

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПЫШКИ
ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

**В. Я. Басевич¹, В. С. Иванов¹, И. В. Семенов², С. М. Фролов¹,
Ф. С. Фролов¹**

¹ИХФ РАН

г. Москва, Россия

²ИАП РАН

г. Москва, Россия

Артиллерийский выстрел сопровождается рядом нежелательных физико-химических явлений, таких как выброс дымогазового облака, дульное пламя, ударные волны и др. Несмотря на то что эти явления давно изучаются и разработаны многочисленные методы их подавления, до сих пор имеются нерешенные проблемы. Одна из них — механизм возникновения дульных пламен. Известно [1], что температура пороховых газов перед истечением в атмосферу может достигать очень высоких значений: 3000–3500 К; пороховые газы состоят в основном из CO_2 , H_2O , CO , H и N_2 , причем суммарное содержание таких продуктов превращения пороха, как CO и H_2 , может достигать 20%–30%.

При выстреле наблюдается несколько вспышек:

- первичная вспышка (или первичное пламя) — небольшая, относительно слабо светящаяся область у среза орудийного ствола; связана с выбросом горячих (гетерогенных) продуктов горения пороха;
- промежуточная вспышка — более ярко светящаяся область, расположенная дальше от среза ствола и отделенная от первичного пламени темной зоной; вызвана ударным сжатием и разогревом пороховых газов в висячем скачке, образующемся в недорасширенной струе газов, истекающих из ствола;
- вторичная вспышка (или вторичное пламя) — протяженная сильно светящаяся область, расположенная дальше от ствола; связана с самовоспламенением и горением продуктов неполного превращения пороха при смешении с окружающим воздухом и может приводить к генерации сильной вторичной ударной волны. Вторичная вспышка может возникать как в основной струе пороховых газов, так и в боковых струях дульного тормоза.

Наиболее слабо изучена вторичная вспышка, что объясняется сложной структурой течения с неизотермическими струями, ударными волнами, кон-

тактными границами, турбулентными сдвиговыми слоями, микросмешением и химическими реакциями в многокомпонентной смеси пороховых газов с воздухом.

Одна из целей проекта, в рамках которого выполнена данная работа, — создание физико-математических моделей для многомерного численного моделирования вторичной вспышки при выстреле. Ниже представлены некоторые базовые сведения об используемых моделях и алгоритмах и результаты расчетов.

Многомерный расчет догорания пороховых газов после их истечения из орудийного ствола проводили, используя метод совместных функций плотности распределения вероятностей (СФПРВ) скорости и скаляров или метод частиц [2–4]. Мгновенные локальные состояния турбулентного реагирующего течения определяли с помощью эффективного численного алгоритма решения эволюционного уравнения для СФПРВ методом Монте-Карло в многомерном фазовом пространстве, т. е. СФПРВ представлялась в виде большого набора взаимодействующих частиц (состояний), обладающих индивидуальными свойствами (мгновенными локальными значениями массы, скорости, энтальпии, концентраций компонентов и др.). Для определения полей осредненного давления и масштаба турбулентности использовали метод контрольных объемов, с помощью которого решали уравнение для коррекции давления (метод SIMPLE — Semiimplicit method for pressure-linked equations) и уравнение для диссипации турбулентной кинетической энергии. В результате решения получали достаточно полную статистическую информацию о турбулентном реагирующем течении. Основное достоинство такого подхода — возможность определения средних скоростей химических реакций путем осреднения по ансамблям частиц (состояний), т. е. без использования каких-либо моделей взаимодействия турбулентности и химической кинетики.

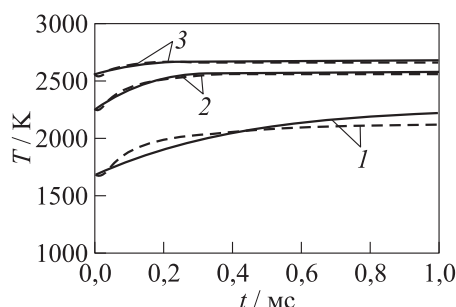
Для описания кинетики окисления продуктов горения пороха в воздухе использовали глобальный кинетический механизм (ГКМ), представленный в табл. 1.

