

УДК 623.52
DOI 10.17223/19988621/70/4

А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, О.В. Ушакова

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПЛИВА И МЕТОДА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НА БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСТРЕЛА В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КАЛИБРОМ 120 мм¹

С помощью разработанной осесимметричной численной методики теоретически исследовано влияние начальной температуры топлива на баллистические характеристики выстрела из модельной 120-мм установки для двух типов зажигания: при использовании капсюля-воспламенителя и плазматрона типа «флейта». Отмечено, что начальная температура заряда в рассмотренном диапазоне существенно влияет на характеристики выстрела, тип зажигания значительно влияет на время зажигания заряда и время выстрела, однако на скорость метания и максимальное давление в камере существенного влияния не оказывает.

Ключевые слова: *воспламенение, баллистические характеристики, начальная температура топлива, осесимметричная постановка, электрокапсюль-воспламенитель, плазматрон «флейта».*

Рассматривается влияние типа воспламенения и начальной температуры топлива на зажигание метательного заряда и характеристики выстрела в баллистических установках. Анализируются два типа воспламенения метательного заряда: традиционное воспламенение в ствольных газодинамических метательных системах с помощью капсюля-воспламенителя (ЭКВ) и воспламенение с применением одного из перспективных устройств электротермохимической (ЭТХ) технологии – плазматрона типа «флейта», который представляет собой расположенную по оси симметрии метательного заряда удлиненную трубку с отверстиями, через которые осуществляется вдув воспламенительного состава [1].

Для ствольных баллистических систем в большинстве случаев характерным является значительное превышение продольных размеров над поперечными, поэтому, как правило, для описания внутрибаллистических процессов используются квазиодномерные уравнения, что существенно снижает трудоемкость решения конкретных задач. Однако при исследовании зажигания метательного заряда, в том числе, в случае применения воспламенительного устройства типа «флейта», в связи с характером течения происходящие в пороховой камере процессы, по крайней мере, на начальном этапе выстрела, носят существенно неодномерный характер. Поэтому следует учитывать, что решение задачи исследования внутрибаллистических процессов в одномерной постановке может не дать адекватной картины движения внутриканальной среды в ходе выстрела. В связи с этим в данной работе указанная задача рассматривается в осесимметричной постановке.

¹ Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Поскольку во многих случаях волновой характер движения рабочих газов и конденсированных элементов играет существенную роль, в качестве базовой математической модели при решении поставленной задачи выбрана модель полидисперсной смеси твердых частиц и несущей газовой фазы в приближении механики взаимопроникающих континуумов [2, 3]. При записи уравнений предполагается, что вязкость и теплопроводность газа проявляется только во взаимодействии с частицами, и рассматривается случай несжимаемой конденсированной фазы. Записываются уравнения сохранения массы, импульса и внутренней энергии для несущей газовой фазы. Для каждого конденсированного компонента также записываются уравнения сохранения массы и импульса. Для инертных частиц рассчитывается уравнения сохранения внутренней энергии. Отметим, что в уравнениях сохранения импульсов для частиц присутствует член, отвечающий за их силовое взаимодействие, при этом используемое выражение для шаровой части тензора напряжений в конденсированной фазе препятствует неограниченному возрастанию плотности частиц.

Расчет зажигания компонента метательного заряда проводится путем решения задачи теплопроводности, при этом каждый компонент рассматривается как реакционно-способная частица [4]. В качестве критерия зажигания компонента используется условие достижения заданной критической температуры на поверхности частицы или в окружающей частицу газовой фазе. После воспламенения прогрев частицы не считается, а вместо этого определяется ее степень превращения. Под временем зажигания метательного заряда подразумевалось время, к которому для всех компонентов заряда выполнится условие зажигания.

Система полученных уравнений замыкается соотношениями, определяющими массовое, силовое и энергетическое межфазное взаимодействие системы «газ – конденсированные частицы». Для описания массового взаимодействия фаз используются геометрические законы газообразования, в которых для определения площади поверхности послойного горения используют общепринятые в баллистике полученные из геометрических соображений соотношения, при этом значения параметров – коэффициентов формы для отдельного типа частиц – известны. Также могут применяться физические законы газообразования, в которых величина поверхности послойного горения определяется не из геометрических соображений, а на основании обработки результатов испытаний топлива в манометрической бомбе. В настоящей математической модели результаты, полученные с использованием новых уточненных методик обработки таких экспериментальных данных [5], применяются в виде аппроксимаций зависимости относительной поверхности горения от степени превращения в виде полинома девятой степени и кусочно-линейной зависимости.

Для линейной скорости горения применяется квазистационарная степенная зависимость от давления, в которой коэффициент при степени зависит от химической природы и начальной температуры элемента заряда, а показатель степени определяется его составом.

