

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ С ВКЛАДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Г.В. Сакович, А.А. Трубников, Г.Н. Нестеров, Б.В. Певченко, В.О. Попов

Представлены нестационарная газодинамическая модель расчета внутрибаллистических характеристик, результаты численного моделирования работы и результаты огневых испытаний изделий диаметром 36 мм с открытыми каналами и с вкладными элементами. Вкладные элементы выполнены из инертного материала, сплава Вуда и состава АПЦ-235П.

Ключевые слова: изделие диаметром 36 мм, вкладные элементы, внутрибаллистические характеристики, высокоэнергетический наполнитель.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при разработке новых видов изделий ракетной техники на твердом топливе предъявляются требования по энергоэффективности, которые значительно выше существующих аналогов. Существуют два научных направления по исследованию путей повышения энергоэффективности ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ): 1) конструкторское, целью которого является увеличение коэффициента заполнения изделий до значений 0,90-0,95; 2) рецептурное совершенствование высокоэнергетического наполнителя (ВЭН) для увеличения энергомассовых характеристик.

В данной статье представлены результаты исследований, относящиеся к конструкторскому направлению. Использование вкладных элементов из сгораемых или быстроплавких материалов в конструкции РДТТ в качестве неизвлекаемой оснастки позволит повысить коэффициент заполнения.

Из источников известно, что первые работы, посвященные применению в РДТТ неизвлекаемых элементов, проведены в США в 1960-х годах [1]. Однако изготовление изделий по разработанным в [1] конструкциям сдерживалось из-за отсутствия материалов с требуемыми характеристиками и технологическими проблемами, возникшими при их производстве. На сегодняшний день большинство из этих проблемных вопросов решено и данное направление является перспективным.

Перед проведением огневых испытаний модельных установок с неизвлекаемой оснасткой, состоящей из сгораемых (плавких) элементов, скрепленных между собой напри-

мер капроновой нитью, как описано в работе [2], целесообразно проводить сжигание этих элементов автономно и в составе малогабаритных изделий диаметром 36 мм.

В настоящей статье рассмотрены варианты конструкции изделия диаметром 36 мм с открытыми каналами диаметрами 5 и 10 мм, вкладными элементами, выполненными из инертного материала, сплава Вуда и состава АПЦ-235П, представлены результаты численного моделирования внутрибаллистических характеристик (ВБХ) и испытаний изделий.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ВКЛАДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С целью определения механизма работы вкладных элементов в составе изделия 36 мм разработана конструкция, представленная на рисунке 1.

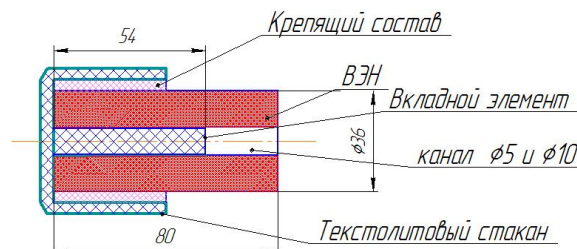


Рисунок 1 – Схема конструкции изделия 36 мм с вкладным элементом

Для установления минимально и максимально возможного уровня давления в камере сгорания предложено два предельных варианта: 1) с вкладным элементом выполнен-

ным из инертного материала, в этом случае поверхность горения будет наименьшей, соответственно уровень давления в камере – наименьшим; 2) с открытыми каналами 5 и 10 мм на всю длину изделия. В этом случае поверхность горения будет наибольшей и уровень давления наибольший.

В качестве элемента из быстроплавкого материала выбрана трубка, изготовленная из сплава Вуда, с наружным диаметром 10 мм, толщиной стенки 0,4 мм. Температура плавления металла 341,6 К, плотность 9720 кг/м³.

В качестве сгораемого элемента выбрана трубка из состава АПЦ-235П с наружным диаметром 4,6 мм, внутренним – 1,7 мм

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВБХ

Метод численного моделирования внутрибаллистических характеристик, который применялся при расчете процесса работы изделия, состоит из двух этапов: 1) нахождение поверхности горения, в зависимости от величины сгоревшего свода ВЭН; 2) непосредственный расчет ВБХ с использованием нестационарных уравнений газовой динамики [3].

Площадь поверхности горения рассчитывается аналитически. Газодинамический расчет ВБХ строится на основе законов сохранения массы (1), количества движения (2) и энергии (3). Систему уравнений (1-3) замыкает уравнение состояния продуктов сгорания ВЭН (4).

