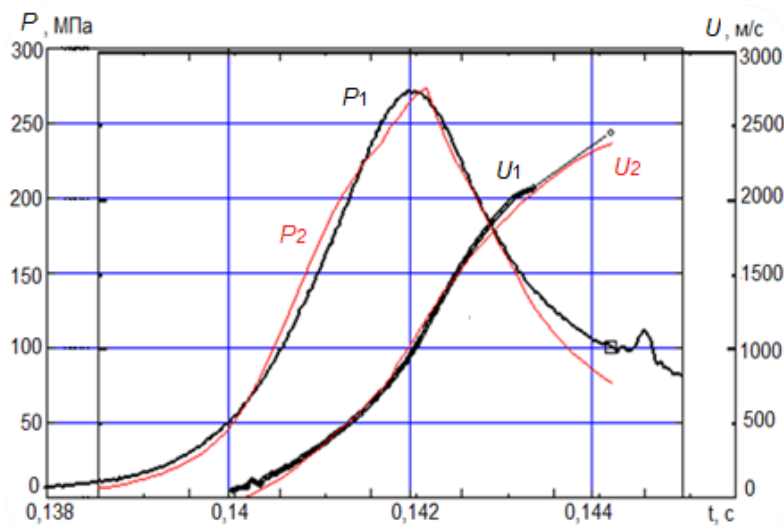


Рис. 6. Зависимости давления в камере (P) и скорости МЭ (U) от времени

Таблица 2. Параметры закона горения ПЗ

ν_1	$B_1, \text{м/с}/(0,1 \cdot \text{МПа})^{\nu_1}$	$I_1, \text{МПа} \cdot \text{с}$	ν_2	$B_2, \text{с}/(0,1 \cdot \text{МПа})^{\nu_2}$	$I_2, \text{МПа} \cdot \text{с}$	$\Delta P_{\text{max}}, \%$	$\Delta U, \%$
0,8	0,0045	0,0865	0,8	0,024	0,19	0,7	0,3

Полученные в ходе обработки экспериментов картины метания можно считать действительными, так как расхождение экспериментальных и расчетных величин не превышает 0,77 %. Эти параметры согласования использовались для дальнейшего исследования связи параметров заряжания с дульной скоростью МЭ.

Параметрическое исследование параметров заряжания

С использованием полученного закона горения проводились параметрические исследования, в ходе которых изменялась масса порохового заряда в камере (рис. 7) и масса присоединённого заряда (рис. 8). Массы снаряда и ПЗ оставались неизменными. В допустимом диапазоне давлений (600 МПа) скорость практически не меняется вне зависимости от того, насколько увеличивается масса пороха или масса ПЗ. Это обусловлено слишком быстрым сгоранием ПЗ.

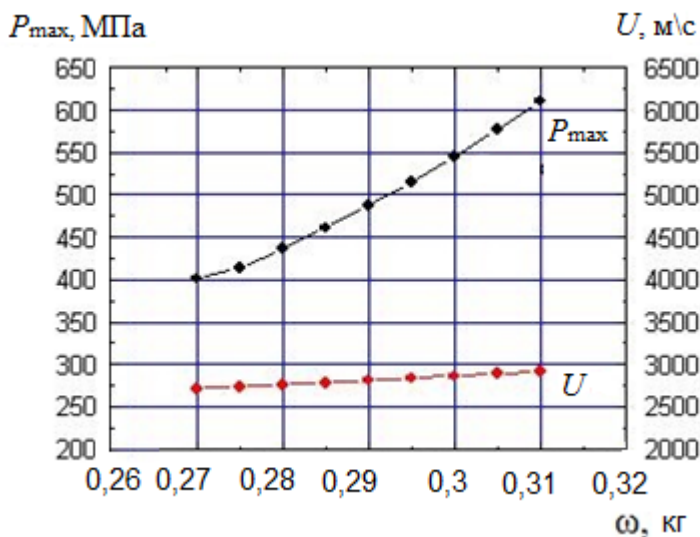


Рис. 7. Зависимость максимального давления и дульной скорости МЭ от изменения массы порохового заряда в камере

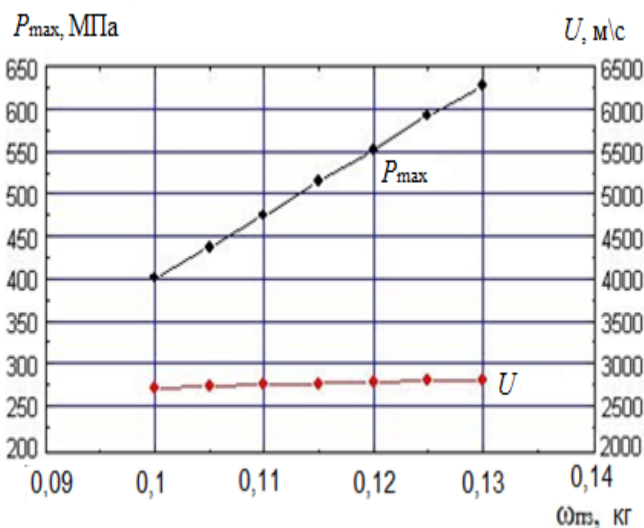


Рис. 8. Зависимость максимального давления и дульной скорости МЭ от изменения массы ПЗ