Для характеристики силового взаимодействия фаз используется сила сопротивления, для которой на основе имеющихся в литературе данных [6] выбирались зависимости от условий взаимодействия, среди которых главное значение имеют число Рейнольдса относительного движения фаз и объемное содержание газовой фазы. При этом значение коэффициента аэродинамического сопротивления частиц отдельного компонента заряда находится по известным полученным исходя

из экспериментальных данных зависимостям [7, 8] для широкого диапазона пористостей.

При описании теплового взаимодействия газовой и конденсированной фаз калорийность горящих элементов метательного заряда определяется по известному во внутренней баллистике соотношению.

Также для замыкания системы основных уравнений используется уравнение состояния смеси газов типа Дюпре, где коэффициенты уравнения состояния для смеси газов находятся, исходя из известных коэффициентов отдельных газовых компонентов и значений их средних плотностей по определенным соотношениям [3].

Таким образом получаем замкнутую систему для определения средних плотностей газовых компонентов, объемного содержания каждой конденсированной фракции, скоростей газа и частиц, энергии, температуры и давления смеси газов, а также степени превращения и температуры отдельного компонента заряда.

Расчетные области для рассматриваемой задачи приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показана расчетная область при ЭКВ-воспламенении. Область ограничена слева дном камеры, имеющим круглое отверстие ($0 < r < R_f$), через которое продукты сгорания воспламенителя, попадают в пороховую камеру. Справа расчетная область ограничена дном метаемого объекта (МО). Снизу расчетная область ограничена осью симметрии, а сверху – твердой непроницаемой стенкой – внутренней поверхностью пороховой камеры.

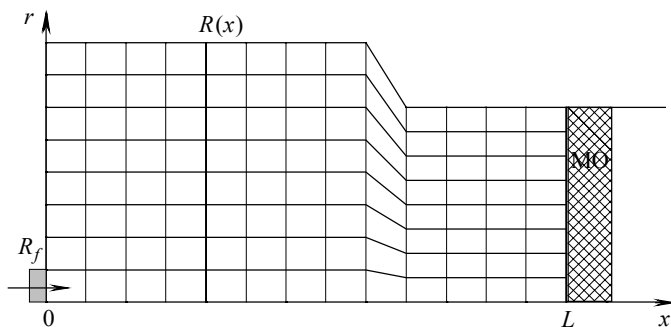


Рис. 1. Расчетная область при ЭКВ-воспламенении

Fig. 1. Computational domain for EPI-ignition

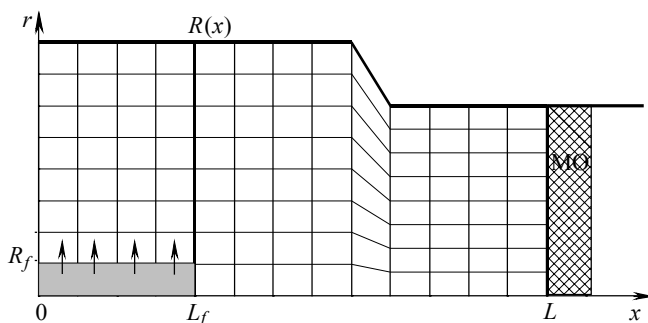


Рис. 2. Расчетная область при использовании «флейты»

Fig. 2. Computational domain for "flute" plasma torch ignition

Задача решается при естественных начальных условиях: в начальный момент задаются парциальные давления компонент газовой смеси и ее температура, характеризующие начальное состояние газовой фазы, а также начальное пространственное распределение каждого конденсированного компонента.

При задании граничных условий для газодинамической части задачи дно пороховой камеры рассматривается как неподвижная непроницаемая граница, на которой ставятся условия непротекания, за исключением первого варианта воспламенения, когда на части поверхности задаются параметры втока продуктов сгорания воспламенителя. Также параметры втока воспламенительного состава задаются при втором варианте воспламенения на поверхности «флейты». На оси симметрии и внутренней поверхности пороховой камеры ставятся естественные условия непротекания. На снаряде в качестве граничных условий также используются условия непротекания, при этом для определения скорости и положения снаряда интегрируется уравнение его движения.

Для численного решения поставленной задачи для обоих вариантов воспламенения расчетная область разбивается на расчетные интервалы таким образом, чтобы они образовывали сетку, однородную по координате x и пропорциональную однородную по координате r . Проинтегрировав основные уравнения по элементарной счетной ячейке, вычислив интегралы, отвечающие за геометрию ячейки, получаем формулы для определения параметров на следующем временном слое. При этом для нахождения потоков на границах ячеек используется модификация метода С.К. Годунова, описанная в [9, 10]. В одномерных задачах эта численная методика хорошо обоснована физически. В то же время формально ее можно применить и к двумерной осесимметричной постановке. В этом случае скорость газа в каждой ячейке разлагается на нормальную и касательную составляющие, из которых получают значения нормальной и касательной скорости на каждой границе, участвующие в формулах распада разрыва. При этом расчет распада произвольного разрыва становится массовой элементарной операцией, позволяющей определить потоки через границы ячейки.