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho s u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho s u)}{\partial t} + \frac{\partial[s(\rho u^2 + p)]}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial\left[\rho s\left(e + \frac{u^2}{2}\right)\right]}{\partial t} + \frac{\partial\left[\rho s u\left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}\right)\right]}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$e = \frac{p}{\rho(k-1)}, \quad (4)$$

где ρ , u , p , e , k – плотность, скорость, давление, внутренняя энергия, показатель адиабаты продуктов сгорания соответственно, s – площадь проходного сечения, t –

время, x – координата, вдоль которой ведется расчет.

Левые части граничных условий (5-7) записываются в виде нестационарных уравнений, аналогичных (1) и (3), с учетом скорости прихода массы от воспламенителя m_e и ВЭН m_t , которые сгорают в свободном объеме V_0 .

$$V_0 \frac{\partial \rho}{\partial t} = (m_e + m_t), \quad (5)$$

$$V_0 \frac{\partial e}{\partial t} = (m_e + m_t) c_p T_G, \quad (6)$$

$$u = 0, \quad (7)$$

где c_p – удельная изобарная теплоемкость, T_G – температура горения ВЭН,

$$m_e = S_e a_e \left(\frac{p}{p_{амм}}\right)^{v_e} \rho_e, \quad m_t = S_t a_t \left(\frac{p}{p_{амм}}\right)^{v_t} \rho_t;$$

S , a , v , ρ – площадь поверхности горения, множитель и показатель в степенном законе скорости горения, плотность воспламенителя (нижний индекс e) и ВЭН (нижний индекс t) соответственно, $p_{амм}$ – атмосферное давление.

Правые части граничных условий рассчитываются согласно соотношениям (8-9), определяющим связь параметров торможения в любом сечении потока [4], и равенству скорости звука продуктов сгорания локальной скорости газового потока в критическом сечении сопла (10):

$$p = p_0 \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (8)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (9)$$

$$u = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}. \quad (10)$$

где p_0 и ρ_0 – известные плотность и скорость продуктов сгорания в одном из сечений изделия.

Для нахождения ВБХ по вышеуказанным уравнениям применялась схема распада

произвольного разрыва [3], предложенная С.К. Годуновым, устойчиво моделирующая газодинамические потоки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены расчетная и экспериментальные зависимости давления (огневые стендовые испытания (ОСИ) образцов №1, 2) в камере сгорания от времени работы двух одинаковых изделий с вкладным элементом из инертного материала.

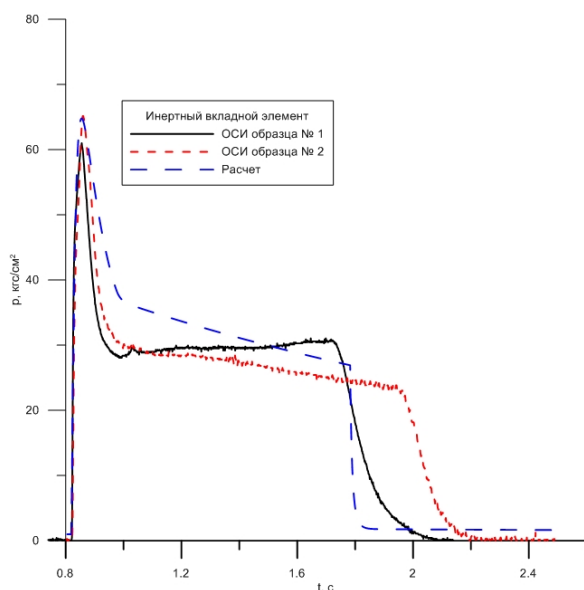


Рисунок 2 – Расчетная и экспериментальная зависимости давления в камере сгорания от времени работы образцов № 1, 2 с вкладным инертным материалом

Из рисунка видно, что кривые удовлетворительно соответствуют друг другу, площадь поверхности под кривыми давления (интегралы давления I_{pt}) равны 31,55 (ОСИ № 1), 34,5 (ОСИ № 2) и 34,01 кгс*с/см² (расчет). Поверхность горения образца № 1 после выхода на маршевый режим увеличивается, что говорит о недостаточной адгезии инертного вкладного наполнителя с ВЭН.

На рисунке 3 представлены расчетная и экспериментальные кривые давления для сборки с открытым каналом 5 мм. Как видно из рисунка 3, расчетная зависимость с полностью открытым по длине горящим центральным каналом находится выше экспериментальной кривой. Для выяснения причины подобного явления был произведен дополнительный расчет поверхности горения (решение обратной задачи внутренней баллисти-

ки). В результате проведенного анализа установлено, что канал зажигается не на всю длину сразу, как предполагалось априори, а на 55 мм от правого торца сборки (рисунок 1). Распространению форса пламени по центральному каналу препятствует воздух, находящийся в левой части сборки, создается так называемый эффект «воздушной пробки».

