

УДК 621.454.3

Г.Э. Толочьянц, А.В. Лепский

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ ЗАРЯДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены различные способы расчета поверхности горения. Описана методика расчета поверхности горения с использованием систем автоматизированного 3D-моделирования. Предложенная методика дает возможность упростить и ускорить процесс расчета поверхности горения.

Розглянуто різні способи розрахунку поверхні горіння. Описано методіку розрахунку поверхні горіння з використанням систем автоматизованого 3D-моделювання. Запропонована методіка дає змогу спростити та прискорити процес розрахунку поверхні горіння.

Different methods of calculation of burning surface are considered. The technique of burning surface calculation with the use of automated 3D modeling systems is described. The proposed technique allows simplifying and accelerating the burning surface calculation process.

При проектировании РДТТ одним из основных вопросов является выбор формы заряда и расчет зависимости изменения поверхности горения от толщины сгоревшего свода. Форму заряда выбирают, исходя из обеспечения требований к основным характеристикам двигателя: давлению, тяге, расходу продуктов сгорания, времени работы.

В зависимости от характера изменения поверхности горения по времени различают заряды прогрессивной (поверхность при горении возрастает), дегрессивной форм и заряды с постоянной поверхностью горения (нейтральный заряд).

К конструкции топливного заряда предъявляют следующую совокупность требований:

- форма топливного заряда должна обеспечивать заданный закон газоприхода продуктов сгорания топлива (или заданный закон изменения тяги);

- форма заряда должна обеспечивать заданное время работы двигателя;

- форма топливного заряда должна обеспечивать максимально возможный коэффициент заполнения камеры топливом, не создавая при этом явлений неустойчивого горения, обеспечивая прочность заряда и минимум дегрессивно горящих остатков;

- конструкция топливного заряда должна обеспечивать минимальное смещение центра масс двигателя по мере выгорания топлива;

- конструкция заряда должна быть технологична.

Существуют три основных метода расчета зависимости поверхности горения от толщины свода (координатный, интерполяционный и геометрический). Все они построены на предположении, что скорость горения по всей поверхности заряда одинакова и топливо горит параллельными эквидистантными слоями. Это предположение справедливо при однородности физических и химических свойств топлива, в частности при однородности температурного поля заряда и одинаковых значениях давления и скорости газа по всей поверхности горения заряда.

В реальных двигателях эти условия (особенно второе) не выполняются, поэтому расчет изменения S в предположении горения топлива параллельными слоями надо рассматривать как первое приближение, требующее дальнейших уточнений.

Рассмотрим более подробно вышеуказанные методы.

Координатный

Фронт горения условно представляется как совокупность геометрических точек, каждая из которых имеет свои координаты. Тогда поверхность горения заряда можно задать функцией $S(x, y, z, t)$.

Процесс горения топлива имитируется путем смещения каждой точки по нормали к поверхности на заданное расстояние. Тогда в проекции на нормаль справедливо уравнение $\frac{dn}{dt} = u(x, y, z, t)$. Решение такого дифференциального уравнения позволяет определить текущее положение поверхности заряда. В общем случае может не быть направления, в котором поверхность выражалась бы в виде однозначной функции. Всегда имеются изломы поверхности заряда. В точках излома нормаль отсутствует. В окрестности изломов соседние нормали могут пересекаться. Все это делает решение заряда по данному методу трудоемким, а иногда и невыполнимым.

Интерполяционный метод расчета

Для имеющейся формы заряда записывают уравнение поверхности, которое в общем случае имеет следующий вид:

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \pm u \sqrt{\left(\frac{d\varphi_i}{dx}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi_i}{dy}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi_i}{dz}\right)^2},$$

где t, x, y, z – соответственно время и пространственные координаты поверхности. Знак в правой части этого уравнения зависит от направления горения заряда относительно нормали к поверхности горения. Однако для зарядов сложной формы решение данного уравнения вызывает трудности – и поверхность разбивают на совокупность более простых поверхностей, что вносит в расчет некоторые неточности.

Геометрический расчет выгорания заряда

Расчет проводится путем разбиения свода на отдельные участки, в результате чего

получаем сеть контуров, состоящих из параллельных прямых дуг концентрических окружностей. Каждый из контуров соответствует положению горячей поверхности в фиксированный момент времени. Из-за изменения поверхности в процессе горения число линий контура может изменяться в большую или меньшую сторону.

В настоящее время с усовершенствованием вычислительной техники для определения изменения поверхности горения предлагается использовать программные продукты автоматизированного 3D-моделирования. Методика расчета изменения поверхности горения показана на базе Autodesk Inventor.

На рис. 1 приведена исходная 3D-модель заряда твердого топлива.

