

УДК 621.454.3

В.А. Вахромов, канд. техн. наук В.В. Оглих, Г.Э. Толочьянц, Э.К. Магдин

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ДИАФРАГМЫ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО РДТТ

На примере малогабаритного двигателя с одношашечным зарядом показаны возможности, которые открываются перед проектантом-конструктором при выборе оптимальной конфигурации диафрагмы с использованием программного комплекса Ansys (CFX). Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при огневых стендовых испытаниях опытного РДТТ.

На прикладі малогабаритного двигуна з одношашковим зарядом показано можливості, які відкриваються перед проектантом-конструктором при виборі оптимальної конфігурації діафрагми з використанням програмного комплексу Ansys (CFX). Результати розрахунку зіставлено з експериментальними даними, отриманими під час вогневих стендових випробувань дослідного РДТТ.

By way of example of small-size motor with one-grain charge, the possibilities are shown that open up for a designer when selecting the optimal configuration of diaphragm using the Ansys (CFX) software package. The calculation results are compared with the experimental data obtained during hot-fire bench tests of experimental SRM.

В малогабаритных вспомогательных РДТТ, которые в настоящее время широко используются в боевых и космических ракетах для решения различных задач, применяются, как правило, вкладные заряды в виде одной шашки или набора шашек, перемещение которых ограничивается с двух сторон диафрагмами. Диафрагма, выполняя функции фиксатора заряда, должна обеспечивать свободное перетекание потока продуктов сгорания в сопло, не создавая дополнительного газодинамического сопротивления, которое привело бы к росту максимального давления в камере и, соответственно, к увеличению массы конструкции двигателя.

Имеющиеся в литературе рекомендации по выбору конструкции диафрагм [1 - 4] в настоящее время недостаточны и требуют более глубокого изучения данного вопроса с помощью современных вычислительных программ.

В данной статье показана возможность выбора оптимальной конфигурации диафрагмы с использованием программного комплекса Ansys (CFX). Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при огневых стендовых испытаниях опытного РДТТ.

Описание конструкции опытного малогабаритного РДТТ

Основной целью при проектировании опытного РДТТ было создание конструкции из недорогих материалов с заимствованием готовых деталей и компонентов, простой в изготовлении и пригодной к многократным испытаниям с применением имеющегося оборудования и технологии.

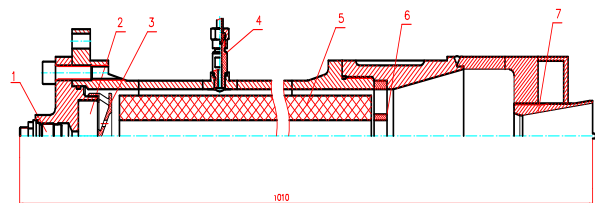


Рис. 1. Конструктивная схема опытного РДТТ: 1 – пиропатрон; 2 – воспламенитель; 3 – рассекающий; 4 – штуцер замера давления; 5 – заряд твердого топлива; 6 – диафрагма; 7 – сопловой блок

Конструктивная схема опытного РДТТ, спроектированного с учетом этих требований, показана на рис. 1.

Материал всех деталей опытного РДТТ – углеродистая сталь 45.

Постановка задачи

Расчетный комплекс Ansys (CFX) построен на численном решении системы

дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных для вязкой жидкости, которая состоит в данном случае из двух уравнений:

- уравнения движения;
- уравнения неразрывности.

Для несжимаемой жидкости эти уравнения имеют такой вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} = -(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{f}, \\ \nabla \vec{v} = 0 \end{cases}$$

где $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ –

единичные векторы на осях x, y, z в декартовой прямоугольной системе координат;

Δ – оператор Лапласа;

для функции \vec{v} имеет вид:

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \vec{v};$$

ν – коэффициент кинематической вязкости;

\vec{f} – векторное поле массовых сил;

\vec{v} – вектор скорости;

P – давление;

ρ – плотность.

