

ОПТИМИЗАЦИЯ ДУЛЬНОГО ТОРМОЗА АРТИЛЛЕРИСТСКОГО ОРУДИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ FLOWVISION И IOSO

В.В. Садовский¹, М. В. Жарков¹,
Ю.И. Бабий², Д.Л. Бутримов²,
П.И. Карасев³, А.А. Аксенов³

¹ОАО «ЦНИИ «Буревестник», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

²ЗАО «СИГМА Технологии», г. Москва, Российская Федерация

³ООО «ТЕСИС», г. Москва, Российская Федерация

Эффективность дульного тормоза (ДТ) определяется его формой. Поскольку его применение существенно уменьшает отдачу орудия, оптимизация формы ДТ может значительно улучшить характеристики орудия.

Задача определения оптимальной формы многокамерного дульного тормоза решается с использованием CAD-системы SolidWorks, CFD-системы FlowVision и интеграционно-оптимизационной платформы IOSO. Полученные результаты анализируются, и формируется набор параметров, изменение которых обеспечивает повышение эффективности дульного тормоза (Рис. 1).

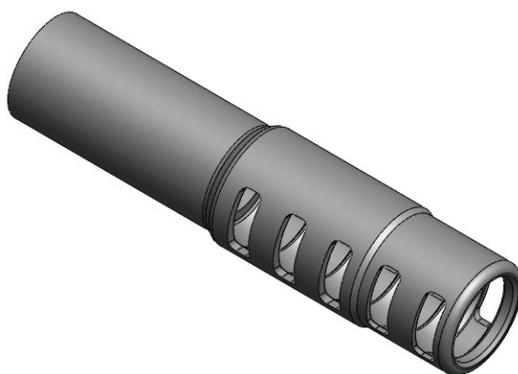


Рис.1 –Исходная форма дульного тормоза

Схема оптимизации дульного тормоза представлена на рисунке ниже (Рис. 2). Для решения задачи оптимизации необходимо обеспечить взаимосвязь всех модулей, входящих в оптимизационную процедуру.

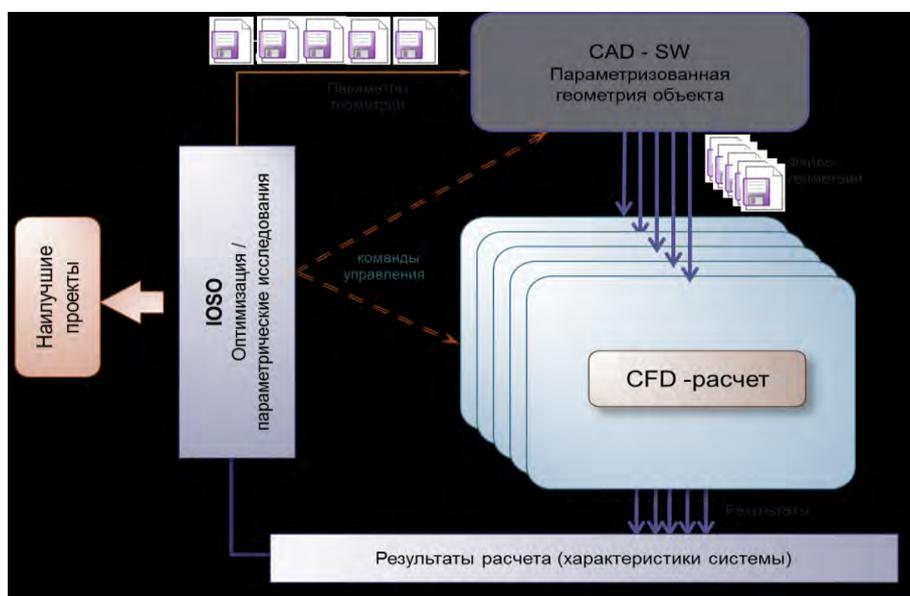


Рис. 2 – Схема оптимизации дульного тормоза

Для решения задачи оптимизации дульного тормоза разработана следующая последовательность действий:

1) Выбирается набор параметров и критериев оптимизации изделия и ограничения для них.

Для данного дульного тормоза был выбран следующий набор параметров, задающих его форму (Рис. 3);

- ширина окна П1;
- высота окна П3;
- ширина стенки П2=П5 (расстояние между окнами);
- диаметр диафрагмы П6;
- внутренний диаметр камеры П7;
- угол наклона оси выходных отверстий П15;
- угол раствора выходных отверстий П16.