При решении уравнения теплопроводности используется неявная схема с нелинейной правой частью, которая обладает свойствами абсолютной устойчивости, монотонности и консервативности [11]. При аппроксимации конвективных слагаемых применяются разности против потока. Для нахождения значения температуры на каждом временном слое в силу нелинейности системы полученных уравнений необходимо было организовать итерационный процесс. В качестве нулевого приближения бралось значение с предыдущего временного слоя. На каждом итерационном шаге значения температуры находятся из системы с трехдиагональной матрицей методом прогонки. Процесс итераций проводится до тех пор, пока не достигается заданная точность вычислений.

По описанной численной методике на основе принципов объектно-ориентированного программирования на языке C++ [12] было разработано комплексное программное обеспечение, позволяющее моделировать выстрел в осесимметричной постановке. Интерфейсная часть программного обеспечения разрабатывалась с помощью библиотеки классов Qt [13]. Описываемое программное обеспечение имеет графический интерфейс пользователя (GUI) и работает в рамках системы Win32, запуск программы расчета осуществляется привычным для этой операционной системы образом. Входные данные для программы расчета вводятся в виде конфигурационных файлов. В ходе расчета имеется возможность графической иллюстрации происходящих процессов в виде изолиний различных характери-

стик, поля скоростей, а также пространственных распределений осредненных по поперечному сечению внутрибаллистических параметров.

Разработанный программный комплекс для расчета внутрибаллистических характеристик выстрела в осесимметричной постановке использовался для исследования модельной установки с применением для зажигания метательного заряда ЭКВ-воспламенителя и плазматрона «флейта». Исследуемая модельная установка имеет калибр 120 мм и длину ствола около 5 м. Пороховая камера имеет длину 0.40 м и диаметр 160 мм. В качестве основного метательного заряда применялся зерненный семиканальный порох, в качестве воспламенителя – порох ДРП, при этом навеска ДРП располагалась на дне пороховой камеры и у снаряда при ЭКВ-воспламенении и внутри «флейты» в случае использования плазматрона «флейта». В ходе расчетов было рассмотрено три варианта начальной температуры заряда: -40 , 0 и $+40$ °С.

Некоторые результаты расчетов приведены в таблице и на рис. 3 – 12. В таблице сведены основные результаты расчетов. На рис. 3 показаны зависимости среднего давления на дно МО от времени, на рис. 4 – зависимости скорости МО от его текущей координаты для шести вариантов расчета. Из рис. 3, 4 и таблицы видно, что повышение начальной температуры заряда приводит к повышению максимального давления в камере и на дно снаряда и повышению его дульной скорости. Разница между дульными скоростями в рассмотренных случаях начальной температуры составляет около 100 м/с ($\sim 7.5\%$) для обоих типов воспламенения, причем кривые скорости для отдельных типов воспламенения практически совпадают. Также можно отметить, что в случае более высокой начальной температуры кривые давления более острые, очевидно, что воспламенение заряда и форсирование снаряда происходит в этом случае быстрее и разница в расчетных длительностях выстрела составляет около 0.5 мс для воспламенения с помощью «флейты» и около 0.75 мс при ЭКВ-воспламенении. Заметим, что незначительное превышение максимального давления на дно МО при использовании «флейты» можно объяснить более форсированными режимами при таком зажигании. Также можно отметить, что характер волновых процессов в заснарядном объеме не зависит от начальной температуры заряда, однако отличается при разных типах воспламенения.

О характере распространения воспламенения можно судить по рис. 5 и 6, на которых приведены поля зажигания в три последовательных момента времени, соответствующих воспламенительному периоду, для двух типов воспламенительных устройств.

Рис. 7 – 10, на которых приведены изолинии давления и поля скоростей газовой фазы в последовательные моменты времени, иллюстрируют протекающие в ходе выстрела процессы для случая начальной температуры метательного заряда $T_0 = 0$ °С. При этом рис. 7, 8 соответствуют воспламенительному периоду, а рис. 9, 10 характеризуют протекание процесса с момента форсирования снаряда, рис. 7, 9 показывают распределения соответствующих характеристик при ЭКВ-воспламенении, а рис. 8, 10 – при воспламенении с помощью плазматрона «флейта». Из приведенных рисунков видно, что в рассмотренных случаях существенная неоднородность имеет место только на начальном этапе выстрела. Дальнейшее развитие процесса происходит практически одномерно, что позволяет на этом этапе для описания внутрибаллистических процессов пользоваться одномерными численными моделями. Отметим также, что при моделировании не учитывалась геометрия ведущего устройства и наличие конструктивных элементов установки. Поэтому учет отмеченных факторов может осложнить картину течения.