На рис. 1 проведено сравнение расчетных температурных кривых, полученных с помощью детального кинетического механизма (ДКМ) [5] и ГКМ (штриховые и сплошные кривые соответственно), при окисления гомогенной смеси пороховых газов с воздухом при разных начальных температурах смеси и коэффициентах избытка горючего Φ . Здесь сравниваются результаты расчетов по ДКМ и ГКМ для значений $\Phi = 0,5, 1,0$ и $1,5$ и соответственно при разных начальных температурах после смешения: $T_0 = 1680, 2247$ и 2554 К. В целом оказалось, что ГКМ удовлетворительно описывает окисление пороховых газов в воздухе. Наибольшее расхождение между результатами расчетов по ДКМ и ГКМ наблюдается у богатых смесей с $\Phi = 1,5$ при температуре $T_0 = 1680$ К (этот вариант на рис. 1 не показан). Отметим, что для задачи истечения пороховых газов такой случай наименее

Таблица 1 Аррениусовские параметры констант скоростей реакций глобального механизма догорания пороховых газов

№	Реакция	Прямая		Обратная	
		A_i , моль, л, с	E , ккал/моль	A_i , моль, л, с	E , ккал/моль
1	$\text{H}_2 + \text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$2,31 \cdot 10^{12}$	21,0	$5,81 \cdot 10^{15}$	135,5
2	$\text{CO} + \text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{CO}_2$	$2,81 \cdot 10^{11}$	21,0	$1,42 \cdot 10^{18}$	153,8
3	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$1,00 \cdot 10^{12}$	41,5	$3,10 \cdot 10^{13}$	49,1
4	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{NO}$	$1,00 \cdot 10^{17}$	135,0	$4,00 \cdot 10^{15}$	93,3

Замечания: Скорость реакции: $k_i = aA_i \exp(-E_i/(RT))$, где $a = 2,99-1,986\Phi$ в реакциях $i = 1$ и 2 (для коэффициента избытка горючего $\Phi = 0,5-1,5$); для реакций $i = 3$ и 4 всегда $a = 1$.

**Рис. 1** Расчетные зависимости температуры от времени при догорании пороховых газов в атмосферном воздухе, полученные с помощью ДКМ (штриховые кривые) и ГКМ (сплошные кривые): 1 — $T_0 = 1680$ К и $\Phi = 0,5$; 2 — $T_0 = 2247$ К и $\Phi = 1,0$; $T_0 = 2554$ К и $\Phi = 1,5$

вероятен, поскольку низкая температура свидетельствует о большом разбавлении пороховых газов атмосферным воздухом и низкотемпературная смесь будет скорее обеднена, чем обогащена горючим.

Приведем пример модельного расчета холостого выстрела, демонстрирующий возможности метода СФПРВ. На рис. 2 приведена схема сектора осесимметричной расчетной области размером 500×1800 мм (штрихпунктирная линия — ось области). В левом нижнем углу находится часть оружейного ствола — труба радиусом 10 мм. В начальный момент времени труба полностью заполнена пороховыми газами при давлении 430 атм, температуре 3000 К и с составом, включающим 29% CO_2 , 19% CO , 32% H_2O , 1,5% H_2 и 18,5% N_2 (объемные доли). Указанный состав пороховых газов приблизительно соответствовал равновесному составу при сжигании пироксилинового пороха на основе нитроглицерина (50%) и нитроклетчатки (50%). Остальная часть расчетной области заполнена воздухом при нор-