- Критерии оптимизации:
- импульс дульного тормоза
 - масса дульного тормоза

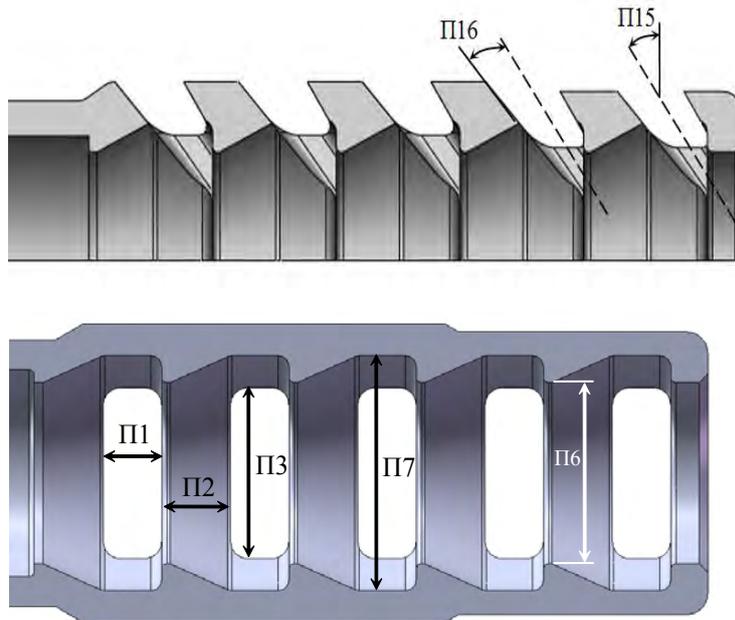


Рис. 3 – Параметры для проведения оптимизации ДТ.

2) Исходя из выбранных параметров, создается твердотельная модель изделия в CAD-системе таким образом, чтобы было возможно варьирование их значений. В SolidWorks это делается за счёт добавления нужных размеров объекта в так называемую таблицу параметров (Рис. 4), изменение полей которой вызывает перестроение CAD-модели в соответствии с этими изменениями.

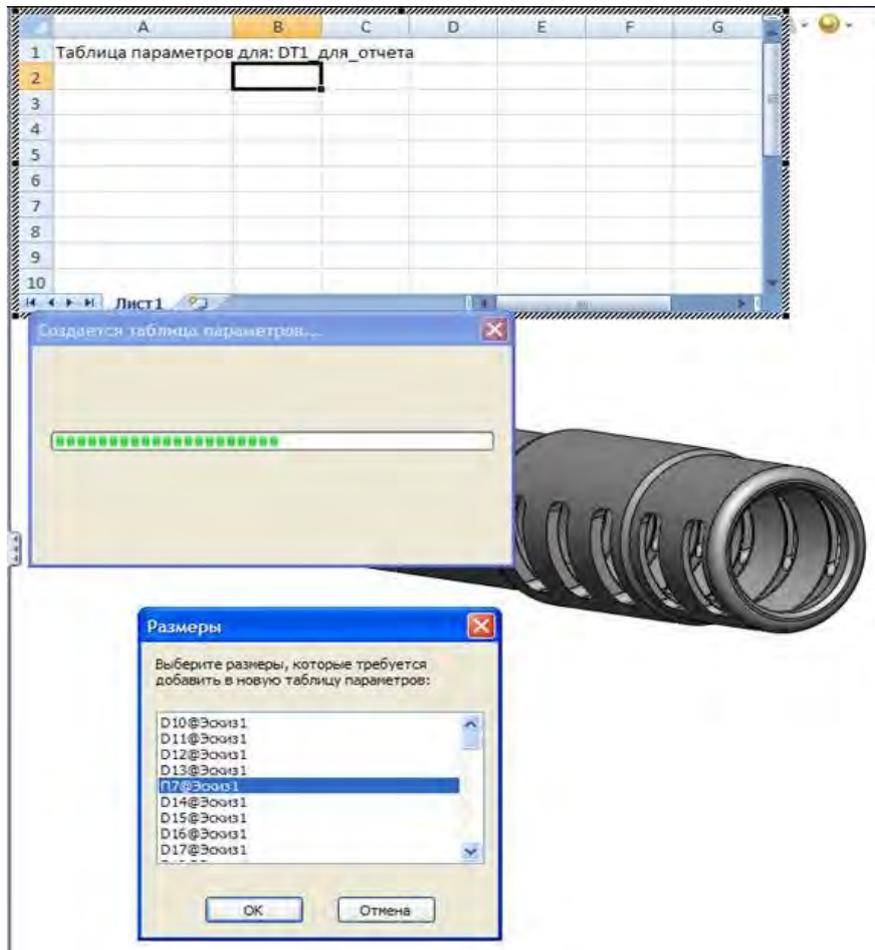


Рис. 4 – Сведение параметров оптимизации в таблицу параметров в SolidWorks.

3) Создается проект для CFD-расчетов в программном комплексе FlowVision.

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.

При построении расчетной области учитывается 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 (Рис. 5).

