

РАН), ipcet@yandex.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия, тел. (3854)30-18-66

Попок Николай Иванович, главный научный сотрудник лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем, доктор технических наук Федерального го-

сударственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия.

УДК 621.454.3 – 181.4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА МОДЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С НЕИЗВЛЕКАЕМОЙ ОСНАТКОЙ – КАПРОНОВОЙ НИТЬЮ

А.А. Трубников, В.О. Попов, Г.Н. Нестеров, Б.В. Певченко,
Н.Ф. Панченко, С.А. Зяблицкий, Г.К. Хайновский

Представлены нестационарная газодинамическая модель расчета внутрибаллистических характеристик, результаты численного моделирования и экспериментальной отработки модельных двигательных установок с неизвлекаемой оснасткой. Проведены испытания на химическую совместимость с наполнителем и механическую прочность материала неизвлекаемой оснастки.

Ключевые слова: модельная двигательная установка, неизвлекаемая оснастка, внутрибаллистические характеристики, высокоэнергетический наполнитель.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при отработке ракетных двигателей на твердом топливе используются конструкции модельных двигательных установок (МДУ), которые можно разделить по типам: на торцевые, с цилиндрическим каналом и канално-щелевые МДУ [1]. Одной из актуальных проблем современного проектирования МДУ является эффективность ее работы, которая обеспечивается высоким коэффициентом заполнения при увеличенной, по сравнению с торцевой, площади поверхности горения. Варьируя геометрией канала наполнителя МДУ достигается площадь поверхности горения, необходимая для заданного режима работы изделия. Высокий уровень заполнения МДУ обеспечивается за счет использования неизвлекаемой оснастки (НО). Первые исследования, посвященные применению НО, в двигательных установках были проведены в 1960-х годах [2], однако практическое применение сдерживалось отсутствием материалов с требуемыми характеристиками и технологическими проблемами, возникающих при изготовлении. На сегодняшний день многие из этих проблемных вопросов решены, и данное направление развитие специальной техники считается перспективным.

В представленной статье в качестве НО рассматривается капроновая нить, которая

может служить скрепляющим звеном для неизвлекаемых элементов, изготовленных из быстрогорящих составов или материалов и композиций на их основе. Скорость горения таких элементов или композиций существенно больше скорости горения наполнителя МДУ. Для НО обязательными требованиями к характеристикам ее применения в МДУ служат достаточный уровень механической прочности и химическая совместимость с высокоэнергетическим наполнителем (ВЭН).

Перед проведением формования и экспериментальной отработки МДУ, следует производить расчет внутрибаллистических характеристик (ВБХ) с использованием специальных методов и моделей, с целью устранения неверно принятых конструкторских решений при проектировании МДУ. В настоящее время разработано достаточно большое число методов расчетов ВБХ, однако наиболее точными из них являются газодинамические методы, в которых применяются нестационарные уравнения, описывающие высокоскоростное движение потока продуктов сгорания по газовому тракту.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА НЕИЗВЛЕКАЕМОЙ ОСНАСТКИ

В качестве материала гибких элементов скрепляющих НО рассмотрены капроновые и

лавсановые нити. Предел прочности на растяжение исходной капроновой нити (условный диаметр $d_{\text{усл.}} = 1,8$ мм) составляет $\sigma_d = 10$ кгс/мм², лавсановой ($d_{\text{усл.}} = 1,5$ мм) – 17 кгс/мм².

Для оценки растворимости используемых нитей в активном горючем связующем (ГСВ) выполнена пропитка исходных и покрытых адгезионным составом нитей в ГСВ при температуре 60 °С в течение 4 суток с последующим определением прочностных характеристик. Во время пропитки для всех образцов наблюдалась абсорбция пластификатора нитями и частичное растворение как исходных нитей, так и покрытых адгезивом, что оказало значительное влияние на механическую прочность.

Предел прочности пропитанной капроновой нити по сравнению с исходной снизился незначительно, а нити с адгезионным покрытием более чем в 2 раза. У пропитанной нити типа лавсан прочность снижается в 2 раза, а у покрытой – практически в 3 раза, по сравнению с исходной.

Анализ химической совместимости лавсановой и капроновой нитей с активным ГСВ проводился на установке «Вулкан» в среде азота при температуре 110 °С в течение 4 часов. В результате исследования установлено, что в течение 4 часов уровень газовыделения данных образцов не превышает уровня газовыделения исходного активного горючего связующего (0,03 г/см³).