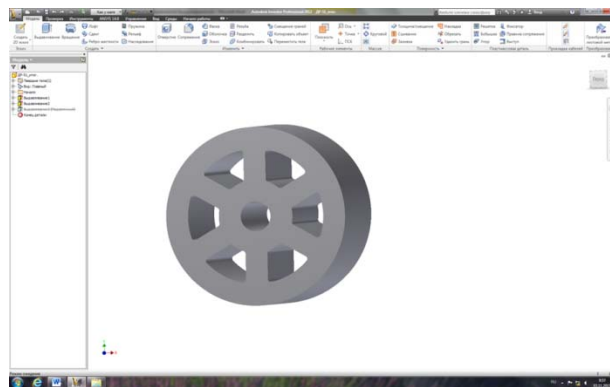


Рис. 1

Заряд представляет собой шашку всестороннего горения, выполненную в виде многоканального моноблока с центральным цилиндрическим каналом и шестью периферийными трапецевидными каналами.

Для упрощения расчета выбираем сектор заряда в виде 1/6 части исходной модели, как показано на рис. 2.

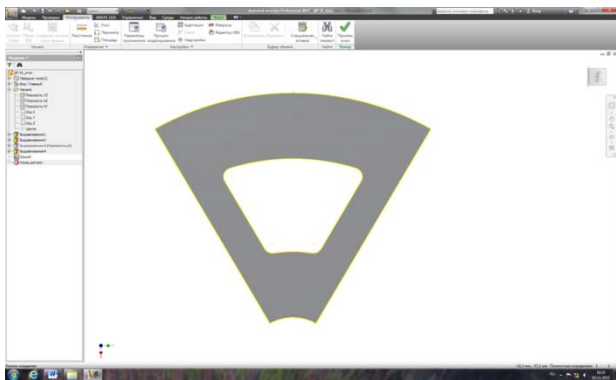


Рис. 2

На рис. 3 приведен пример эскиза изменяющейся поверхности для данного заряда. Построение эскиза изменяющейся поверхности проходит следующим образом:

- в точках перегиба строятся прямые линии, вдоль которых происходит смещение эскиза;

- строятся прямые и дуги концентрических окружностей со смещением. Смещение параллельных прямых дуг концентрических окружностей задается в привязке к своду горения таким образом, что при изменении значения смещения происходит перестроение всего эскиза.

На рис. 4, 5 показано построение эскиза на примере элементарных углов.

Рис. 3

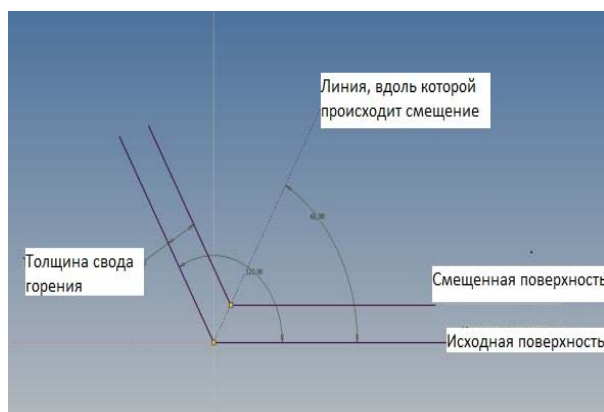


Рис. 4

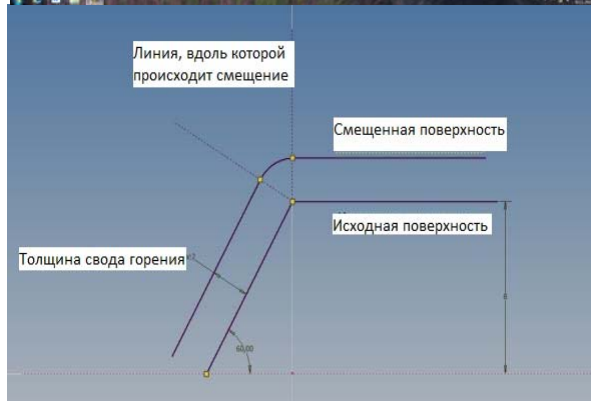
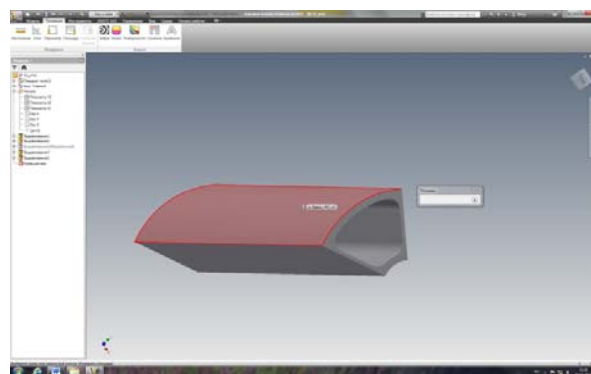
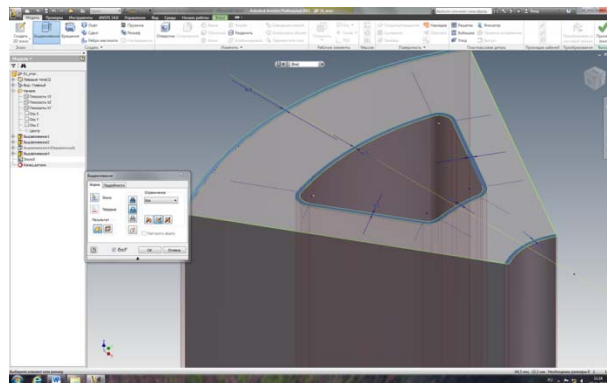