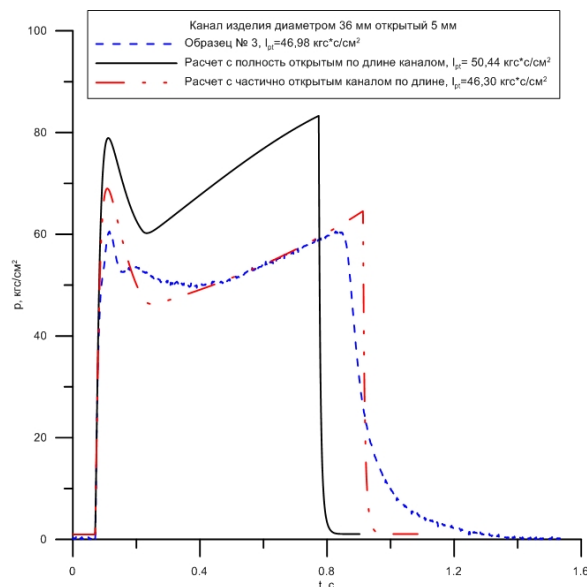


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментальная зависимости давления в камере сгорания от времени работы образца № 3 с полностью открытым и частично открытым каналом диаметром 5 мм

На рисунке 4 показаны расчетные и экспериментальная зависимости давления в камере сгорания сборки с открытым каналом диаметром 10 мм. Как видно из рисунка 4, расчетная зависимость с полностью открытым по длине горящим центральным каналом находится выше экспериментальной кривой, как и в случае с образцом № 3. Произведен расчет поверхности горения, соответствующей экспериментальной, в результате которого установлено, что канал зажигается на 15 мм от правого торца сборки. Форс пламени распространяется по каналу со скоростью $25 * d_i / t$ (d_i – величина сгоревшего свода), пока величина длины горящего центрального канала не станет равной 50 мм, далее скорость распространения пламени по поверхности канала значительно снижается и становится равной $2 * d_i / t$.

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ С ВКЛАДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Обобщая два ОСИ № 3, 4, установлено, что распространению пламени по поверхности центрального канала мешает «воздушная пробка» в головной части.

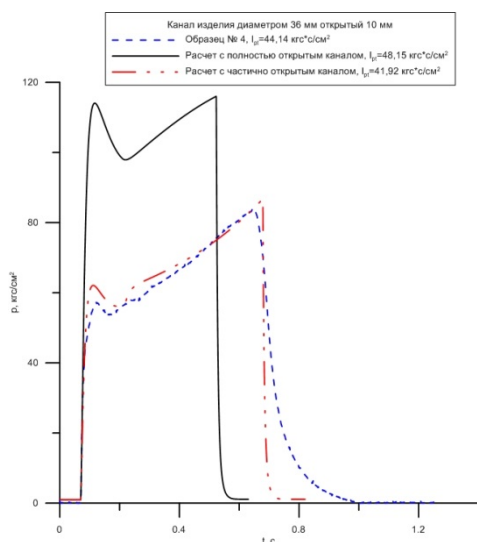


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальная зависимости давления в камере сгорания от времени работы образца № 4 с полностью открытым и частично открытым каналом диаметром 10 мм

На рисунке 5 приведены кривые давления для сборки с быстроплавким вкладным элементом в виде трубки, изготовленным из сплава Вуда. Из рисунка 5 видно, что зависимость давления в камере сгорания от времени работы образца № 5 лучше совпадает с расчетной зависимостью, что говорит о более лучшем качестве изготовления как самой трубки, так и сборки в целом. При ОСИ образца № 6 длина горячей поверхности центрального канала равна 30 мм от правого торца, что свидетельствует о том, что трубка из сплава Вуда не плавилась в радиальном направлении, а плавилась от одного торца к другому.