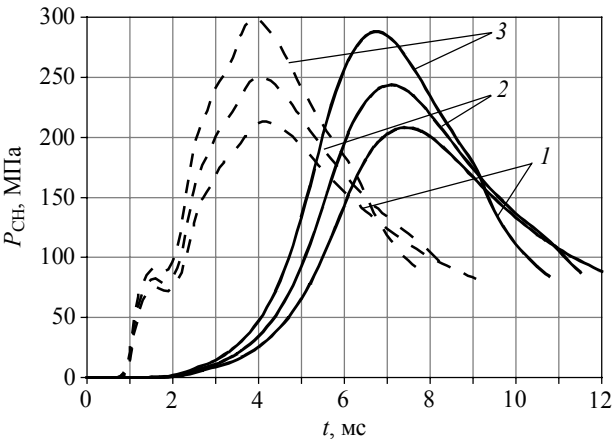


Рис. 3. Зависимость среднего давления на дно МО от времени:
1 – $T_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_0 = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 3. Time dependence of the average pressure on a projectile bottom:
 $T_0 = (1) -40$, (2) 0, and (3) $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

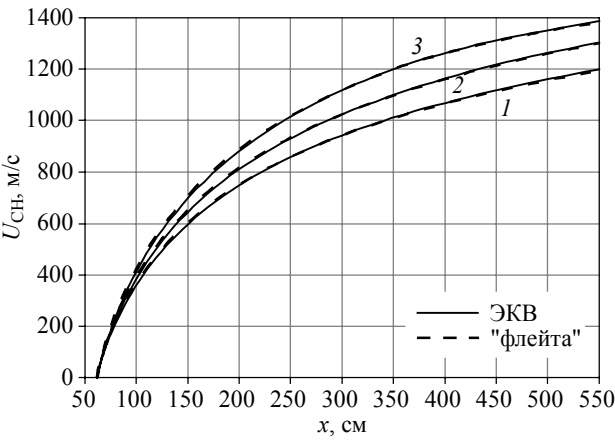


Рис. 4. Зависимость скорости МО от его координаты:
1 – $T_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_0 = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 4. Velocity of the projectile as a function of its coordinate:
 $T_0 = (1) -40$, (2) 0, and (3) $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Основные результаты расчетов

Вариант расчета	1 1	2 1	3 1	1 2	2 2	3 2
Тип воспламенения	ЭКВ	ЭКВ	ЭКВ	«флейта»	«флейта»	«флейта»
Начальная температура, °C	-40	0	+40	-40	0	+40
Дульная скорость, м/с	1199.5	1302.3	1386.3	1194.5	1298.2	1382.8
Дульное время, мс	12.31	11.52	10.77	9.07	8.50	7.97
Время зажигания, мс	2.92	2.39	2.83	0.84	0.83	0.63
Максимальное давление, МПа	291.3	351.3	428.4	285.8	344.5	421.2

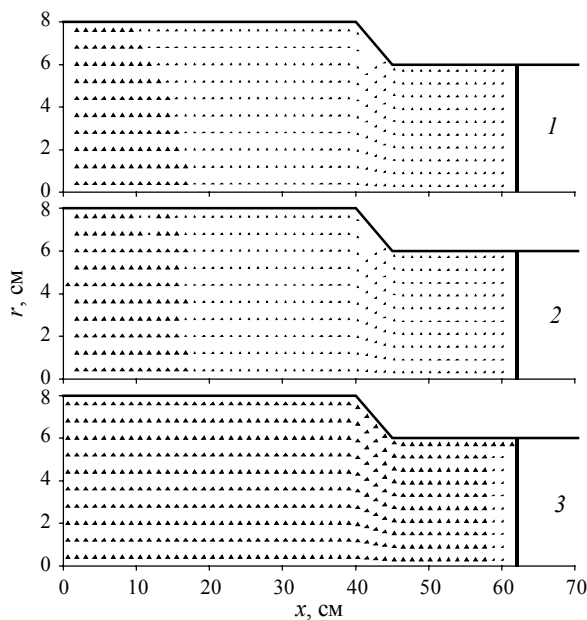


Рис. 5. Поле воспламенения в три последовательных момента времени: 1 – $t = 0.2$ мс; 2 – $t = 0.8$ мс; 3 – $t = 2.0$ мс; ЭКВ-воспламенение, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 5. Ignition fields at three consecutive time instants: $t = (1) 0.2$, (2) 0.8, and (3) 2.0 ms; EPI-ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

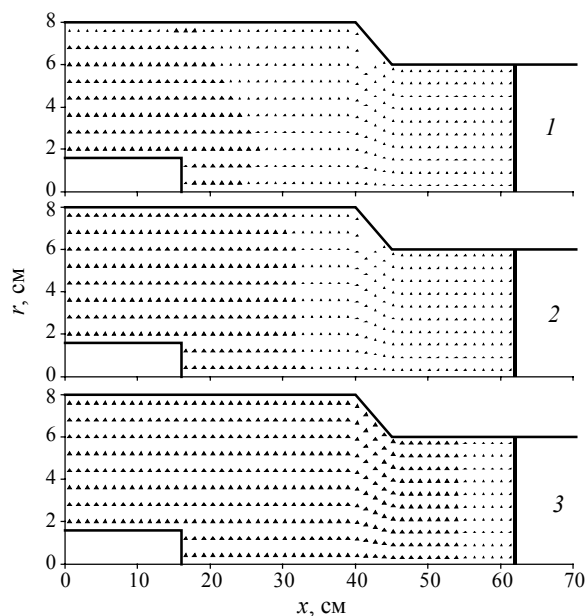


Рис. 6. Поле воспламенения в три последовательных момента времени: 1 – $t = 0.1$ мс; 2 – $t = 0.4$ мс; 3 – $t = 0.7$ мс; воспламенение «флейтой», $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 6. Ignition fields at three consecutive time instants: $t = (1) 0.1$, (2) 0.4, and (3) 0.7 ms; "flute" plasma torch ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

