

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКАМЕРНОГО ДУЛЬНОГО ТОРМОЗА

В.В. Садовский¹, М. В. Жарков¹, П.И. Карасев², А.А. Аксенов²
¹ОАО ЦНИИ «Буревестник», г. Нижний Новгород, Россия
²ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

Одной из проблем, возникающих при выполнении проектных расчетов артиллерийских систем, является определение характеристик дульных тормозов (ДТ), в частности значений характеристик его эффективности. Экспериментальное определение этих характеристик проводится на стенде свободного отката (рис.1). В ходе экспериментов определяются значения максимальных скоростей отката ствола при наличии дульного тормоза и без него (v_T и v_{max} соответственно), которые в дальнейшем преобразуются при помощи известных зависимостей в конкретные значения характеристик эффективности.



Рис.1 Стенд свободного отката

Натурный эксперимент для определения скоростей отката требует высоких финансовых затрат, а часто и вовсе не может быть реализован (например, когда тормоз выполнен со стволом как единое целое). Поэтому актуальной задачей является определение значений характеристик эффективности ДТ расчетным путем.

Расчетное определение эффективности ДТ основано на определении тянущего усилия, создаваемого тормозом в различные моменты времени при истечении из его отверстий пороховых газов. Параметры пороховых газов на входе в ДТ в различные моменты времени определяются расчетами внутренней баллистики и являются при расчете процесса истечения из ДТ исходными данными. По величине тянущего усилия можно определить изменение импульса, действующего на откатные части орудия при добавлении ДТ, а, значит, и получить значения его характеристик.

Целью данного исследования являлось численное моделирование процесса истечения пороховых газов из ДТ и определение усилий, создаваемых пороховыми газами на его поверхностях. Моделирование проводилось на примере многокамерного дульного тормоза (рис. 2).

В ходе внутрибаллистических расчетов были получены значения параметров газового потока в сечении, которое находится на расстоянии 325 мм от первой камеры (табл. 1). Поэтому к геометрии дульного тормоза был добавлен участок ствола до этого сечения (рис. 3).