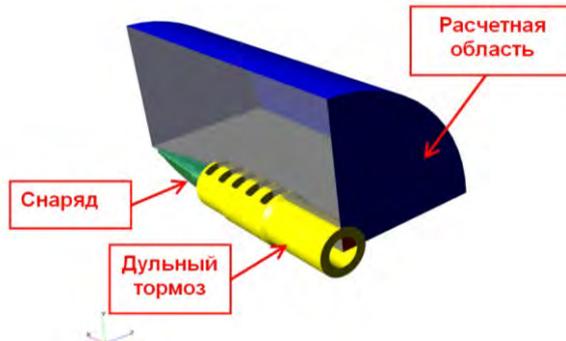


Рис. 5 – Снаряд и дульный тормоз в расчетной области

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).

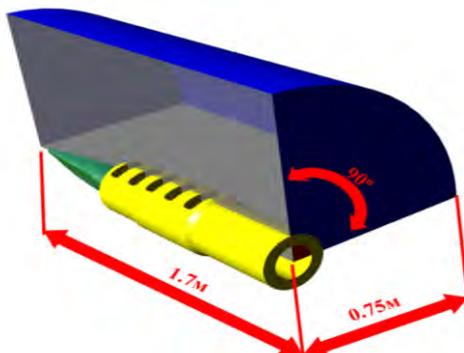


Рис. 6 – Геометрия расчетной области

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».

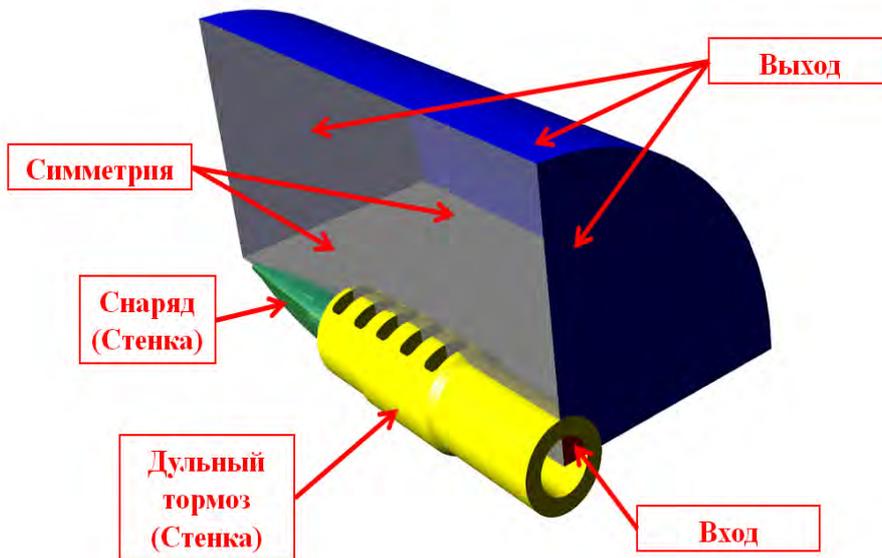


Рис. 7 – Расстановка граничных условий

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

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 (рисунок 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 (рисунок 9). В этом сечении снаряд имеет скорость, соответствующую значению, полученному при расчете внутренней баллистики.

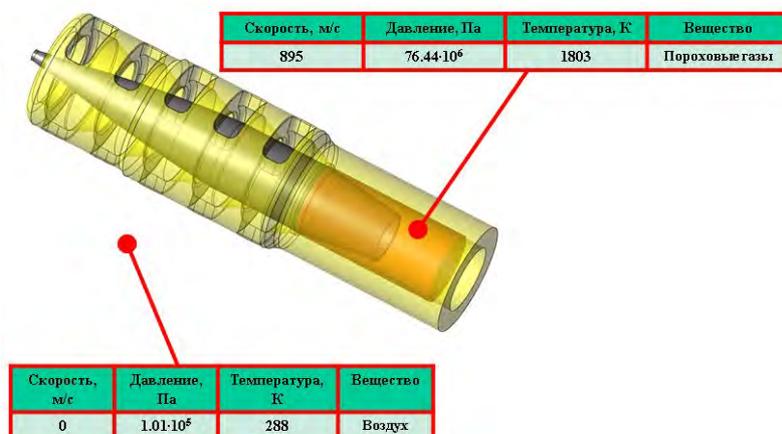


Рис. 8 - Начальные условия

CAD-модели дульного тормоза и снаряда вставляются как подвижные тела, что позволяет учитывать движение снаряда и легко заменять геометрию дульного тормоза (Рис. 9). Учитывается ускорение снаряда под действием давления пороховых газов.