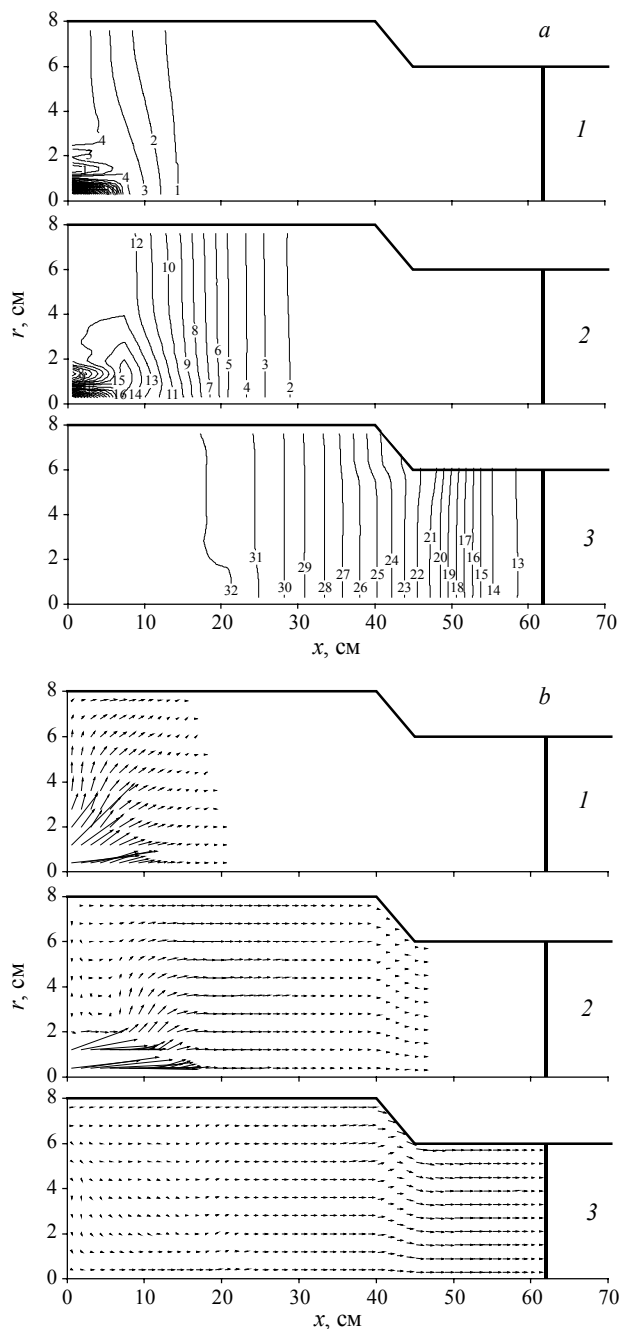


Рис.7. Изолинии давления (а) и поле скоростей (б):
 1 – $t = 0.2$ мс; 2 – $t = 0.8$ мс; 3 – $t = 2.0$ мс; Э

ЭКВ-воспламенение, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 7. (a) Pressure isolines and (b) velocity fields:
 $t = (1) 0.2, (2) 0.8, \text{ and } (3) 2.0$ ms;
 EPI-ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