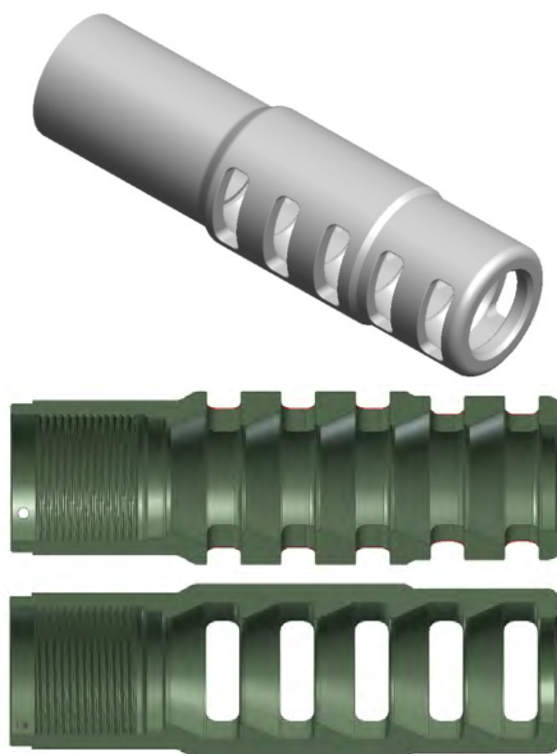


Рис. 2 Исходная геометрия дульного тормоза



Рис.3 Модифицированная геометрия ДТ

Табл. 1. Результаты расчетов внутренней баллистики

Время, мс	Давление, кгс/см ²	Температура, К	Плотность, кг/м ³	Скорость, м/с
0	779,70	1803	117,65	895,0
1	683,75	1759	105,76	883,9
2	600,57	1716	95,20	873,2
3	528,34	1675	85,80	862,7
4	465,50	1636	77,43	852,4
5	410,76	1597	69,96	842,4
6	362,98	1561	63,28	832,6
7	321,22	1525	57,31	823,1
8	284,66	1491	51,96	813,8
9	252,60	1457	47,16	804,6
10	224,46	1425	42,85	795,7
12	177,91	1364	35,49	778,4
14	141,72	1307	29,51	761,9
16	113,44	1253	24,63	746,0
18	91,21	1202	20,64	730,8
20	73,67	1155	17,36	716,2
22	59,75	1110	14,64	702,2
24	48,66	1068	12,40	688,7
26	39,78	1028	10,53	675,8
28	32,64	990	8,97	663,3
30	26,89	955	7,66	651,2
32	22,22	921	6,56	639,6
34	18,43	889	5,64	628,4
36	15,33	859	4,86	617,6
38	12,79	830	4,20	607,1
40	10,71	802	3,63	597,0
42	8,99	776	3,15	587,2
44	7,57	751	2,74	577,8
46	6,39	728	2,39	568,6
48	5,41	705	2,09	559,8
50	4,59	684	1,83	551,2
55	3,08	634	1,32	530,8
60	2,10	590	0,97	511,8
62,04	1,80	573	0,85	504,5

Следует заметить, что при расчете процесса истечения необходимо учитывать наличие внутри ДТ движущегося снаряда. Поскольку характер истечения газов будет зависеть от геометрии снаряда, в расчете необходимо использовать его реальную геометрию (рис. 4).

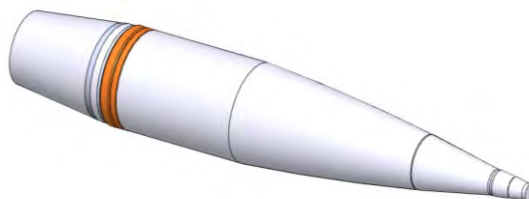


Рис.4 Геометрия снаряда

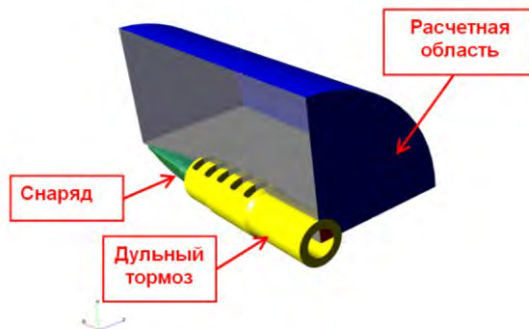


Рис.5 Снаряд и дульный тормоз в расчетной области

При построении расчетной области учитывалось следующее обстоятельство. Дульный тормоз имеет две плоскости симметрии, поэтому течение внутри ДТ и в окружающем пространстве можно считать симметричным. Это позволяет использовать расчетную область в форме цилиндрического сектора, имеющего угол 90° . В расчете участвует часть геометрии ДТ и снаряда находящаяся внутри расчетной области.

Расчет процесса истечения имеет следующие особенности:

- зоны до- и сверхзвукового течения;
- значительные градиенты скорости, давления и температуры;
- нестационарные граничные условия;
- задание снаряда как подвижного тела с реальной геометрией;
- ускорение снаряда под действием гидросилы;
- массоперенос.

Поскольку течение газа вне ДТ преимущественно сверхзвуковое, то возмущения не распространяются вверх по потоку, что позволяет расположить границы расчетной области относительно близко от ДТ. Внешние границы располагаются на расстоянии 1,7 м от входного сечения в направлении движения снаряда и на расстоянии 0,75 м в направлении, перпендикулярном движению снаряда.

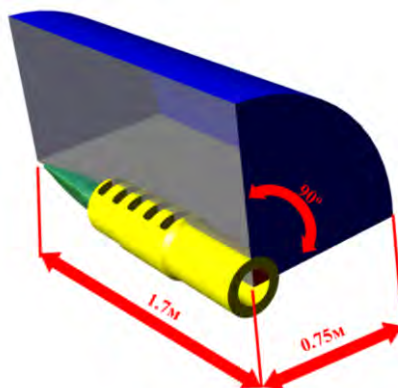


Рис.6 Геометрия расчетной области

Граничные условия расставляются следующим образом (рис. 7):

- На границах расчетной области, совпадающих с плоскостями симметрии снаряда и дульного тормоза, ставится граничное условие «Симметрия».
- На срезе ствола ставится граничное условие «Вход».
- На внешних границах расчетной области ставится условие «Свободный выход».
- На снаряде и дульном тормозе ставится условие «Стенка».