В результате комплекса проведенных работ в качестве скрепляющего элемента НО рекомендуется использовать нить капроновую, прочностью 10 кгс/мм², которая химически совместима с активным горючим связующим и менее в нем растворима.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВБХ

Вначале вычислительного процесса определения ВБХ во многих моделях производится расчет площади поверхности горения в зависимости от величины сгоревшего свода наполнителя.

Площадь поверхности горения рассчитывается аналитически, исходя из известных формул площадей для простых фигур (например, площадь боковой поверхности цилиндра – площадь горящего цилиндрического канала, площадь кольца – торцевая поверхность горения изделия с цилиндрическим каналом и т.д.). Для МДУ, которые имеют развитую форму канала, процесс расчета площади поверхности горения довольно трудоемок и занимает значительную часть вычислений [3].

В пристеночной зоне (корпус-материал наполнителя) скорость горения ВЭН в зоне контакта с корпусом отличается от скорости горения вне этой зоны, из-за чего образуется кривизна фронта. В настоящем расчете процесс горения ВЭН рассматривался эквидистантным, т.е. скорость горения в текущий момент времени одинакова во всех направлениях. Скорость горения капроновой нити принималась равной скорости горения ВЭН.

Модель расчета ВБХ строится на основе нестационарных газодинамических уравнений [3, 4], выражающих законы сохранения массы (1), количества движения (2) и энергии (3). Система (1-3) замыкается уравнением состояния продуктов сгорания ВЭН (4), которое записано для внутренней энергии.

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

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

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

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

где ρ , u , p , e , k – плотность, скорость, давление, внутренняя энергия, показатель адиабаты продуктов сгорания, соответственно, s – площадь проходного сечения, – 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_b и ВЭН m_t , которые сгорают в свободном объеме V_0 .

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

$$V_0 \frac{\partial e}{\partial t} = (m_b + m_t) c_p T_r \quad (6)$$

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

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

$$m_b = S_b a_b \left(\frac{p}{p_{атм}} \right)^{v_b} \rho_b, \quad m_t = S_t a_t \left(\frac{p}{p_{атм}} \right)^{v_t} \rho_t;$$

S , a , v , ρ – площадь поверхности горения, множитель и показатель в степенном законе скорости горения, плотность воспламенителя

(нижний индекс v) и ВЭН (нижний индекс t), соответственно.

Правые части граничных условий рассчитываются исходя из параметров торможения характеризующих состояние газа при любом процессе [5], и равенстве скорости звука продуктов сгорания локальной скорости газового потока в критическом сечении сопла:

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

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

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

Для реализации численного расчета по вышеуказанным уравнениям строилась сетка, и применялась схема, предложенная С.К. Годуновым [4] для одномерного случая, обладающая устойчивостью и надежностью при решении подобного класса задач [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Принципиально новыми элементами рассматриваемых конструкций являются неизвлекаемые элементы и капроновая нить, существенно влияющая на работоспособность МДУ в целом. На начальном этапе исследований подобных конструкций целесообразно рассматривать влияние этих факторов автономно и последовательно. В настоящем расчетно-экспериментальном исследовании авторы ограничились введением в ВЭН только капроновой нити.

С целью обеспечения прочностной работоспособности скрепленного с корпусом МДУ наполнителя в средней (по длине) зоне границы скрепления было введено кольцевое раскрепление. Капроновая нить по всей длине соприкосновения с наполнителем покрывалась клеящим составом. На рисунке 2 представлена схема конструкции МДУ с указанием зон скрепления.

Результаты дефектоскопии МДУ после изготовления показали, что структурная целостность в зоне скрепления капроновой нити с ВЭН обеспечена. Раковин и отслоений не обнаружено, что свидетельствует о механической работоспособности реализованной системы корпус-ВЭН-капроновая нить.

После проведения огневого испытания МДУ в результате осмотра сборки дефектов

на корпусе и сопловом вкладыше обнаружено не было. Теплозащитное покрытие (ТЗП) выгорело приблизительно на 80 % и свободно отслаивалось от стенок корпуса МДУ, что свидетельствует о выборе достаточной толщины ТЗП.

На рисунке 1 приведены зависимости давления в камере сгорания МДУ от времени работы, полученные в результате численного моделирования и экспериментальной отработки конструкции МДУ с капроновой нитью, расположенной по оси изделия.