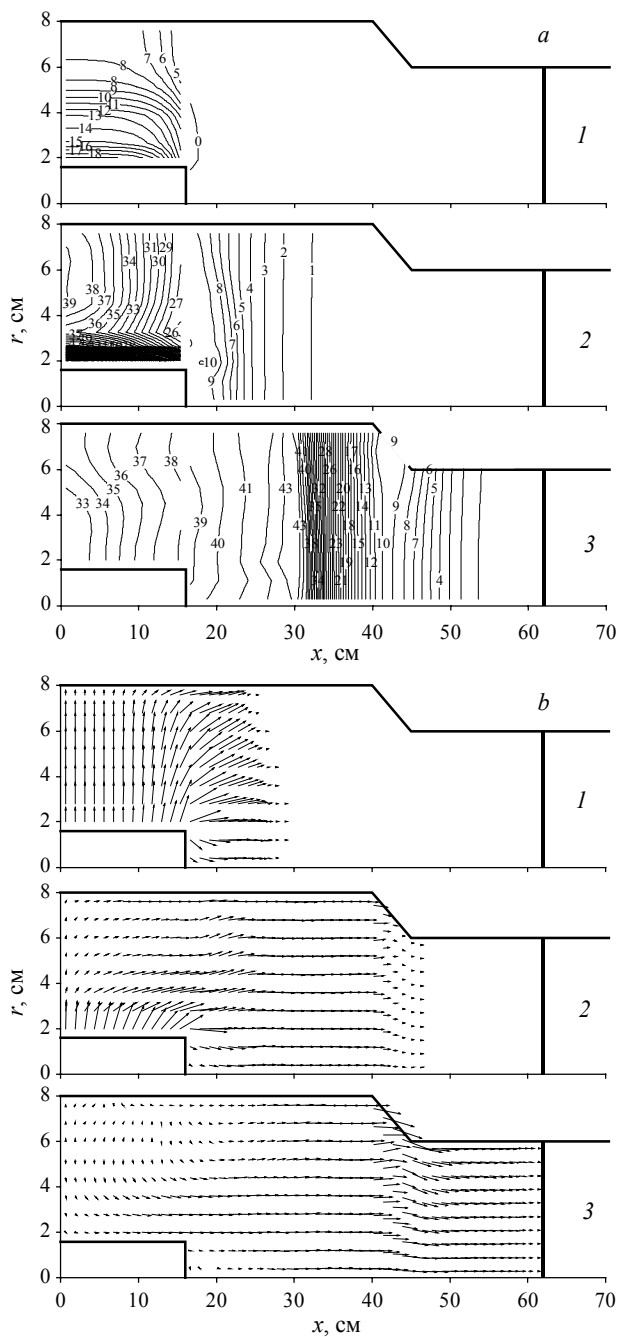


Рис. 8. Изолинии давления (а) и поле скоростей (б):

1 – $t = 0.1$ мс; 2 – $t = 0.4$ мс; 3 – $t = 0.7$ мс;

воспламенение «флейтой», $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 8. (a) Pressure isolines and (b) velocity fields:

$t = (1) 0.1, (2) 0.4, \text{ and } (3) 0.7 \text{ ms};$

"flute" plasma torch ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

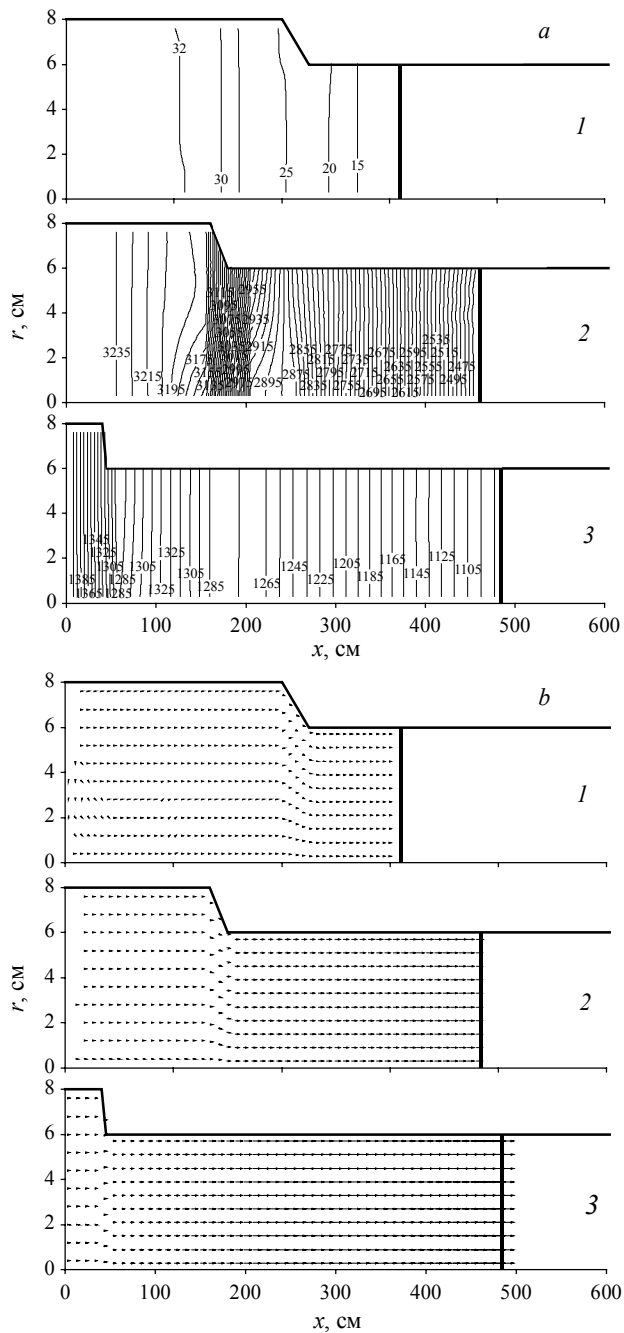


Рис. 9. Изолинии давления (а) и поле скоростей (б):