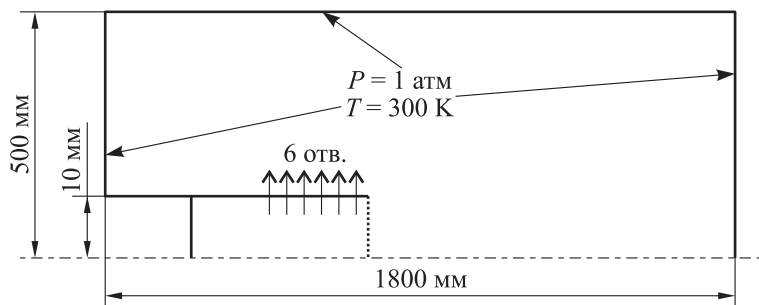


Рис. 2 Схема расчетной области

мальных условиях. На левом конце трубы в течение всего расчета давление, температура и состав пороховых газов поддерживаются равными начальным значениям. На боковой поверхности ствола имеется 6 кольцевых щелей, каждая шириной 4 мм. Щели использовались для моделирования истечения пороховых газов из дульного тормоза.

В начале расчета на открытом конце трубы и на щелях происходит распад разрыва с образованием ударных волн и с истечением горячих пороховых газов в окружающее пространство. Цель расчета — определить местоположение и время возникновения вспышки, вызванной смешением реакционноспособных пороховых газов с окружающим воздухом.

На рис. 3 показана последовательность распределений температуры в расчетной области в различные моменты времени после начала расчета. Первые горячие точки возникают в момент времени $\sim 0,3$ мс (показаны стрелками). Горячие точки 1 и 2 находятся в области соударения основной ударной волны, образованной вследствие истечения пороховых газов в осевом направлении, с ударной волной, образованной вследствие бокового истечения пороховых газов через щели дульного тормоза. В отличие от горячей точки 1, которая образуется в области смешения разлетающихся пороховых газов с ударно сжатым воздухом, точка 2 целиком находится в области, занятой пороховыми газами, и интереса не представляет. Чуть позже, в момент времени $\sim 0,7$ мс, появляется еще несколько горячих точек: точки 3, 4 и 5 (расчетное распределение средней температуры вдоль штриховой линии показано на рис. 4). Первая вспышка (акт самовоспламенения) возникает в сдвиговом слое на левой границе струи пороховых газов, истекающих через щели дульного тормоза, с атмосферным воздухом приблизительно через 0,9 мс после начала процесса (точка 3). Температура в точке 3 превышает 4000 К, что связано с отсутствием в ГКМ реакции диссоциации воды. В последующий момент времени ($\sim 1,1$ мс) самовоспламенение охватывает практически весь завихренный внешний сдвиговый слой струи дульного тормоза. Кроме того, происходит самовоспламенение от горячей точки 1. С течением