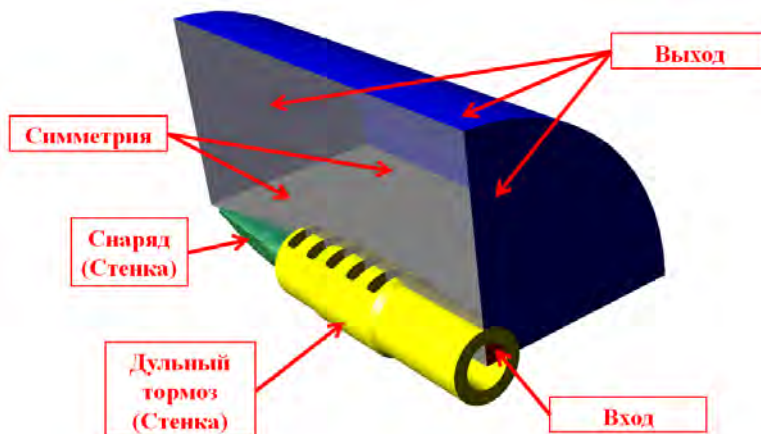


Рис. 7 Расстановка граничных условий

В расчетной области заданы начальные условия, соответствующие неподвижному атмосферному воздуху: нулевая скорость, давление $1.01 \cdot 10^5$ Па и температура 288 К (рис. 8).

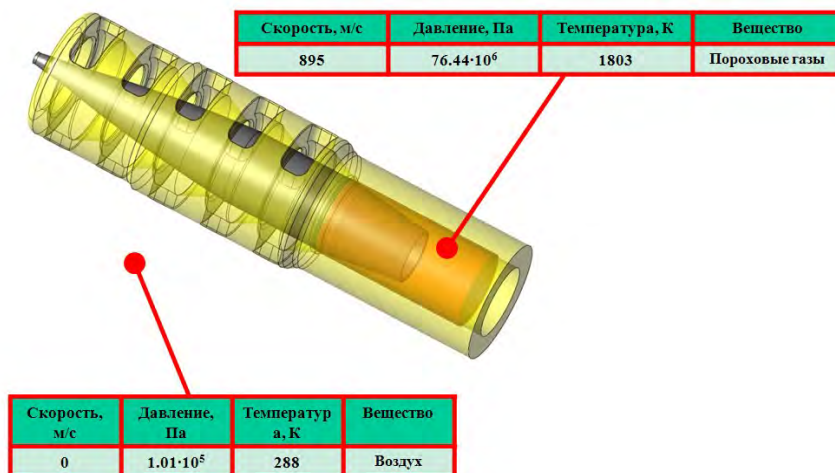


Рис.8 Начальные условия

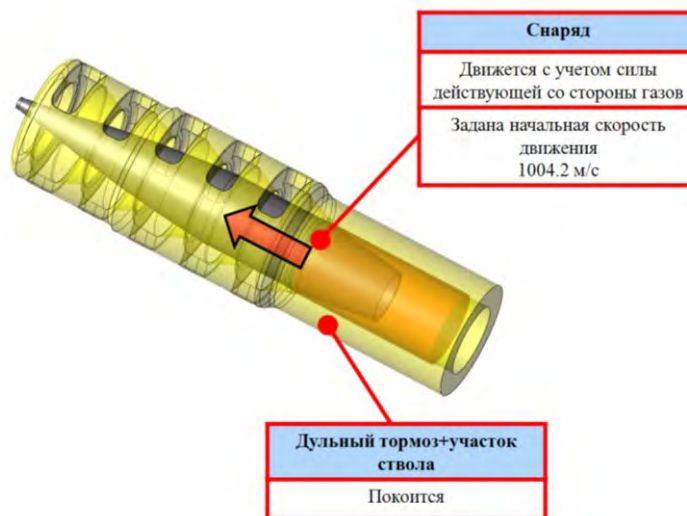


Рис.9 Начальные условия для подвижных тел

В цилиндре за снарядом заданы начальные условия, соответствующие параметрам пороховых газов в начальный момент времени из результатов расчета внутренней баллистики: скорость 895 м/с, давление 76.44 МПа, температура 1803 К (рис. 8).