На рисунке 6 представлены расчетные и экспериментальные зависимости давления от времени работы образцов № 7, 8 с сгораемым вкладным элементом в виде трубки, выполненным из состава АПЦ-235П, не обернутым и обернутым тонким слоем алюминиевой фольги

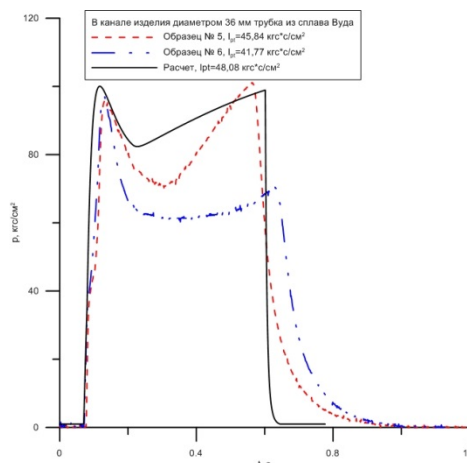


Рисунок 5 – Расчетная и экспериментальные зависимости давления в камере сгорания от времени работы образцов № 5, 6 с вкладным элементом в виде трубки из сплава Вуда

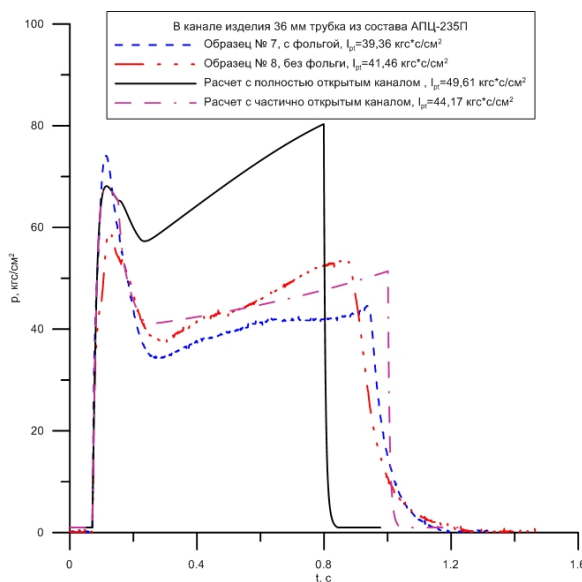


Рисунок 6 – Расчетные и экспериментальные зависимости давления в камере сгорания от времени работы образцов № 7, 8 с сгораемым элементом в виде трубки из состава АПЦ-235П

Из рисунка 6 видно, что экспериментальные кривые имеют схожий характер, но отличаются по уровню давления. Связано это с наличием алюминиевой фольги. Расчетная кривая, с полностью открытым каналом, по уровню давления в момент выгорания трубки, вложенной в центральный канал изделия диаметром 36 мм, значительно выше экспериментальных. С целью выяснения причины этого явления произведен расчет горячей поверхности центрального канала, соответствующий экспериментальному (решение об-

ратной задачи внутренней баллистики), в результате которого обнаружилось, что канал горит на длине 50 мм от правого торца сборки (рисунок 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплекса проведенных работ показано, что вкладные элементы, выполненные в виде трубок из быстроплавкого сплава Вуда и сгораемого состава АПЦ-235П, могут использоваться в качестве элементов неизвлекаемой оснастки в модельных изделиях.

Результаты огневых испытаний изделий с открытыми центральными каналами и поддерживающими вкладные элементы из сплава Вуда и состава АПЦ-235П показали эффект «воздушной пробки», т.е. центральный канал изделия горит не по всей своей длине, а лишь частично. В результате численного моделирования ВБХ процесса работы изделий установлены длины центральных каналов, по которым распространяется форс пламени после выгорания элементов.

Необходима доработка методики расчета ВБХ с целью учета эффекта «воздушной пробки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 3300549 США. Methods of producing propellant grain adapted for single stage rockets / Hideo Matsubara.

2. Трубников А.А., Попов В.О., Нестеров Г.Н., Певченко Б.В., Панченко Н.Ф., Зяблицкий С.А., Хайновский Г.К. Проектирование и экспериментальная отработка модельных двигательных установок с неизвлекаемой оснасткой – капроновой нитью // Ползуновский вестник. – 2013. – №3. – С. 98-101.

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

4. Соркин Р.Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. – М.: Наука, 1983. – 288 с.

Сакович Геннадий Викторович академик РАН, научный руководитель ИПХЭТ СО РАН, admin@ipcet.ru

Трубников Андрей Александрович инженер лаборатории ИПХЭТ СО РАН

Нестеров Григорий Николаевич к. т. н., ведущий инженер лаборатории ИПХЭТ СО РАН, admin@ipcet.ru

Певченко Борис Васильевич к. т. н., старший научный сотрудник лаборатории ИПХЭТ СО РАН, admin@ipcet.ru

Попов Виталий Олегович младший научный сотрудник лаборатории ИПХЭТ СО РАН