

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

А. А. Трубников, В. О. Попов, Н. А. Алексеева

Численное моделирование внутрибаллистических характеристик процесса работы энергетических двигательных установок, снаряженных высокоэнергетическим наполнителем, является одним из наиболее важных этапов при проектировании и отработке. При расчете параметров работы изделий решается прямая задача внутренней баллистики, заключающаяся в нахождении газодинамических характеристик (давление в камере, тяга, скорость потока, плотность продуктов сгорания и др.) в зависимости от известных величин: сгоревшего свода и площади поверхности горения наполнителя. При расчете площади поверхности горения в зависимости от свода для установок с простой по геометрической форме конструкцией (канально-цилиндрическая, коническая и т. д.) используются аналитические способы. В настоящей статье представлена методика расчета площади поверхности горения в зависимости от величины сгоревшего свода, базирующаяся на трехмерном моделировании. Для наглядного представления методики проведено моделирование развития поверхности горения в процессе работы энергетической двигательной установки, снаряженной твердым высокоэнергетическим наполнителем со сложной по геометрической форме конструкцией, которая выражается в наличии на правом торце кольцевого выреза и неизвлекаемого быстросгораемого элемента по центру изделия. Использование данной методики позволяет значительно сократить трудоемкость и время проведения вычислений за счет автоматизированного измерения площади и других параметров.

Ключевые слова: энергетическая двигательная установка (ЭДУ), внутрибаллистические характеристики, высокоэнергетический наполнитель, площадь поверхности горения.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет площади поверхности горения (ППГ) в зависимости от величины сгоревшего свода является важной составляющей численного моделирования внутрибаллистических характеристик (ВБХ) энергетических двигательных установок, заполненных твердым высокоэнергетическим наполнителем (ВЭН). Расчет поверхности горения в случае, когда не учитывается эрозионный эффект (локальное увеличение скорости горения ВЭН, приводящее к аномальному возрастанию давления в камере сгорания), проводится при условии, согласно которому топливо горит параллельными слоями и скорость горения одинакова во всех точках изделия [1].

Для ЭДУ, имеющих простую форму (например, РДТТ с цилиндрическим каналом), ППГ удобно рассчитывать аналитическим методом согласно известным геометрическим формулам. Помимо аналитического метода нахождения имеются способы расчета, которые обладают большей эффективностью. В статье [2] описан способ расчета ППГ, основанный на методе Монте-Карло для изделий простой геометрической формы. В работе [3] приведен метод нахождения ППГ через

аналитическое решение уравнения горячей поверхности Р. Е. Соркина [4]. Процесс расчета ППГ ЭДУ, имеющих развитую форму канала (канально-щелевой, звездообразный и др.), аналитическим методом довольно трудоемок и занимает значительную часть вычислений при решении прямой задачи внутренней баллистики.

Современные программные комплексы трехмерного моделирования, используемые при проектировании различных изделий, позволяют определять площадь поверхности горения и другие массо-габаритные параметры.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

В качестве примера по расчету ППГ рассмотрим малогабаритную модельную ЭДУ диаметром 76 мм, длиной 200 мм (рисунок 1). Изделие имеет кольцевой вырез на правом торце (у соплового блока), который обеспечивает в начале работы сложное развитие поверхности горения, сопровождающееся плавным снижением давления в камере сгорания. В центре изделия содержится неизвлекаемый быстросгораемый элемент (скорость горения элемента на порядок и более превышает ско-

рость горения ВЭН), предназначенный для увеличения давления на маршевом участке работы, за счет подключения дополнительной поверхности горения [5, 6].

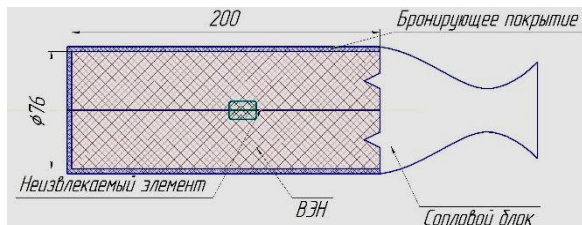


Рисунок 1 – Конструкция модельного ЭДУ

В программном комплексе строится трехмерная модель (рисунок 2), вышеуказанного изделия (рисунок 1).