В начальный момент времени ведущий поясок снаряда находится в крайнем положении в трубе, в котором после начала движения снаряда начнется прорыв пороховых газов в ДТ (рис. 9). В этом сечении снаряд имеет скорость, соответствующая значению, полученному при расчете внутренней баллистики.

При расчете учитывалось различие свойств воздуха и пороховых газов и смешение этих веществ (табл. 2), а также зависимость вязкости пороховых газов температуры. Указанная зависимость имеет вид (1).

$$\begin{aligned} \mu &= 2,85 \cdot 10^{-5}, T_2 < 800K \\ \mu &= 0,778 \cdot 10^{-5} \cdot (3,329 \cdot 10^{-3} \cdot T_2 + 1), T_2 < 1600K \\ \mu &= 1,778 \cdot 10^{-5} \cdot (1,986 \cdot 10^{-3} \cdot T_2 + 1), T_2 > 1600K \end{aligned} \quad (1)$$

Табл. 2 – Свойства веществ

Параметр	Значение для воздуха	Значение для пороховых газов	Размерность
Молярная масса, m	0.02884	0.023	кг моль ⁻¹
Молекулярная динамическая вязкость, μ	Из таблицы базы данных $\mu(p,T)$	$\mu(T)$	кг м ⁻¹ с ⁻¹
Молекулярная теплопроводность, λ	Из таблицы базы данных $\lambda(p,T)$	1.21	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
Удельная теплоёмкость при постоянном давлении, CP	Из таблицы базы данных CP(p,T)	1650	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹

Способ задания граничных условий указан в табл. 3.

Табл. 3 – Параметры граничных условий

	Граничное условие «Вход»	Граничное условие «Выход»
Способ задания	Нормальная скорость с давлением	Давление на выходе
Скорость, м/с	По формуле изменения скорости по времени	-
Давление, Па	По формуле изменения давления по времени	0
Температура, К	По формуле изменения температуры по времени	Нулевой градиент

Из расчета внутренней баллистики получены данные по изменению параметров на срезе канала ствола (табл. 1). На основе этих данных были получены интерполяционные зависимости от времени, через которые задавались параметры пороховых газов на входе в расчетную область. Полученные зависимости имеют вид (2):

$$T=0.0000383*t_4 - 0.00789*t_3 + 0.737*t_2 - 44.3*t + 1803;$$

$$V= -0.000528 * t_3 + 0.105 * t_2 - 10.8 * t + 894; \quad (2)$$

$$p= 0.00000021 * t_6 - 0.0000475 * t_5 + 0.00439 * t_4 - 0.214 * t_3 + 6.04 * t_2 - 98.3 * t + 779.7$$

В ходе выполнения работы было произведено исследование сходимости по сетке на задаче с истечением из дульного тормоза воздуха. Анализ сходимости по сетке производится путем оценки изменения силы, действующей на дульный тормоз в течение 0.005 с при различном размере ячеек вблизи дульного тормоза (рис. 10). Данные о расчетных сетках, применявшихся при этом исследовании, представлены в таблице ниже (табл. 4). Результаты расчетов с различными сетками приведены в табл. 5.