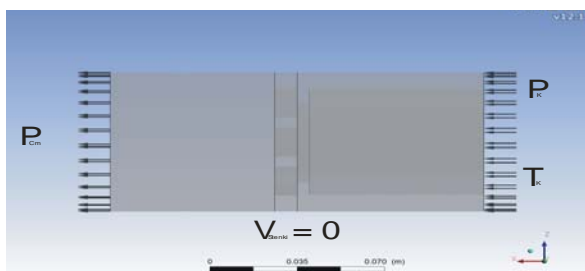


Рис. 2. Схема задания граничных условий

Для численного решения данной системы дифференциальных уравнений необходимо задать граничные условия.

На рис. 2 представлена схема задания граничных условий. Определяющим параметром является перепад давления, который задан в виде разности давления у переднего днища, и статического давления в сечениях диафрагмы (P_k и P_{cm} соответственно) и $\Delta P = P_k - P_{cm}$.

Для того чтобы решение было корректным, необходимо также задать температуру продуктов сгорания на входе T_k . И последним граничным условием является равенство нулю скорости потока на стенке канала $V_{стен}$.

Данную математическую модель решали при помощи расчетного комплекса Ansys (CFX) v12.1.

Результаты расчета и огневых стендовых испытаний с диафрагмами различной конструкции

Сама по себе диафрагма является местным сопротивлением в камере ракетного двигателя. Накопленный опыт позволяет сделать вывод о влиянии диафрагмы и задиафрагменного (предсоплового) объема на работу пороховых ракетных двигателей с зарядами, горящими по внутренней и внешней поверхностям. Диафрагма является источником вихреобразования, а следовательно, значение гидравлических потерь существенно зависит от ее формы.

Особенностью обтекания тел сложной формы является то, что распределение местных статических давлений неравномерно, то есть имеются участки, где термическое воздействие потока проявляется сильнее. Как правило, это участки местного увеличения скорости потока [2, 3].

Всего было проведено десять огневых стендовых испытаний с диафрагмами различной конструкции. При огневых стендовых испытаниях использовались заряды баллиститного твердого топлива одной партии при одной температуре, благодаря чему обеспечивалось постоянство скорости горения.

Результаты испытаний приведены на рис. 3.

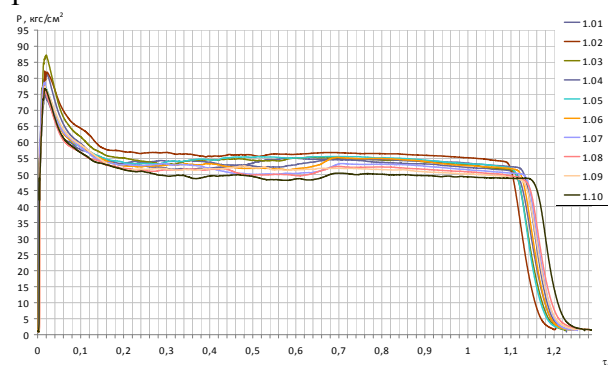


Рис. 3. График зависимости $P(\tau)$ за полное время работы опытного РДГТ

Испытания № 1–3 проводились с диафрагмой, конструкция которой приведена на рис. 4.