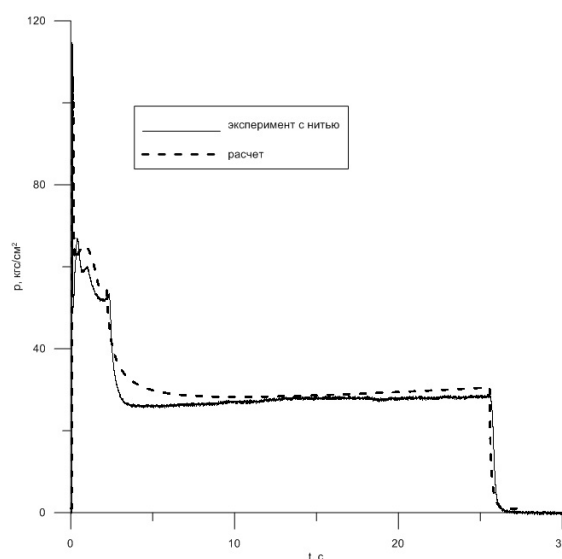


Рисунок 1 – Теоретическая и экспериментальная зависимость давления в камере сгорания МДУ от времени работы

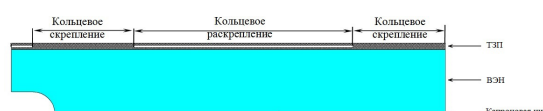


Рисунок 2 – Схема конструкции МДУ (корпус двигательной установки условно не показан)

Из результатов сравнения видно, что расчетная и экспериментальная кривые давлений удовлетворительно совпадают друг с другом. Влияние горения капроновой нити на ВБХ МДУ не наблюдалось, что подтверждает правильность проведенных исследований на механическую прочность и химическую совместимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что исследованная конструкция МДУ с НО в виде капроновой нити работоспособна и может в последующем усовершенствоваться –

добавлением в нее неизвлекаемых элементов, выполненных из быстрогорящих составов или материалов и композиций на их основе. Приведенные результаты исследований механической прочности и химической совместимости капроновой нити свидетельствуют о ее пригодности для использования вместе с наполнителем.

Представлена нестационарная газодинамическая модель, которая адекватно описывает внутрибаллистические процессы, происходящие в камере сгорания во время работы МДУ. Данная модель может дорабатываться путем добавления в нее уравнений, учитывающих: 1) теплопроводность для расчета точного времени воспламенения наполнителя; 2) влияние горения неизвлекаемых элементов на ВБХ МДУ; 3) горение в прикорпусной зоне; 4) эрозионные процессы.

В дальнейших исследованиях предусматривается проведение экспериментально-теоретического анализа работоспособности конструкций МДУ, содержащих различные сочетания неизвлекаемых элементов, скрепленных капроновой нитью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин, Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ: Учебник для высших технических заведений / Б.Т. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
2. Пат. 3300549 США. Methods of producing propellant grain adapted for single stage rockets / Hideo Matsubara.
3. Трубников А.А., Нестеров Г.Н. Нестационарная газодинамическая модель расчета внутрибаллистических характеристик для торцевых и глухоканальных двигательных установок / 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. ун-та, 2013. – В печати.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов С. К. [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
5. Соркин, Р.Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе:

внутренняя баллистика / Р.Е. Соркин. – М.: Наука, 1983. – 288 с.

Трубников Андрей Александрович, инженер лаборатории ИПХЭТ СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), admin@ipcet.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-50, факс (3854) 30-17-25.

Попов Виталий Олегович, младший научный сотрудник лаборатории ИПХЭТ СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), admin@ipcet.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-50, факс (3854) 30-17-25.

Нестеров Григорий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), ОАО «ФНПЦ «Алтай», post@frpc.secna.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-19-74, факс (3854) 31-13-09.

Певченко Борис Васильевич, заместитель генерального директора, директор по науке, кандидат технических наук ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), post@frpc.secna.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-21, факс (3854) 31-13-09.

Панченко Наталья Федоровна, начальник лаборатории 106, кандидат технических наук ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), post@frpc.secna.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-00, факс (3854) 31-13-09.

Зяблицкий Сергей Анатольевич, инженер I категории ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), ОАО «ФНПЦ «Алтай», post@frpc.secna.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-00, факс (3854) 31-17-03.

Хайновский Геннадий Константинович, ведущий инженер-технолог ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (ОАО «ФНПЦ «Алтай»), post@frpc.secna.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-19-08, факс (3854) 31-13-09.