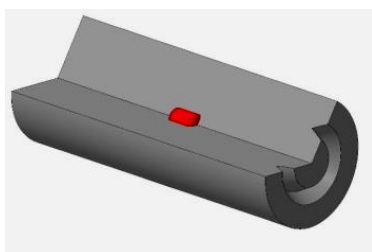


Рисунок 2 – Трехмерная модель ЭДУ

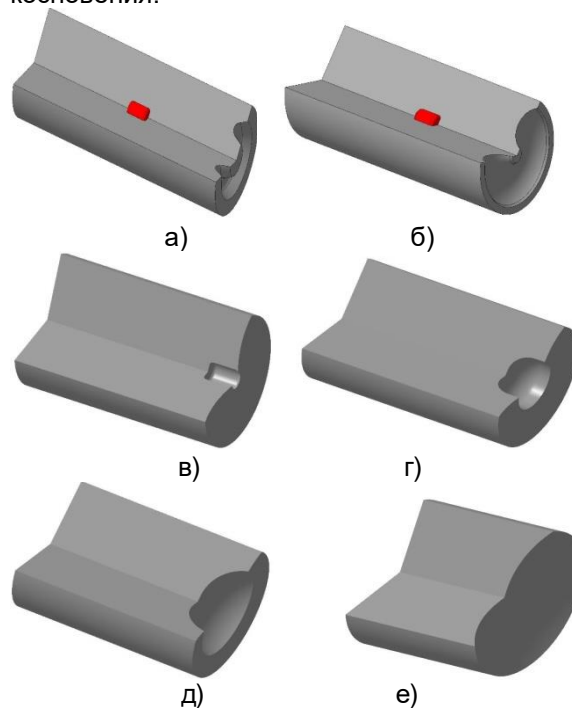
Измеряется начальная поверхность горения, далее выбираются грани по которым горит изделие. В появившемся диалоговом окне (рисунок 3) выдаются результаты измерения ППГ, конечное значение (сумма площадей выбранных граней) записывается в отдельную таблицу.

Информация	
Файл Редактор	
Дата	18.06.2018
Документ	Деталь D:\Докумен
Площадь	
S1	= 2726.902423 мм2
S2	= 615.752160 мм2
S3	= 1159.094463 мм2
S4	= 1510.335209 мм2
Сумма	= 6012.084255 мм2

Рисунок 3 – Диалоговое окно расчета площади поверхности горения

На рисунке 4 (а–е) приведена схема графической визуализации разгара модельной ЭДУ, содержащей неизвлекаемый элемент (НЭ) при своде 5, 15, 71, 81, 130 мм. После построения трехмерной модели изделия при конкретном сгоревшем своде измеряется ППГ и полученное значение заносится в таб-

лицу. При подходе фронта пламени к НЭ (величина сгоревшего свода $e = 71$ мм) принимается допущение, что элемент сгорает мгновенно и одновременно с этим подключается вся поверхность ВЭН в зоне их соприкосновения.



а) – величина сгоревшего свода $e = 5$ мм; б) $e = 15$ мм; в) $e = 71$ мм (НЭ сгорел, сформирована начальную поверхность горения ВЭН); г) $e = 81$ мм (разгар поверхности горения ВЭН на 10 мм после сгорания НЭ); д) $e = 91$ мм (разгар поверхности горения ВЭН на 20 мм после сгорания НЭ); е) $e = 130$ мм (разгар поверхности горения ВЭН, сформированной НЭ до корпуса изделия)

Рисунок 4 – Графическая визуализация разгара модельной ЭДУ

Следует отметить, что на рисунках 4 (а–е) приведены отдельные случаи разгара изделия при указанных сводах, которые необходимы для наглядного описания методики. Результаты измерения площади поверхности горения S от величины сгоревшего свода e полного цикла работы изделия приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения площади поверхности горения S величины от величины сгоревшего свода e

Величина сгоревшего свода e заряда, мм	Площадь поверхности горения S , мм ²
1	2
0	6012
5	5858
10	5704
15	5550