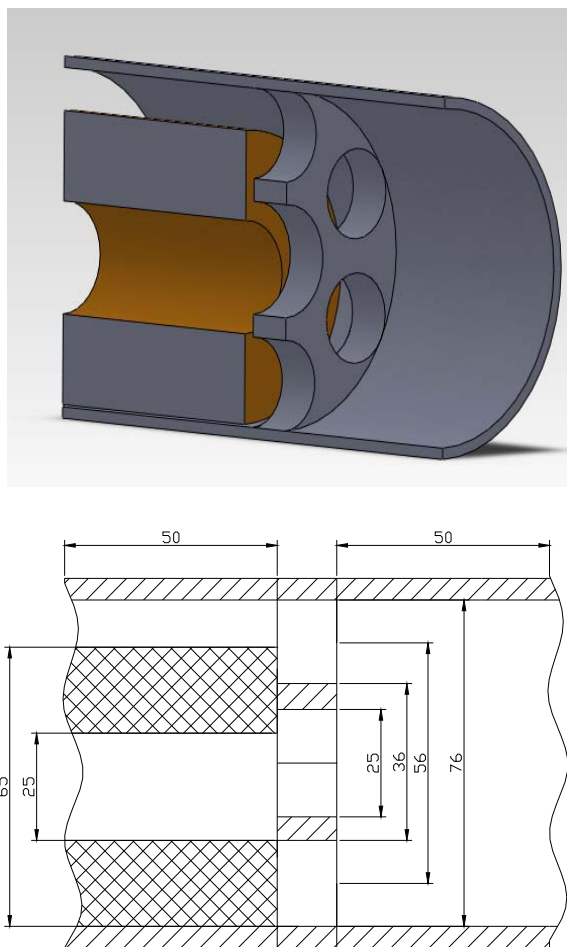


Рис. 4. Общий вид и схема диафрагмы и заряда при испытаниях №1–3

Так как эта диафрагма характеризуется относительно низкой суммарной площадью проходных сечений ($8,45 \text{ см}^2$), шашка существенно перекрывает ее проходные отверстия, вследствие чего поток развивается в участке внезапно расширяющегося сечения канала. Такие участки канала являются местными сопротивлениями. Образуется местный перепад давления, вследствие которого скорость в проходном сечении диафрагмы существенно увеличивается. Характер такого течения представлен на рис. 5,6. Скорость течения в диафрагме составляет 250–300 м/с.

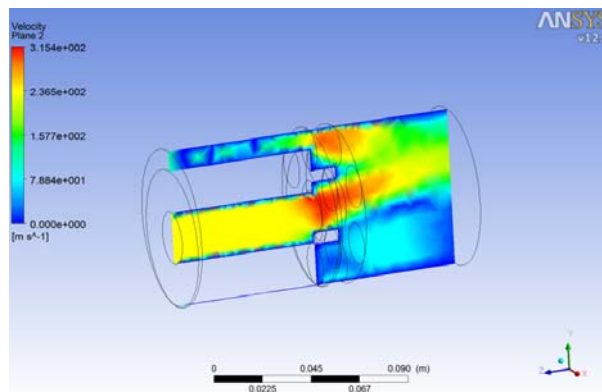


Рис. 5. Течение в канале заряда и диафрагме

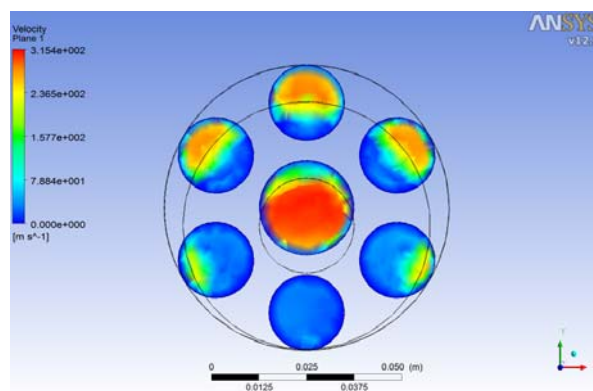


Рис. 6. Течение в проходном сечении диафрагмы

На рис. 7 показан результат термического воздействия потока продуктов сгорания.

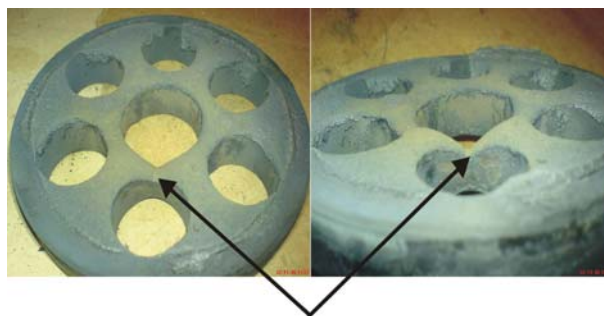
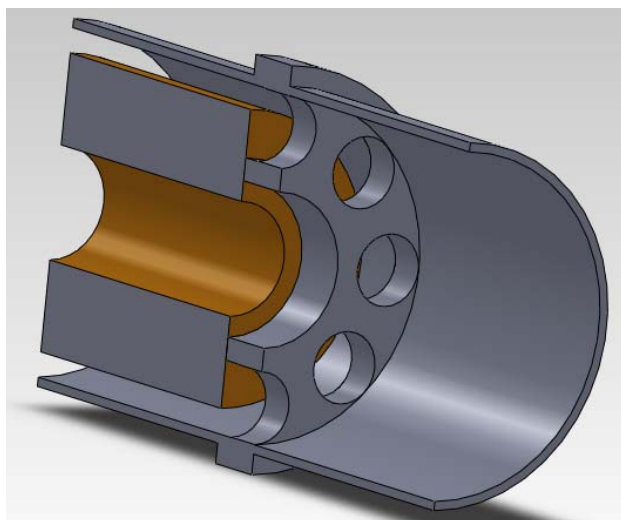