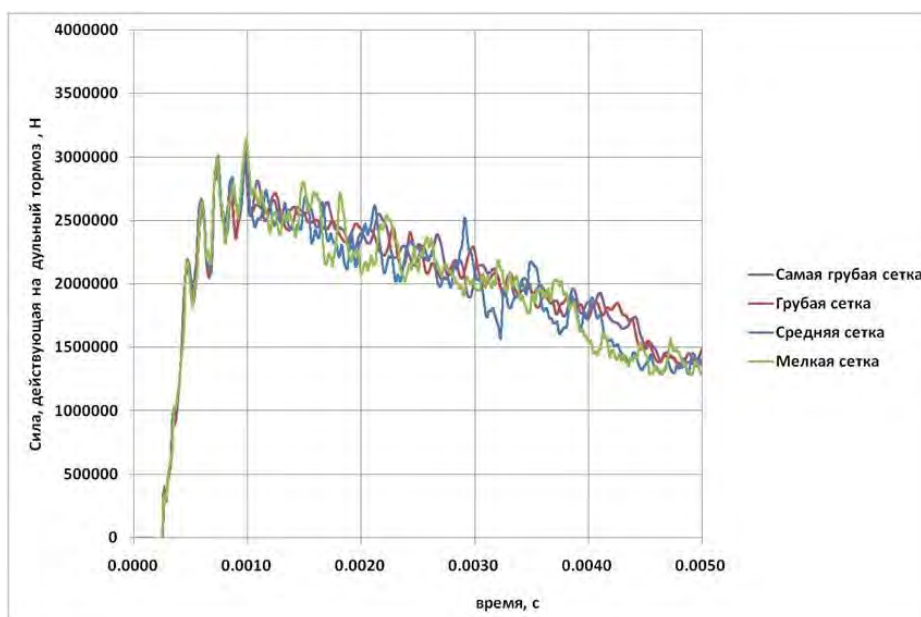


Рис.10 График изменения силы, действующей на дульный тормоз с течением времени для разных расчетных сеток

Табл. 4 Расчетные сетки, использовавшиеся при исследовании сходимости

Сетка	Количество ячеек, тыс.	Средний шаг по времени в процессе расчета
Самая грубая сетка	566	$3.97 \cdot 10^{-7}$
Грубая сетка	583	$5.30 \cdot 10^{-7}$
Средняя сетка	3 255	$2.57 \cdot 10^{-7}$
Мелкая сетка	10 036	$2.54 \cdot 10^{-7}$

Таблица 5 Результаты расчетов с различными расчетными сетками

Сетка	Количество ячеек, тыс.	Максимальное значение силы, Н	Различие со значением на предыдущей сетке, %	Интеграл силы по времени, Н·с	Различие со значением на предыдущей сетке, %
Самая грубая сетка	566	2977088		9855.69	
Грубая сетка	583	2963236	-0.46	9781.311	-0.75
Средняя сетка	3 255	3046048	2.79	9516.77	-2.7
Мелкая сетка	10 036	3141252	3.12	9579.539	0.66

Все сетки, на которых проверялась сеточная сходимость, дали различие с предыдущей сеткой менее 5%. Поэтому, учитывая, что продолжительность процесса последствия пороховых газов достаточно велика 62 миллисекунды (табл.

1), для проведения расчетов принята сетка, обозначенная как «Грубая» (рис. 10).

Сетка строится со сгущением около дульного тормоза и разрежением у внешних границ (рис. 11а). Вблизи дульного тормоза ячейки начальной сетки имеют почти одинаковый размер (рис. 11б). Полученная расчетная сетка имеет размеры 234×52×52 ячеек (всего около 583 тысячи ячеек).

Схема истечения пороховых газов из ДТ, полученная в результате расчетов, показана на рис. 12. Результаты расчетов изменения тянущего усилия во времени приведены на рис. 13.

Интегрирование силы, действующей на дульный тормоз, позволяет получить изменение импульса ΔI , действующего на откатные части за счет применения ДТ.

$$\Delta I = 21774.32 \text{ Н·с.}$$

Таким образом, проведенные результаты расчетов позволяют:

- получить все необходимые данные для оценки эффективности ДТ;
- получить данные для прочностного расчета дульного тормоза в динамике;

В дальнейшем после сравнения с экспериментальными данными и выделения в качестве варьируемых параметров конструктивных характеристик данный расчет позволит оптимизировать конструкцию многокамерного дульного тормоза по максимуму тянущего усилия с учетом прочностных ограничений.