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Продолжение таблицы 1

1	2
17	5488
19	5429
21	5377
23	5338
25	5153
30	4913
40	4727
50	4653
60	4616
70	4594
71	5207
74	5419
80	5635
86	5652
91	5634
96	5643
101	5663
106	5692
110	5717
120	5147
130	4911
140	4726
150	4650
170	4593
173	4542
176	1930
179	0

Далее строится точечная диаграмма, которая соответствует таблице 1 (рисунок 5). Кривая $S(e)$ разбивается на отдельные участки по принципу монотонности (участок № 1 – плавно убывающая функция (маркер – квадрат), участок № 2 – резко возрастающая (маркер – ромб), переходящая в плато, участок № 3 – плавно убывающая (маркер – круг), участок № 4 – резко убывающая (маркер – треугольник)). На соответствующих участках накладываются линии тренда, которые аппроксимированы полиномом $2 \div 6$ степени. В результате проделанных операций получим зависимости ППГ от свода: для 1 участка: $S = -0,0003e^4 + 0,042e^3 - 1,8021e^2 - 8,9888e + 5979,1$ ($R^2 = 0,9907$); для 2 участка $S = -2 \cdot 10^{-5}e^6 + 0,0122e^5 - 2,7875e^4 + 339,77e^3 - 23214e^2 + 842962e - 10^7$ ($R^2 = 0,9746$); для 3 участка $S = 8 \cdot 10^{-5}e^4 - 0,0538e^3 + 13,73e^2 - 1559,5e + 71174$ ($R^2 = 0,9973$); для 4 участка $S = -19,594e^3 + 10946e^2 - 2 \cdot 10^6e + 10^8$ ($R^2 = 0,9983$). При разбиении полной кривой $S(e)$ на отдельные участки необходимо, чтобы величина достоверности аппроксимации R^2 стремилась к 1.

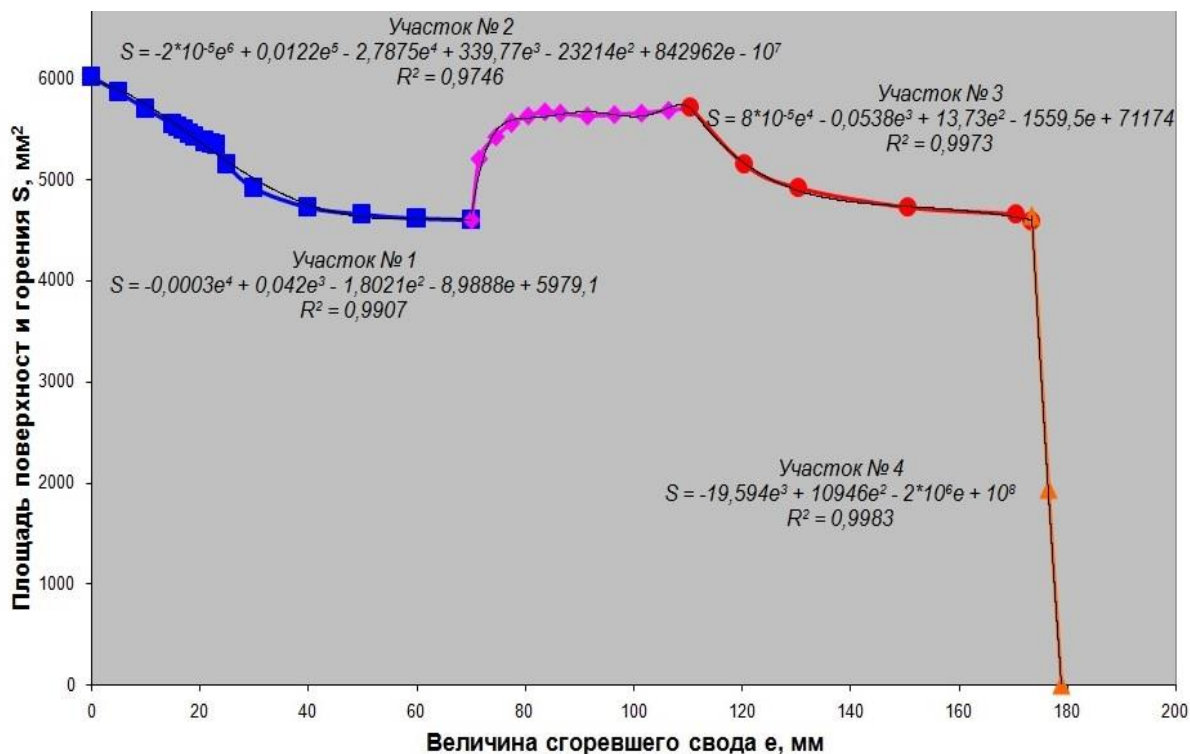


Рисунок 5 – Зависимость площади поверхности горения S от величины сгоревшего свода e