Рис. 7. Места уноса материала при обтекании потоком продуктов сгорания

Из-за резкого сужения проходного сечения в данной диафрагме имели место значительные потери полного давления, что можно объяснить резким увеличением скорости потока в проходном сечении, а так как поток не был симметричен относительно оси РДГТ, уносы материала проявлялись в характерных местах (рис. 7).

Испытания № 4–8 проводились с диа-



фрагмой, конструкция которой приведена на рис. 8.

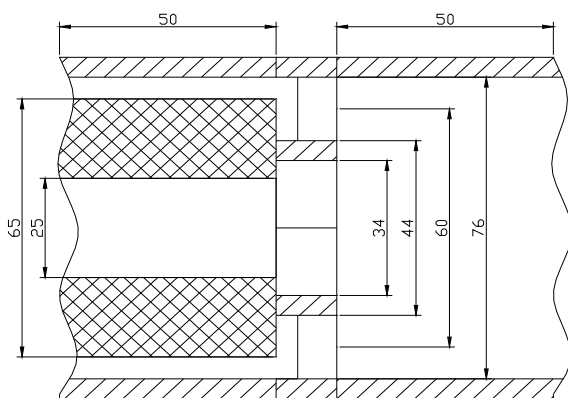


Рис. 8. Общий вид и схема диафрагмы и заряда при испытаниях № 4–8

Среди конструктивных отличий между диафрагмами следует отметить, что увеличилось центральное проходное отверстие (с 25 до 34 мм) и увеличилось количество отверстий по периферии (с шести до восьми), появилась кольцевая проточка, из-за которой между шашкой заряда и диафрагмой образовался зазор 5 мм, впоследствии появилось центральное сменное кольцо. Суммарная площадь проходных сечений данной диафрагмы составила 16 см². Все это позволило существенно снизить потери полного давления и, как следствие, уменьшить перепад.

Характер течения при этих испытаниях представлен на рис. 9 и 10.

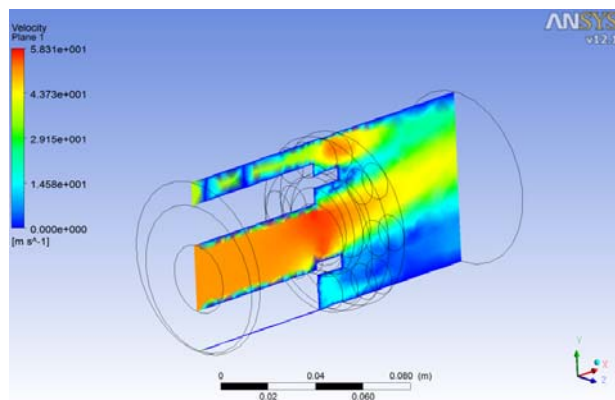


Рис. 9. Течение продуктов сгорания в момент выхода на режим при испытаниях № 4–8 (вид сбоку)