Рис. 5

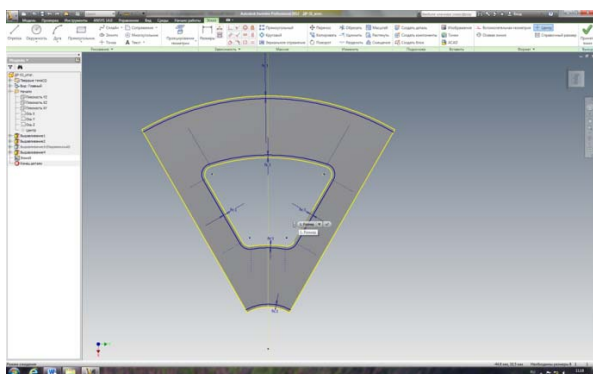
Процесс горения имитируется путем последовательного усечения исходной модели заряда (рис. 6) с замером площадей соответствующих поверхностей (рис. 7).

Расчет поверхности горения по предлагаемой методике позволяет получить зависимость размера поверхности горения от толщины горящего свода для любой произвольной поверхности, которая для данного заряда имеет вид, показанный на рис. 8.

Результаты расчета поверхности горения в зависимости от толщины сгоревшего свода приведены в таблице.

Рис. 6

Рис. 7



Результаты расчета поверхности горения

Поверхность горения $S, \text{ см}^2$	Свод горения, мм
9497,49	0
9872,15	2
10238,95	4
10597,12	6
10946,45	8
11286,93	10
11320,49	10,2
11353,96	10,4
11387,35	10,6
11420,65	10,8
11423,97	10,82
11427,30	10,84
11430,62	10,86
11433,94	10,88
11437,26	10,9
11445,56	10,95
11450,54	10,98
4549,71	11
2294,54	12
1166,09	13
450,51	14
0	15

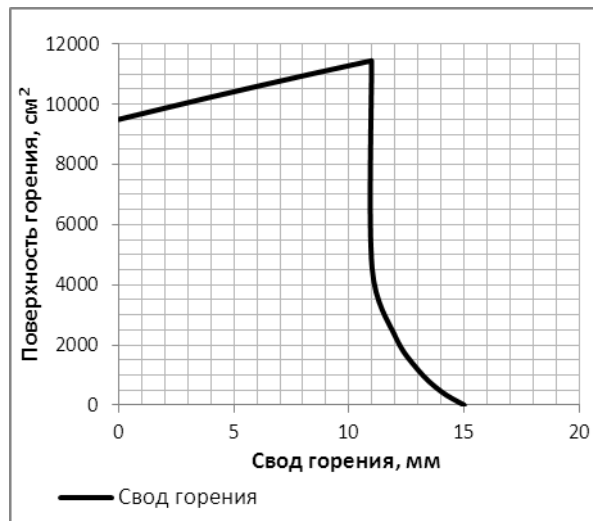


Рис. 8. График зависимости поверхности горения от размера сгоревшего свода

Использование пакетов автоматизированного 3D-моделирования типа Autodesk Inventor и SolidWorks значительно упрощает проведение расчетов поверхности горения заряда твердого топлива. Кроме того, данные пакеты позволяют автоматизировать процесс расчета, что существенно сокращает время и трудоемкость по сравнению с другими методами расчета.

Отличительной чертой приведенной методики является возможность контролировать процессы вычисления, корректировать граничные условия на каком-либо этапе расчета (шаг по своду, исходная геометрия и т.д.). Широкий спектр возможностей пакетов позволяет наглядно оценить изменение поверхности, а также провести более детальный анализ результатов. Полная информация о выгорании заряда на любом участке в любой момент времени дает возможность одновременно получить 3D-модель заряда для дальнейших внутрибаллистических, газодинамических, прочностных расчетов с использованием современных CAE-систем.

Статья поступила 30.11.2015