При прорисовке поверхности горения в «особых» точках (выход боковой поверхности на корпус, выход на неизвлекаемый элемент и т. п.) необходимо уменьшать дискретность по величине сгоревшего свода до значений, чтобы обеспечить точное нахождение ППГ при ее резком спаде или подъеме.

Следует отметить, что современные программные комплексы трехмерного моделирования позволяют определять массово-центровочные характеристики (МЦХ) при задании плотности материала ВЭН, такие как масса, объем, координаты центра масс изделия, которые могут использоваться при решении задач внутренней и внешней баллистики [7].

Полученные зависимости $S(e)$ можно использовать для расчета ВБХ с использованием уравнения Бори [8], газодинамических методов, основанных на решении системы нестационарных дифференциальных уравнений [9, 10, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика нахождения ППГ в зависимости от величины сгоревшего свода. Применение трехмерного моделирования горения ЭДУ и автоматизированное измерение ППГ позволяет значительно сократить время и трудоемкость при проведении внутрибаллистических расчетов по сравнению с аналитическими методами для ЭДУ сложных по конструкции форм.

Работа выполнена на оборудовании Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г.Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фахрутдинов, И.Х. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива: Учебник для машиностроительных вузов [Текст] / И.Х. Фахрутдинов, А.В. Котельников. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Плюснин, А.В. Способ расчета поверхности горения пространственного твердотопливного заряда [Текст] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – Сер. «Естественные науки». – С. 86-95.
3. Himanshu Shekhar. Design of Funnel Port Tubular Propellant Grain for Neutral Burning Profile in Rockets [Text] / Shekhar Himanshu // Defense Science Journal. – 2009. – Vol. 59. – № 5. – P. 494-498.
4. Соркин, Р.Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе [Текст] // Р.Е. Соркин. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
5. Трубников, А.А. Проектирование и экспериментальная отработка модельных двигательных установок с неизвлекаемой оснасткой – капроновой нитью [Текст] / А.А. Трубников, В.О. Попов,

Г.Н. Нестеров, Б.В. Певченко, Н.Ф. Панченко, С.А. Зяблицкий, Г.К. Хайновский // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 98-101.

6. Сакович, Г.В. Расчетно-экспериментальные исследования внутрибаллистических характеристик изделий с вкладными элементами [Текст] / Г.В. Сакович, А.А. Трубников, Г.Н. Нестеров, Б.В. Певченко, В.О. Попов // Ползуновский вестник. 2014. – № 4. – Т. 1. – С. 54-58.

7. Ерохин, Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ: Учебник для высших технических учебных заведений [Текст] / Б.Т. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.

8. Волков, Е.Б. Твердотопливные ракеты [Текст] / Е.Б. Волков, Г.Ю. Мазинг, В.Н. Сокольский – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.

9. Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов С. К. [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

10. Самарский, А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики [Текст] / А.А. Самарский, Ю.П. Попов – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 352 с.

11. Трубников, А.А. Нестационарная газодинамическая модель расчета внутрибаллистических характеристик для торцевых и глухоканальных двигательных установок [Текст] / А.А. Трубников, Г.Н. Нестеров // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 6-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием 22-25 мая 2013 г., г. Бийск. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – С. 107-110.

Трубников Андрей Александрович кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории химии азотсодержащих соединений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), andreytrubnikov1986@mail.ru, тел. (3854) 30-58-50.

Попов Виталий Олегович кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории химии азотсодержащих соединений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), admin@ipcet.ru, тел. (3854) 30-58-50.

Алексеева Наталья Алексеевна, инженер лаборатории химии азотсодержащих соединений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), admin@ipcet.ru, тел. (3854) 30-58-50.