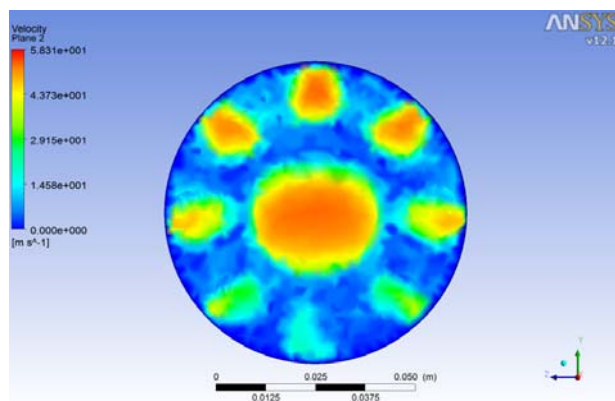


Рис. 10. Течение в диафрагме

Скорость течения в заряде составила в среднем 40–45 м/с, а в диафрагме – 50–58 м/с, что почти вдвое меньше, чем во время первых трех испытаний. Это является следствием уменьшения локального перепада давления.

Данная диафрагма была менее подвержена термическому воздействию потока продуктов сгорания. Однако полностью исключить уносы металла, возникавшие при воздействии потоков газа, не удалось. Как и в предыдущем случае, эти уносы также проявлялись в характерных местах (рис. 11). Это оказалась область около центрального проходного отверстия, где было установлено сменное «жертвенное» кольцо.



Рис. 11. Места уноса материала при обтекании потоком продуктов сгорания

Испытания № 9, 10 проводились с диафрагмой, конструкция которой приведена на рис. 12.

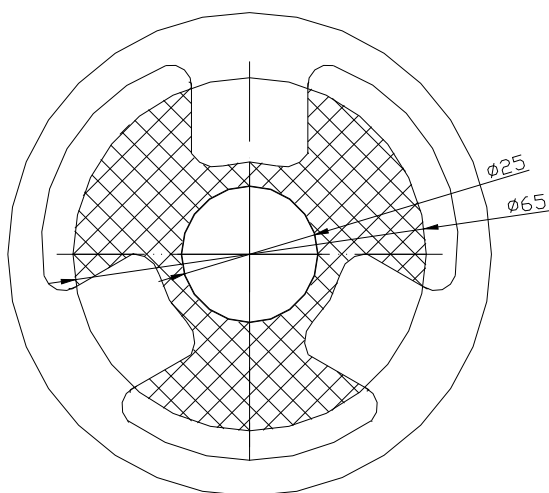
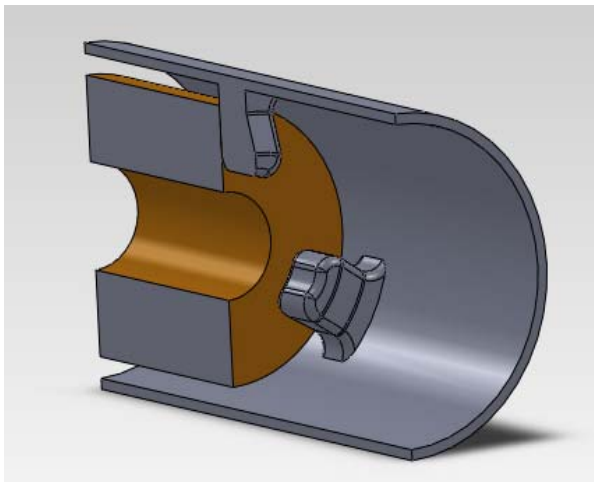


Рис. 12. Общий вид и схема диафрагмы и заряда при испытаниях № 9,10

Данная конструкция диафрагмы имеет более обтекаемую форму и, следовательно, создает в потоке меньшее сопротивление. Картина течения при этих испытаниях представлена на рис. 13 и 14.

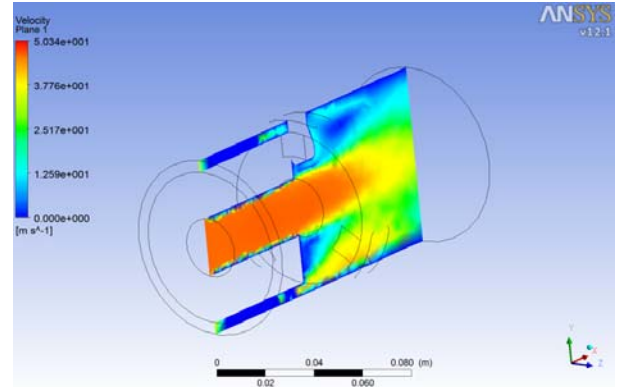


Рис. 13. Течение продуктов сгорания во время испытаний № 9, 10 (вид сбоку)

