

УДК 621.454.2

МЕТОДИКА РАСЧЁТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ СОПЛА ЖРД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЯГИ С УЧЁТОМ ПРОЧНОСТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Шаблий Л. С., Зубанов В. М.

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва, г. Самара

Как известно, повышение тяги, удельного импульса и других эксплуатационных параметров [1] современных ЖРД является актуальной задачей аэрокосмического машиностроения. Появившиеся относительно недавно технологии виртуального компьютерного моделирования, позволяют решать задачи оптимизации методами, основанными на многократном виртуальном моделировании [2]. В данной работе предложена методика оптимизации формы расширяющейся части сопла ЖРД тягой 100 кН, спроектированного для межорбитального транспортного аппарата, с помощью виртуального газодинамического моделирования в ANSYS.

Виртуальная CFD-модель газодинамического течения в сопле была создана в ANSYS Fluent (рис. 1). По ней для заданных условий работы спроектированного сопла (параметры рабочего тела на входе, давления на входе и выходе) определялись тяга, удельный импульс сопла, а также распределение статического давления на внутренней поверхности, которое затем было использовано в качестве граничного условия для анализа на статическую прочность в ANSYS Mechanical. Примечательно, что удалось добиться точности моделирования, приемлемой для многовариантного оптимизационного исследования: рассчитанная тяга базового варианта сопла, построенного по методике [3], составила 99,14 кН, а удельный импульс – 4323 м/с.

Далее, линия расширяющейся части сопла, состоящая из дуги окружности и сплайна, построенного по трём точкам, была параметризована (рис. 2) шестью параметрами со следующими диапазонами изменения (в скобках указано базовое значение и относительные изменения): длина расширяющейся части сопла $L_a=935\dots1155$ ($1100_{-15\%}^{+5\%}$) мм, радиус дуги после критического сечения $R_{c3}=2\dots20$ ($14_{-85\%}^{+40\%}$) мм, угол расширения сопла в критическом сечении $\beta_m=30\dots70^\circ$ ($50_{-40\%}^{+40\%}$), угол расширения в выходном сечении $\beta_a=5\dots19^\circ$ ($15_{-70\%}^{+30\%}$), удаление опорных точек сплайна от его концов для критического (к) и выходного (а) сечений: $spline_k, spline_a=1\dots99\%$ (базовое – 5%). Следует отметить, что в [1] для обозначения углов β используется буква Θ .

Для оптимизации был применён инструментарий ANSYS Design Exploration, а именно: оценка чувствительности параметров (Local Sensitivity), построение поверхности отклика в полиномах 2-го порядка (Response Surface) и непосредственно оптимизационный алгоритм переборки (отсева) вариантов (Screening Optimization).

Предварительная оценка чувствительности параметров показала, что определяющее влияние на тягу и импульс имеют β_a и β_m , $spline_k$ и $spline_a$, в то время как L_a влияет в меньшей степени, а влияние R_{c3} незначительно (рис. 3). В первом случае была проведена оптимизация по критериям максимальной тяги и удельного импульса, и удалось увеличить тягу на 0,6%, а удельный импульс на 0,2%, причём при уменьшенной до 1093 мм длине L_a . Поскольку от длины сопла сильно зависит масса двигателя, было решено дополнить задачу оптимизации критерием минимизации L_a . При этом удалось добиться укорочения сопла на 15% (до 936 мм) при незначительном (на 0,18%) уменьшении тяги. Множество Парето, соответствующее второй задаче, приведено на рис. 5. Изменение формы сопла, соответствующее первой и второй

задаче, приведено на рис. 4. В обеих задачах дополнительным ограничением выступал критерий максимального эквивалентного напряжения, получаемый из прочностной модели.

Таким образом, была создана методика, позволяющая расчётным путём оптимизировать форму расширяющейся части сопла ЖРД для получения максимальной тяги при минимальной длине сопла с учётом прочностных ограничений.