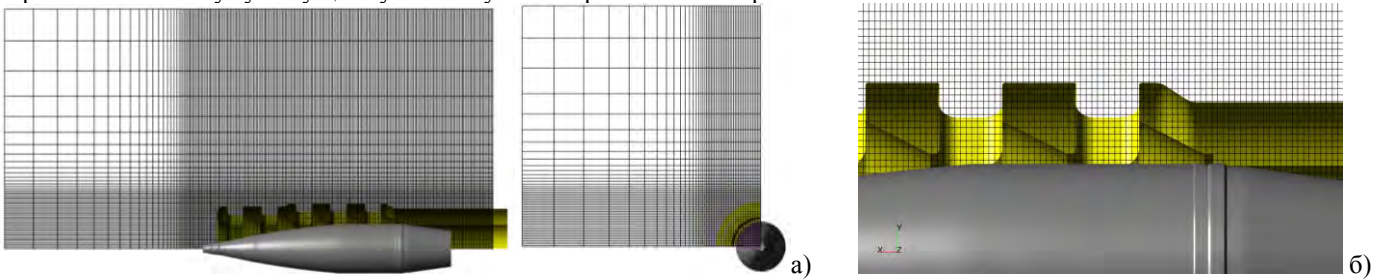


Рис.11 Расчетная сетка, принятая для проведения основного расчета а) общий вид, б) рядом со снарядом внутри дульного тормоза

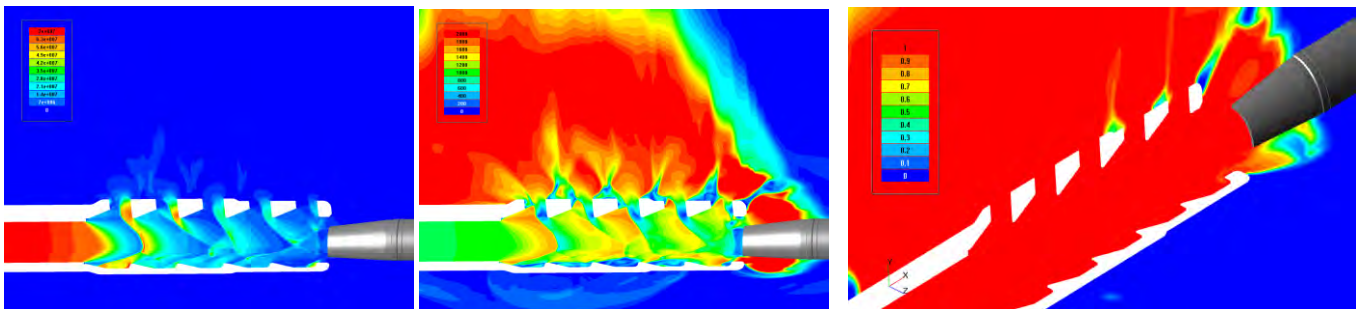


Рис.12 Распределение а) давления б) скорости и в) концентрации пороховых газов в вертикальной и горизонтальной плоскостях при вылете снаряда из дульного тормоза

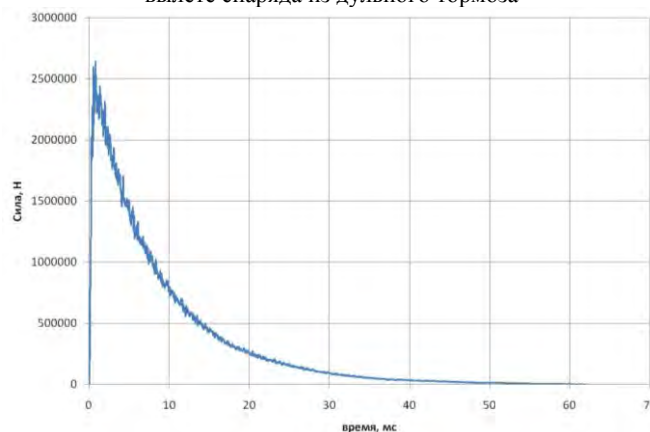


Рис.13 Изменение силы, действующей на дульный тормоз с течением времени