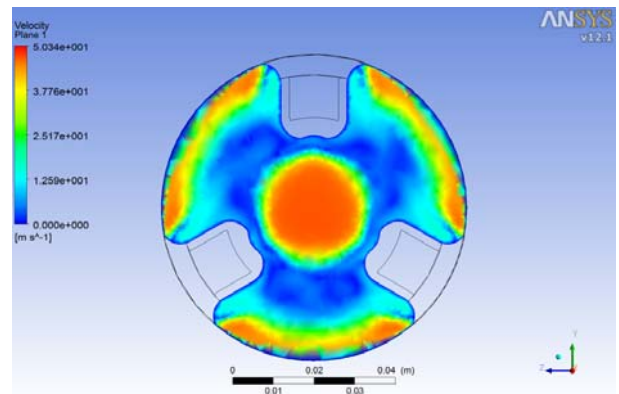


Рис. 14. Течение в проходном сечении диафрагмы

Из рис. 12 и 13 видно, что скорость в заряде и проходном сечении диафрагмы уменьшилась с 58 м/с (по сравнению с испытаниями № 4–8) до 45 м/с.



Рис. 15. Состояние диафрагмы после испытаний № 9, 10

Также эти рисунки наглядно показывают отсутствие местных увеличений скорости при обтекании диафрагмы (нет увеличения местной скорости потока в проходном сечении диафрагмы), что подтверждается отсутствием видимых уносов металла (рис. 15).

Сравнительный анализ результатов испытаний и расчетов

По результатам испытаний были определены максимальные (средние максимальные) значения давлений в камере РДТТ. Испытания отличались конструкцией диафрагм, площадью их проходных сечений и вариантами размещения заряда. С помощью компьютерного моделирования были определены скорости потока продуктов сгорания в диафрагме и заряде. Все результаты приведены в таблице.

Характеристики опытного РДТТ, определенные при испытаниях и компьютерном моделировании

Номер испытания	Скорость потока в заряде, м/с	Скорость потока в диафрагме, м/с	Максимальное (среднее максимальное) давление в камере сгорания, кгс/см ²	Суммарная площадь проходных сечений диафрагмы, см ²
1-3	150-200	250-300	87	8,45
4-8	40-45	50-58	76	16
9-10	45-50	45-50	77	13

Расчеты показывают, что форма диафрагмы и площадь ее проходных сечений существенно влияют на значение давления в камере сгорания малогабаритного РДТТ. Увеличение площади проходных сечений

диафрагмы – не единственный фактор, который ведет к уменьшению потерь полного давления. Также существенным является изменение формы обтекаемого тела (диафрагмы). Таким образом, при одном и том же проходном сечении можно подобрать такую форму обтекаемого тела (диафрагмы), лобовое сопротивление которого будет минимальным, что наглядно показано при моделировании течений с диафрагмами различной конфигурации.

Выводы

1. Площадь проходных сечений диафрагмы и ее форма оказывают существенное влияние на значение максимального давления в камере малогабаритного РДТТ.
2. Построение модели течения в камере РДТТ позволяет выбрать оптимальную конфигурацию диафрагмы на этапе проектирования.
3. Современные вычислительные пакеты типа Ansys предоставляют широкий спектр возможностей при выборе конструкции диафрагмы, что существенно улучшает процесс проектирования малогабаритных РДТТ и уменьшает затраты на их отработку.

Список использованной литературы

1. Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 155 с.
2. Шапиро Я.М., Мазинг Г.Ю., Прудников Н.Е. Теория ракетного двигателя на твердом топливе. – М.: Воениздат, 1966. – 255 с.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
4. Куров В.Д., Должанский Ю.М. Основы проектирования пороховых ракетных снарядов. – М.: Оборонгиз, 1961. – 294 с.

Статья поступила 20.10.2015