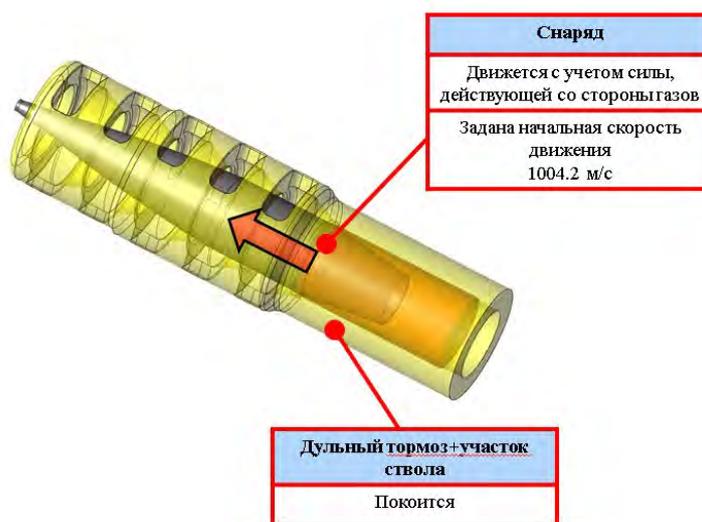


Рис. 9 – Начальные условия для подвижных тел

Оценивалась необходимость учета различия свойств воздуха и пороховых газов и смешения этих веществ при расчете.

Учитывалась зависимость вязкости пороховых газов от температуры. Указанная зависимость имеет вид (1).

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

Сетка строится со сгущением около дульного тормоза и разрежением у внешних границ (Рис. 10 (а)). Вблизи дульного тормоза ячейки начальной сетки имеют почти одинаковый размер (Рис. 10 (б)).

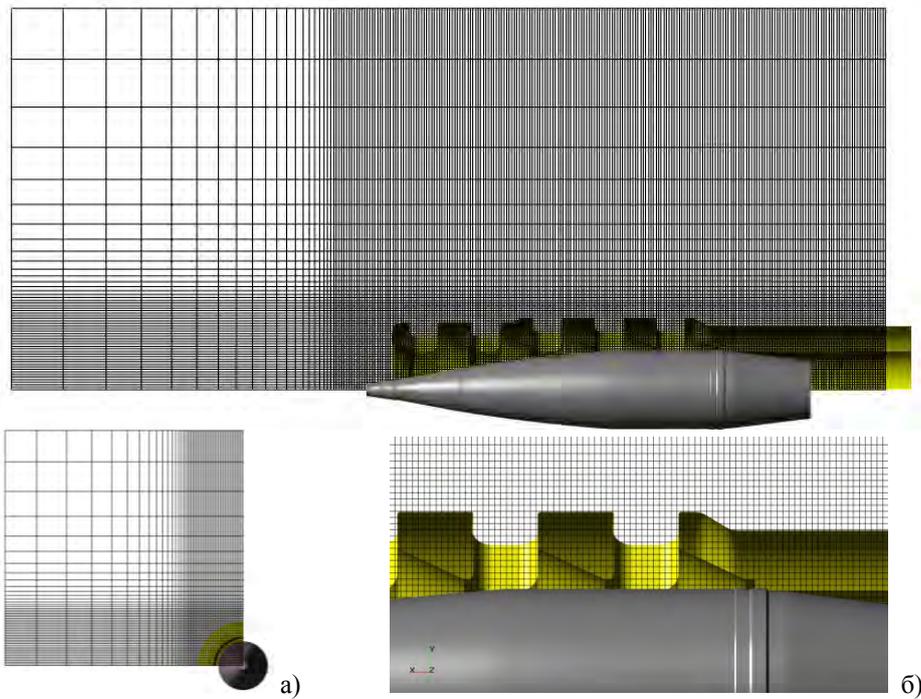


Рис.10 – Расчетная сетка а) общий вид, б) рядом со снарядом внутри дульного тормоза

Важной задачей является максимальное уменьшение времени расчета одного проекта без существенной потери точности получаемых результатов. Поэтому была предпринята серия расчетов с использованием различных расчетных сеток, а также с учетом и без учета массопереноса (смещения воздуха и пороховых газов) (Рис. 11).