$1 - t = 2$ мс; $2 - t = 7$ мс; $3 - t = 10$ мс;

ЭКВ-воспламенение, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 9. (a) Pressure isolines and (b) velocity fields:

$t = (1) 2, (2) 7, \text{ and } (3) 10$ ms;

EPI-ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

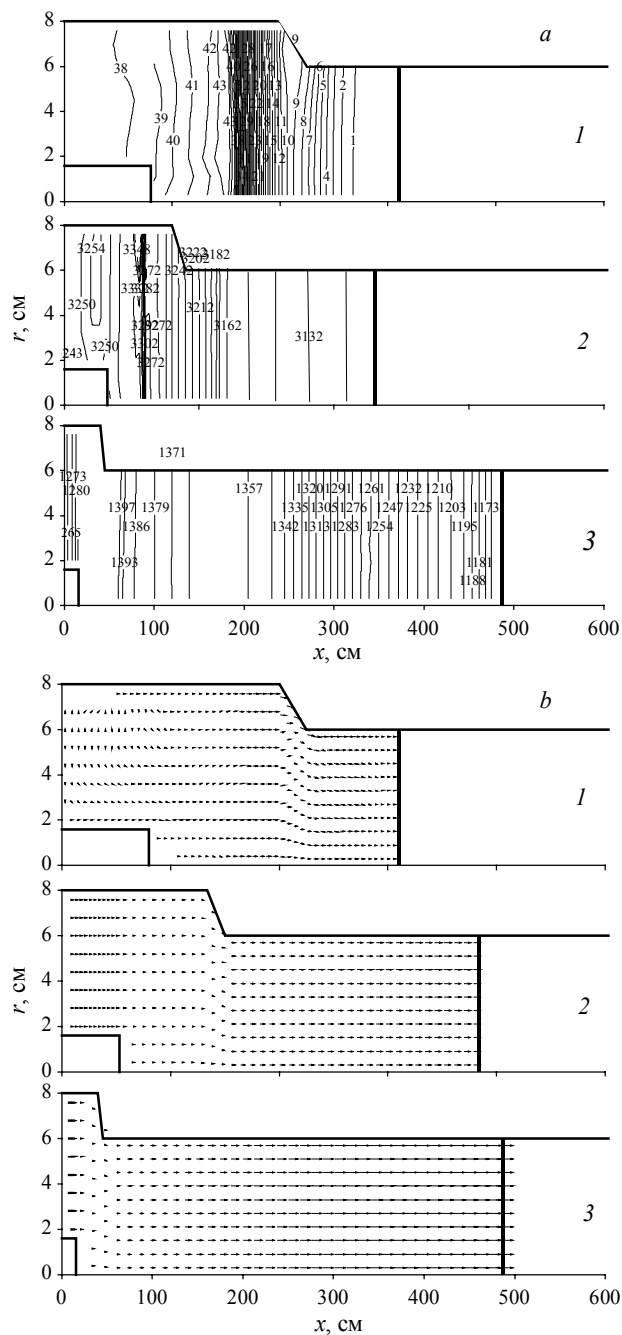


Рис. 10. Изолинии давления в барах (а) и поле скоростей (б):
 1 – $t = 0.7$ мс; 2 – $t = 4.0$ мс; 3 – $t = 8.0$ мс;
 воспламенение «флейтой», $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Fig. 10. (a) Pressure isolines in bars and (b) velocity fields:
 $t = (1) 0.7, (2) 4.0, \text{ and } (3) 8.0$ ms;
 "flute" plasma torch ignition, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Таким образом, в данной работе проведено исследование влияния начальной температуры топлива и типа воспламенения на функционирование модельной баллистической установки калибром 120 мм. Описана разработанная численная методика, которая позволяет в осесимметричной постановке моделировать артиллерийский выстрел как при использовании воспламенительного устройства ЭТХ-технологии типа «флейта», так и при традиционном ЭКВ-воспламенении. Приведены некоторые результаты расчета внутрибаллистических характеристик выстрела для шести различных расчетных вариантов начальной конфигурации, которые позволяют судить о происходящих в ходе выстрела процессах. Показано, что начальная температура топлива в исследованном диапазоне существенно влияет на баллистические характеристики выстрела и не учет этого фактора может значительно понизить точность моделирования. Также отмечено, что тип воспламенения значительно влияет на время зажигания метательного заряда и время выстрела в целом, однако на скорость метания и максимальное давление в заснарядном пространстве существенного влияния не оказывает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., Широков В.М. Разработка импульсных плазмотронов и опыт их применения для инициирования насыпных зарядов в баллистических экспериментах // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 2. С. 147–152.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987. 464 с.
3. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
4. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 259 с.
5. Хоменко Ю.П., Широков В.М. Определение нестационарных законов горения пороха на основе манометрических испытаний // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 6.
6. Ищенко А.Н., Хоменко Ю.П. Влияние силового межфазного взаимодействия на характеристики конвективного горения пористых сред // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 4. С. 65–77.
7. Ergun S. Fluid flow through randomly packed columns // Chem. Eng. Progr. 1952. V. 48. P. 89–94.
8. Барышев М.С., Воронин В.Н., Ищенко А.Н., Хоменко Ю.П. Экспериментальное исследование законов сопротивления при течении газа в низкопористой среде в широком диапазоне чисел Рейнольдса // Изв. вузов. Физика. 1993. № 4. С. 101–109.
9. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
10. Bogdanoff D.W., Miller R.J. New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns. NASA TM – 110363, September 1995. 45 p.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
12. Страуструп Б. Язык программирования C++: пер. с англ. Киев: Диасофт, 1993. 264 с.
13. Бланиет Ж., Саммерфилд М. Qt 4: Программирование GUI на C++. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. 736 с.