В связи с особенностями горения топлива оптимальный результат при использовании ПЗ получается в том случае, когда воспламенение ПЗ происходит после пика давления. Существуют механические и химические механизмы обеспечения задержки, но наиболее практичной следует считать конструкцию с химическим замедлителем. При расчетах присутствие химического замедлителя моделируется импульсом задержки воспламенения I_1 .

В ходе исследования импульсы задержки менялись вместе с массой пороха и ПЗ, проверялось изменение дульной скорости и максимального давления в камере сгорания. Таким образом, были подобраны оптимальные импульсы задержки воспламенения I_3 (рис. 9), при которых достигаются наилучшие значения дульной скорости

в допустимом диапазоне давления. Дульную скорость МЭ удалось увеличить на 14,9 %.

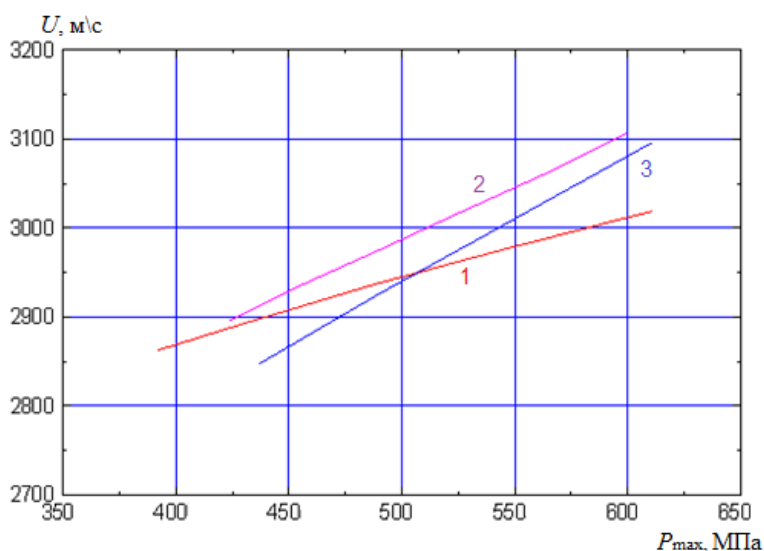


Рис. 9. Зависимость дульной скорости МЭ от максимального давления при различных импульсах задержки воспламенения, массе пороха и массе ПЗ

На рис. 9 изображен график зависимости дульной скорости МЭ от максимального давления, где импульс задержки был равен 0,26 МПа·с с изменением массы пороха (1), 0,26 МПа·с с изменением массы ПЗ (2) и 0,3 МПа·с с изменением массы пороха (3).

Результаты исследования

Проведено комплексное исследование топлива, а также его потенциальных возможностей при заданных лабораторных условиях.

В результате обработки результатов экспериментальных данных, полученных с применением классической схемы метания и схемы метания с присоединенным зарядом для начальной температуры +20 °С, получены параметры согласования на основе сравнения экспериментальных и расчетных данных при расхождении, не большем 0,77 %.

Проведено параметрическое исследование с целью определения возможности увеличения дульной скорости МЭ в диапазоне давлений, не больших 600 МПа. Получены конкретные значения изменяемых параметров, при которых дульную скорость удалось увеличить на 14,9 % относительно значения, полученного в эксперименте.

Вывод

Результаты проведенного исследования получены для стандартной лабораторной температуры и использовались в дальнейшем для исследования метания при более низких (-50 °С) и более высоких (+40 °С) температурах для определения температурных коэффициентов топлива. Это позволило провести исследование по возможностям модернизации метания с использованием этого топлива для различных температур.

Литература

1. *Ищенко А.Н., Касимов В.З.* Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах: учеб. пособие. Томск: Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2015.
2. *Касимов В.З.* Программный комплекс для расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах // Изв. РАН. 2005. № 1. С. 70–76.
3. *Серебряков М.Е.* Внутренняя баллистика / Государственное издательство оборонной промышленности. М., 1939.
4. *Русяк И.Г., Ушаков В.М.* Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001.
5. *Бетехтин С.А., Виницкий А.М., Горохов М.С.* Газодинамические основы внутренней баллистики. М.: Оборонгиз, 1957.