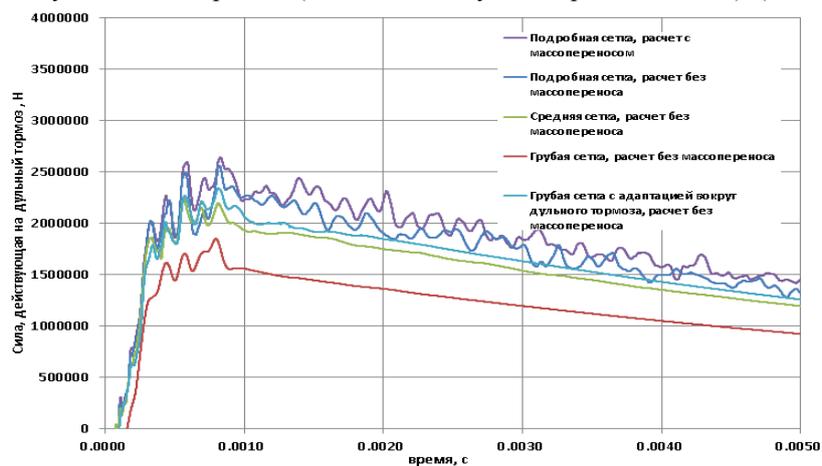


Рис. 11 – Сравнение результатов при различных расчетных сетках.

Таблица 1 – Результаты расчетов при различных расчетных сетках.

Сетка	Количество ячеек, тыс.	Время расчета, с	Время расчета
Подробная сетка, расчет с массопереносом	586	263750	3 дня 1 час
Подробная сетка, расчет без массопереноса	586	225279	2 дня 14.5 часов
Средняя сетка, расчет без массопереноса	112	93971	1 день 2 часа
Грубая сетка с адаптацией вокруг ДТ	40	38043	10.6 часов
Грубая сетка, расчет без массопереноса	23	15361	4.26 часа

В результате проведенного исследования выявлено, что учет массопереноса не обязателен. Для оптимизации выбрана грубая сетка с адаптацией вокруг ДТ.

4) Создается оптимизационный проект, в программном комплексе многокритериальной многопараметрической оптимизации IOSO (IOSO).

В IOSO реализован функционал, обеспечивающий интеграцию различных программных компонентов инженерного анализа и проектирования, в частности, SolidWorks и FlowVision (Рис. 12), что позволяет быстро связать их друг с другом для решения задачи оптимизации.

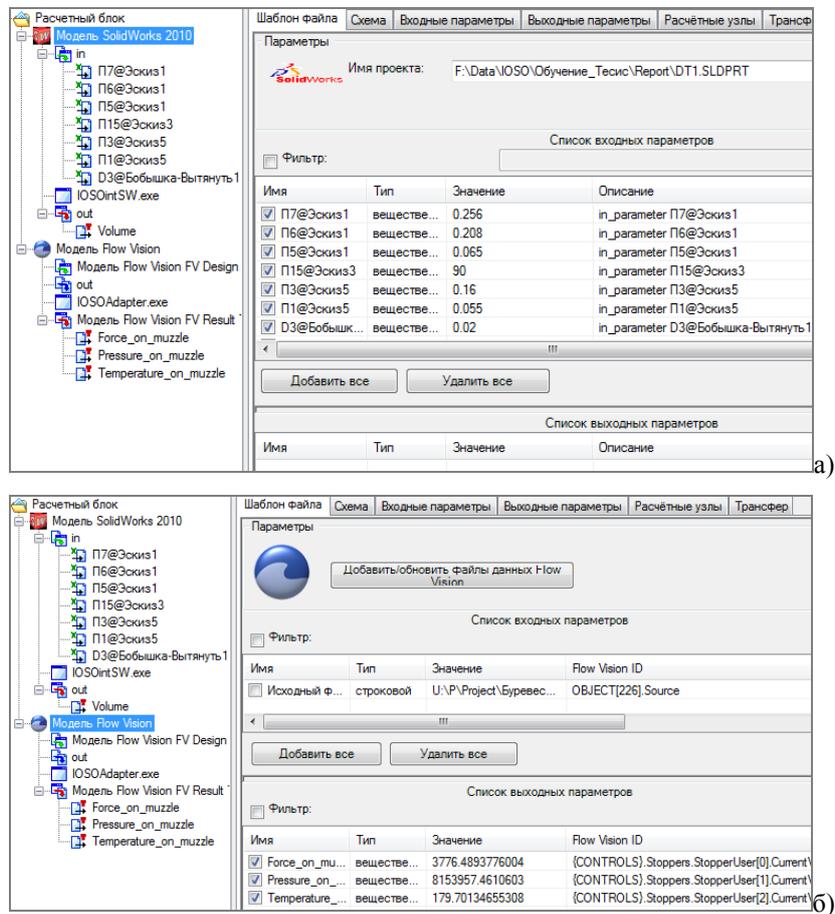


Рис. 12 – Окно отображения списков входных и выходных параметров:
а) модели SolidWorks; б) препроцессора FlowVision

5) Решается задача оптимизации, которая реализует следующую итерационную процедуру:

- Оптимизационный алгоритм формирует несколько векторов геометрических параметров дульного тормоза и передает эти данные в CAD-систему, которая осуществляет перестроение геометрии дульного тормоза для соответствующих вариантов векторов геометрических параметров.