Статья поступила 12.12.2020

Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Ushakova O.V. (2021) INFLUENCE OF THE INITIAL PROPELLANT TEMPERATURE AND IGNITION METHOD ON BALLISTIC CHARACTERISTICS OF A SHOT IN THE SETTING OF A 120 MM CALIBER MODEL BALLISTIC INSTALLATION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 70. pp. 37–50

DOI 10.17223/19988621/70/4

Keywords: ignition, ballistic characteristics, initial propellant temperature, axisymmetric mathematical model, electric primer-igniter, "flute" plasma torch.

In this paper, the effect of the initial temperature of a propellant charge and ignition method on ballistic characteristics of a shot from a model installation with a caliber of 120 mm is theoretically studied. Two types of charge ignition are considered: ignition by means of an electric primer-igniter and by a "flute"-type plasma torch. The developed numerical technique is described, which serves to simulate an artillery shot in an axisymmetric setting in conditions of the indicated ignition types. Three values of the initial temperature of the propellant charge are considered: -40 , 0 , and $+40$ °C. Configurations of computational domains for the given ignition methods are shown, and some calculated shot ballistic characteristics for six different calculation options, differing in the ignition type and initial temperature, are presented. It is revealed that in the specified range, the initial temperature of the propellant charge significantly affects the ballistic characteristics of the shot, such as a throwing speed and a maximum pressure in the chamber, while the type of ignition does not significantly affect these characteristics. It is noted that the ignition type has a great impact on temporal characteristics of the shot: the ignition time of a propellant charge and the time of the shot as a whole.

Financial support. This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 0721-2020-0032.

Aleksandr N. ISHCENKO (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Vladimir Z. KASIMOV (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ksm@niipmm.tsu.ru

Olga V. USHAKOVA (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: olga@ftf.tsu.ru

REFERENCES

1. Baryshev M.S., Burakov V.A., Burkin V.V., Ischenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Khomenko Yu.P., Shirokov V.M. (2009) Razrabotka impul'snykh plazmotronov i opyt ikh primeneniya dlya initsirovaniya nasypanykh zaryadov v ballisticheskikh eksperimentakh [Development of pulse plasma injectors and the experience of their application for initiation of bulk charges in ballistic experiments]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya – Chemical Physics and Mesoscopics*. 11(2). pp. 147–152.
2. Nigmatulin R. (1991) *Dynamics of Multiphase Media*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
3. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical modeling of interior ballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: SB RAS Publishing House.
4. Rusyak I.G., Ushakov V.M. (2001) *Vnutrikamernye geterogennye protsessy v stvol'nykh sistemakh* [Intrachamber heterogeneous processes in barrel systems]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publisher.

5. Khomenko Yu.P., Shirokov V.M. (2006) Determining the unsteady combustion behavior of propellants from results of closed-bomb testing. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 42(2). pp. 149–157. DOI: 10.1007/s10573-006-0033-7.
6. Ishchenko A.N., Khomenko Y.P. (1997). Effect of force interphase interaction on the characteristics of convective combustion of porous media. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 33(4). pp. 448–458. DOI: 10.1007/BF02671838.
7. Ergun S. (1952) Fluid flow through randomly packed columns. *Chemical Engineering Progress*. 48. pp. 89–94.
8. Baryshev M.S., Voronin V.N., Ishchenko A.N., Khomenko Yu.P. (1993) Experimental investigation of the resistance laws for gas flow in a low-porosity medium at high Reynolds numbers. *Russian Physics Journal*. 36(4). pp. 376–384. DOI: 10.1007/BF00570746.
9. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solving of multidimensional problems in gas dynamics]. Moscow: Nauka.
10. Bogdanoff D.W., Miller R.J. (1995) *New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns*. NASA Technical Memorandum 110363.
11. Samarskiy A.A. (1977) *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka.
12. Stroustrup B. (1991) *The C++ Programming Language*. Addison-Wesley Publishing Company.
13. Blanchette J., Summerfield M. (2006) *C++ GUI Programming with Qt 4*. Prentice Hall PTR.

Received: December 12, 2020