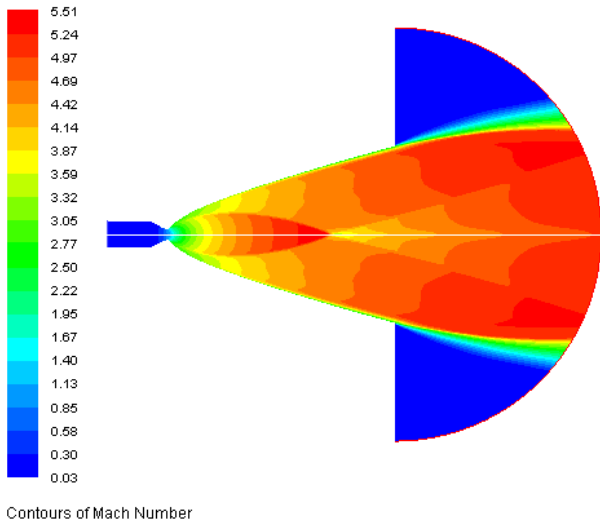


Рис. 1. Поле распределения числа Маха, вычисленное в ANSYS Fluent

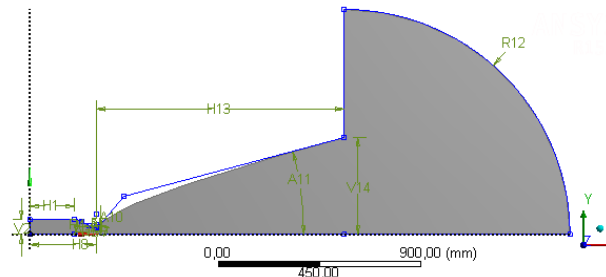


Рис. 2. Параметризованная модель сопла

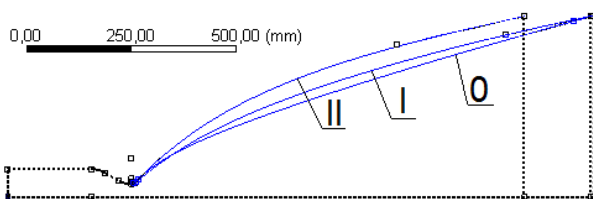


Рис. 4. Изменение формы сопла по сравнению с базовым вариантом («0»)

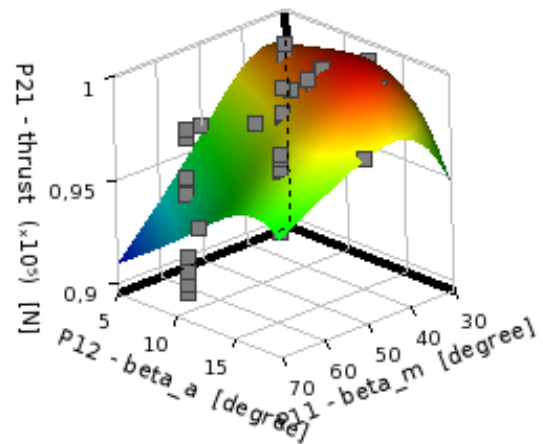
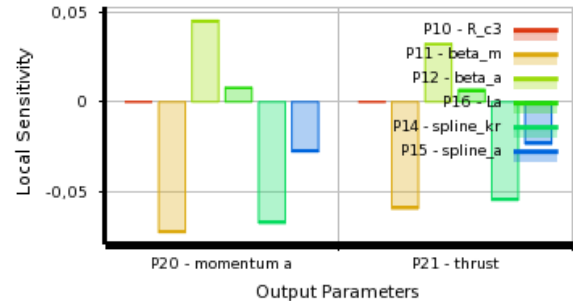


Рис. 3. Диаграмма чувствительности параметров (вверху) и поверхность отклика при оценке влияния β_a и β_m на тягу (внизу)

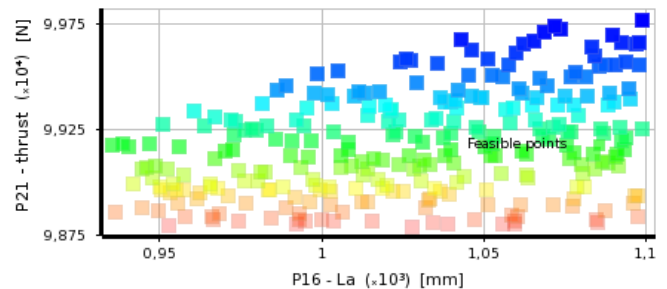


Рис. 5. Множество Парето «длина L_a – тяга»

Библиографический список

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели: Основы проектирования: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1968. – 396 с.
2. Шаблий Л. С., Колмакова Д. А., Кривцов А. В. Параметрическое моделирование лопаточных машин при оптимизации. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Том 15, №6(4). – 2013. – С.1013-1018.
3. Егорычев, В.С., Кондрусев, В. С. Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД: учебное пособие [Текст]/ В. С. Егорычев, В. С. Кондрусев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 108 с.