

УДК 629.7.036

Анализ напряженно-деформированного состояния поворотного управляющего сопла с эластичным опорным шарниром ракетного двигателя твердого топлива

Горелов Данила Янович

guineverelove@yandex.ru

Ларин Данила Александрович

lda20ea225@student.bmstu.ru

Ворожеева Олеся Андреевна

oa-vorozheeva@mail.ru

SPIN-код: 3219-8511

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния соплового блока ракетного двигателя твердого топлива с поворотным управляющим соплом. Представлена постановка задачи в Ansys Transient Structural с учетом давления продуктов сгорания и закона перемещения штока рулевого привода. Показано применение гиперупругой модели Mooney-Rivlin для резины эластичного опорного шарнира и линейной упругости для металлических деталей; учтены контактные взаимодействия и инерционные эффекты. Сделаны выводы о пригодности подхода для оценки прочности узлов и требуемой силы привода на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, сопловой блок, поворотное сопло, эластичный опорный шарнир, гиперупругость, Mooney-Rivlin, Ansys

Введение. В современных и перспективных ракетных двигателях твердого топлива (РДТТ) широко применяются поворотные управляющие сопла благодаря высокой эффективности управления вектором тяги. Стоимость экспериментальной отработки таких узлов достаточно высока, что делает численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) соплового блока (СБ) предпочтительным на этапе эскизного проектирования. Это определяет актуальность разработки оперативной и повторяемой методики расчета НДС соплового блока и предварительной оценки требуемой силы рулевого привода. Целью работы является формирование такой методики и демонстрация ее применимости к СБ с эластичным опорным шарниром (ЭОШ).

Методы и материалы; результаты. Моделирование выполнялось в программном комплексе Ansys 2023 R1 (модуль Transient Structural) с учетом нестационарной нагрузки давлением продуктов сгорания на элементы сопла и перемещения штока привода, задаваемого как функция времени из требований динамики ракеты [1]. ЭОШ представлен пакетом чередующихся сферических тарелей из стали и резины. Для резины применена гиперупругая модель Mooney-Rivlin в квази-несжимаемой формулировке Mixed U-P, для стали — линейная упругость [2, 3]. Геометрия ЭОШ дискретизирована 20-узловыми объемными элементами, прочие элементы СБ — оболочечными элементами. Контактные взаимодействия заданы типом «склейка», либо

сцепление без проскальзывания, в зависимости от пары поверхностей [1]. Для диапазона рабочих температур до 200 °С предполагалось, что теплозащита обеспечивает допустимый температурный режим резиновых вставок, термодеградация не учитывалась. По результатам расчетов получены поля напряжений и деформаций на основных узлах, а также оценены составляющие шарнирного момента поворотного управляющего сопла (позиционная и инерционная), что позволило вычислить требуемую силу привода и сопоставить ее с ограничениями по прочности проушины и соединительных элементов [4].

Заключение. Предложенная методика конечно-элементного моделирования НДС соплового блока РДТТ с поворотным соплом обеспечивает достаточную точность на ранних стадиях проектирования при умеренных трудозатратах. Она позволяет выявлять зоны концентраций напряжений, проверять работоспособность ЭОШ и оперативно оценивать требуемую силу рулевого привода для подбора актуаторов и элементов крепления. Дальнейшее развитие связано с учетом нагрева, деградации эластомеров и параметрическими исследованиями влияния геометрии ЭОШ и законов управления.

Список источников

- [1] *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 2023 R1.* URL: <https://ansyshelp.ansys.com/> (дата обращения 14.11.2025).
- [2] Огден Р.У. *Нелинейные упругие деформации (Non-Linear Elastic Deformations)*. Москва, Мир, 1984, 546 с.
- [3] Лурье А.И. *Нелинейная теория упругости*. Москва, Наука, 1980, 512 с.
- [4] Gent A.N. *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. Munich, Hanser, 2012, 451 p.