- Изменённая геометрия передается в CFD-пакет FlowVision, который осуществляет математическое моделирование течения газа в дульном тормозе.

- Результаты математического моделирования анализируются оптимизационным алгоритмом и выдаются новые векторы геометрических параметров дульного тормоза до тех пор, пока не сработает критерий остановки оптимизационного расчета.

6) Анализируются результаты расчетов.

На рисунке ниже (Рис. 13) представлен график, показывающий соответствие тянущего усилия и объема дульного тормоза, полученные в результате решения задачи оптимизации. На данном графике прослеживается очевидная закономерность: с увеличением объема повышается величина тянущего усилия.

Наибольшее тянущее усилие продемонстрировал вариант 128.

Представляет интерес точка, отмеченная черным цветом (наименование «130»). Для этого варианта характерно незначительное увеличение объема при достаточно существенном увеличении тянущего усилия относительно исходного варианта.

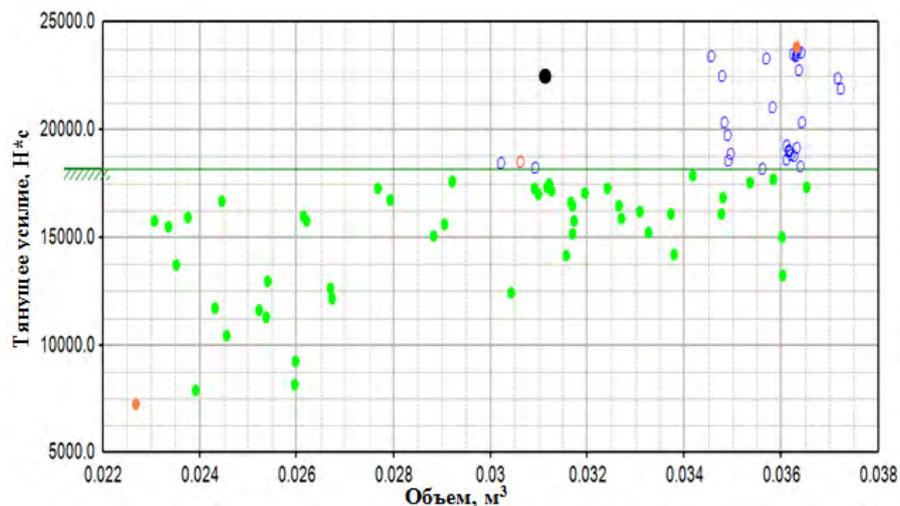
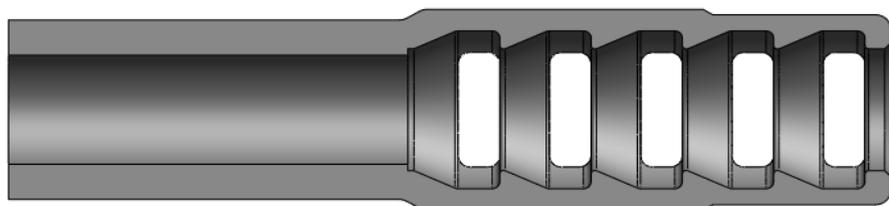
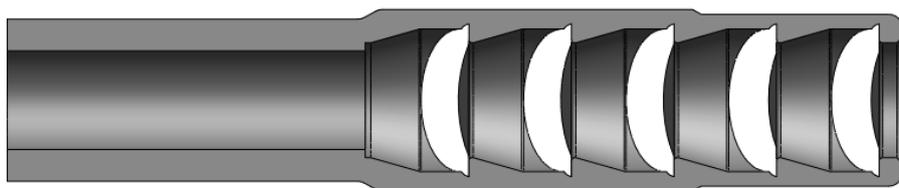


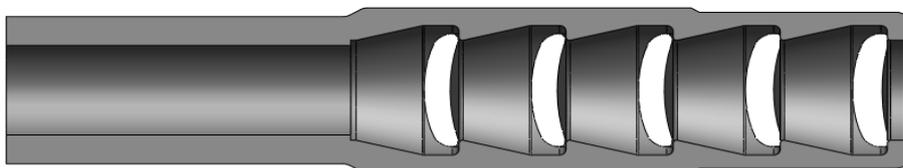
Рис. 13 – Полученные значения тянущих усилий и соответствующие им значения объема



а)



б)



в)

Рис. 14 – Сравнение формы ДТ, дающей значительное увеличение тянущего усилия без значительного увеличения массы, с исходным вариантом и вариантом, дающим наибольшее изменение импульса: а) исходный вариант, б) вариант №130, в) вариант №128, дающий наибольшее изменение импульса.