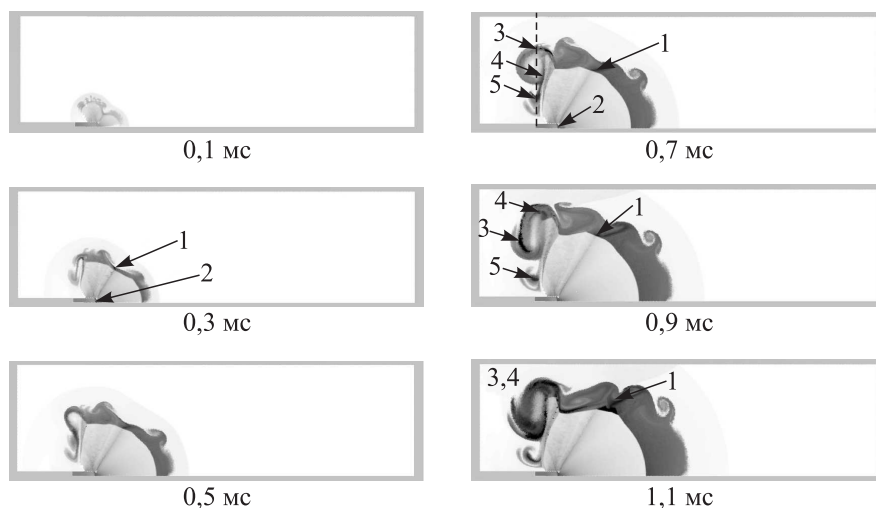


Рис. 3 Распределения температуры в расчетной области в различные моменты времени

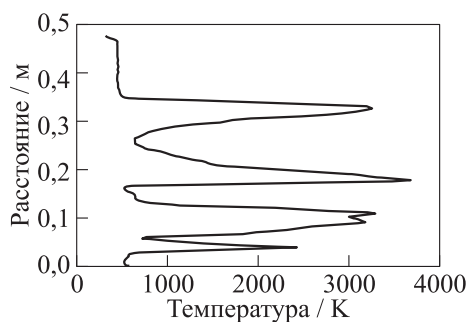


Рис. 4 Распределение средней температуры вдоль штриховой линии, показанной на рис. 3 в момент времени 0,7 мс, предшествующий первой вспышке

времени самовоспламенение распространяется на другие участки течения. Следует, однако, отметить, что к моменту времени 1,1–1,2 мс верхняя часть газоздушного облака подвержена паразитному влиянию ударной волны, отраженной от верхней границы расчетной области, поэтому дальнейшее развития процесса здесь не рассматривается.

Таким образом, разработан эффективный численный алгоритм, основанный на методе совместных функций плотности распределения вероятностей скорости и скаляров, позволяющий решать многомерную задачу о местоположении и времени возникновения вторичной вспышки при выстреле, вызванной химическими реакциями продуктов превращения пороха (СО и

H_2) с окружающим воздухом. Демонстрационные расчеты показали, что вторичная вспышка возникает в виде последовательности локализованных актов самовоспламенения в горячих точках (областях), образованных в результате смешения пороховых газов с ударно сжатым воздухом, а также благодаря ударному сжатию смеси в местах столкновения ударных волн. Для увеличения времени наблюдения планируется увеличить размеры расчетной области. Кроме того, планируется увеличить начальное давление в трубе и учесть нестационарность истечения пороховых газов из ствола, а также наличие частиц конденсированной фазы в продуктах горения пороха.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-01-12120-офи-м-2011 «Математическое моделирование на многопроцессорных супер-ЭВМ петафлопного класса разномасштабных пространственных нестационарных многофазных течений в импульсных тепловых машинах со сложной геометрией с учетом процессов горения»).

Литература

1. Klingenberg, G., and H. Mach. 1976. Investigation of combustion phenomena associated with the flow of hot propellant gases. 1. Spectroscopic temperature measurements inside the muzzle flash of a rifle. *Combust. Flame* 27:163–76.
2. Rose, M., P. Roth, S. M. Frolov, M. G. Neuhaus, and R. Klemens. 1997. Lagrangian approach for modeling two-phase turbulent reactive flows. In: *Advanced computation and analysis of combustion*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and P. Givi. Moscow: ENAS Publs. 175–95.
3. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, M. G. Neuhaus, and R. Tatschl. 1997. A joint-scalar PDF method for modeling premixed and nonpremixed combustion. In: *Advanced computation and analysis of combustion*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and P. Givi. Moscow: ENAS Publs. 537–62.
4. Rose, M., P. Roth, and S. M. Frolov. 1999. Modelling of turbulent gas/particle combustion by a Lagrangian PDF method. *Combust. Sci. Technol.* 149:95–113.
5. Басевич В. Я., Веденев В. И., Фролов С. М., Романович Л. Б. Неэкстенсивный принцип построения механизмов окисления и горения нормальных алкановых углеводородов: переход от C_1 – C_2 к C_3H_8 // Хим. физика, 2006. Т. 25. № 11. С. 87–96.