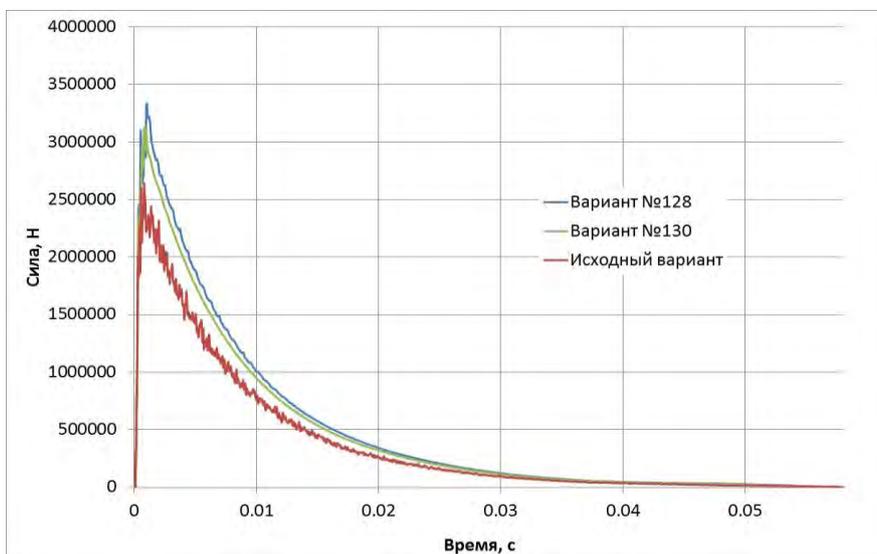


Рис. 15 – Сравнение зависимости силы от времени для вариантов формы ДТ №128 и №130 с исходным вариантом. Расчет на подробной сетке.

Для наиболее удачных вариантов формы дульного тормоза также был проведен анализ необходимости наличия последней камеры.

Таблица 1 -Сравнение влияния камер ДТ на изменение импульса для варианта №128.

№ камеры	Первая камера	Вторая камера	Третья камера	Четвертая камера	Пятая камера	Сумма
Импульс, Н·с	9370.8	8741.6	5422.4	3235.0	1975.0	28744.8
Доля от суммарного импульса, %	32.6	30.4	18.9	11.2	6.9	100

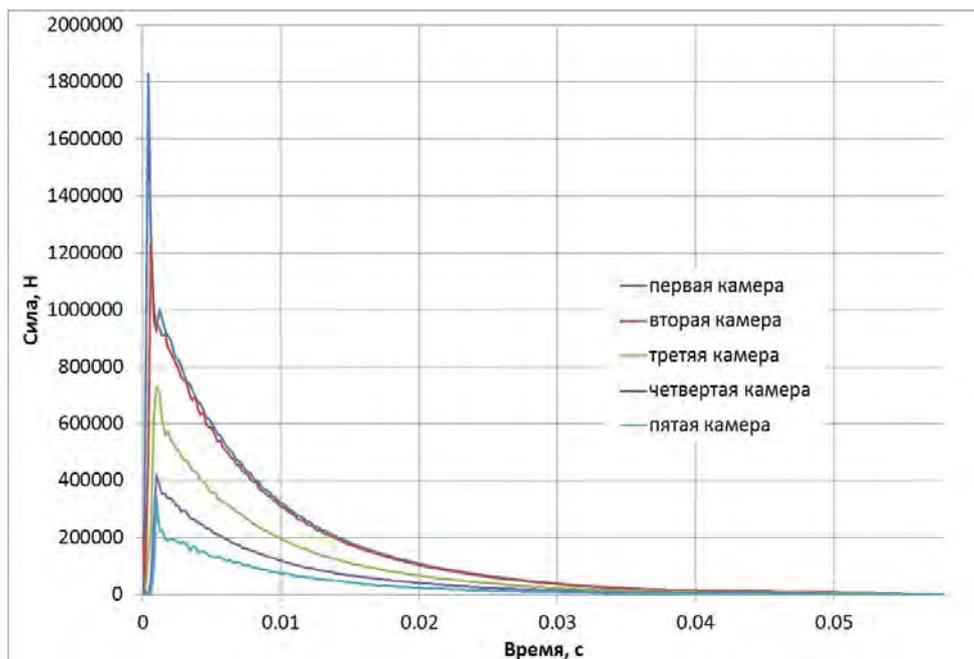


Рис. 16 – Сравнение зависимостей силы от времени для разных камер дульного тормоза для варианта формы №128. Расчет на подробной сетке.

С целью верификации полученного результата в условиях отсутствия полноценного эксперимента проводилось сравнение с результатами расчетов в программных комплексах FlowVision и GasDynamicTool для варианта, дающего наибольшее тянущее усилие.

Таблица 2 – Сравнение результатов решения

Параметр	Значение	
	GasDynamicsTool	FlowVision
Импульс, действующий на откатные части орудия без ДТ, I_0 , Н·с	70031	70031
Изменение импульса ΔI при использовании ДТ, Н·с	24146	24650
Импульсная характеристика ДТ ΔJ	34,48	35,20
Энергетическая эффективность ДТ ΔE	57,07	58,10

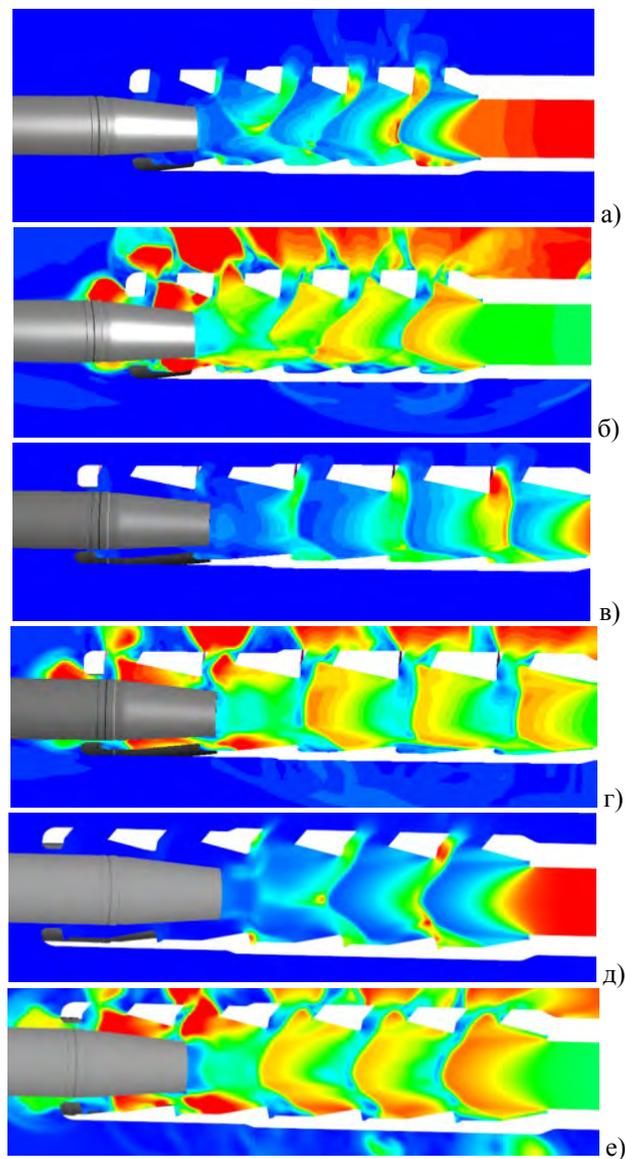


Рис. 17 – Поля величин рядом с ДТ в момент вылета из него снаряда для а) давления для исходного варианта, б) скорости для исходного варианта, в) давления для варианта №128, г) скорости для варианта №128, д) давления для варианта №130, е) скорости для варианта №130

Разработанная методика позволяет проводить оптимизацию ДТ в автоматическом режиме, что обеспечивает уменьшение трудозатрат и машинного времени, необходимых для разработки новых конструкций дульного тормоза.

Проведенное исследование по оптимизации дульного тормоза артиллерийского орудия показывает, что разработанная методика позволяет находить геометрические параметры, при которых обеспечивается улучшение характеристик ДТ относительно исходного варианта.

При проведении расчетов было затрачено примерно 60 000 ядер*часов суперкомпьютера «Минин». Задача оптимизации решается в параллельном режиме, причем распараллеливается как сам CFD-расчет, так и оптимизационный расчет. Это позволяет добиться очень высокой эффективности использования суперкомпьютера. CFD-расчет проводится с использованием 12 ядер. За цикл оптимизации одновременно решается 32 CFD-задачи. Это позволяет решить данную задачу в предельно сжатые сроки – примерно за 7-9 дней работы суперкомпьютера.

Список литературы

1. Серебряков М.Е. Баллистика ракетных и ствольных систем. М.Оборогиз, 1962
2. Aksenov, A.A. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method/ A.A. Aksenov, A.A. Dyadkin, V.I. Pokhilko // Proc. of "1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference", San Diego, ASME PVP, 1998. V. 377-1.
3. FlowVision Руководство пользователя, Версия 3.08.03 – 2013.
4. Egorov, I.N., Kretinin, G.V., Leshchenko, I.A. and Kuptzov, S.V. "The main Features of IOSO Technology Usage for Multi-Objective design optimization", 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York, USA, August 30-September 1, 2004.
5. Садовский В.В., Жарков М. В., Карасев П.И., Аксенов А.А.. Решение задачи по определению эффективности многокамерного дульного тормоза //Труды Международного форума «Инженерные системы 2012»