

УДК 621.454.2

ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕГО ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Шаблий Л. С.

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. При этом стоимость экспериментальной доводки ЖРД подчас оказывается существенно выше, чем расчётные оптимизационные исследования, которые позволяют создать ЖРД с наилучшими параметрами ещё на этапе проектирования, что сокращает время создания и конечную стоимость изделия.

Традиционным подходом к решению любой задачи оптимизации является общематематический подход, когда оптимизируемая величина (например, тяга ЖРД или удельный импульс), выражается как функция варьируемых проектных параметров (геометрических размеров элементов ЖРД, газодинамических параметров потока в камере, прочностных параметров, конструктивных ограничений и т.д.) в явном или неявном виде. Затем, с помощью инструментов математического анализа отыскиваются экстремумы этой функции и соответствующие им значения оптимизируемых параметров [2]. К сожалению, трудоёмкость создания адекватной оптимизируемой функции (верифицированной математической модели) превышает экспериментальную доводку ЖРД. Ведь чтобы корректно отразить в функциональном виде влияние какого-то конструктивного фактора, например, на величину тяги, необходимо провести и математически обобщить соответствующее экспериментальное исследование.

Сравнительно недавно появились технологии виртуального компьютерного моделирования, позволяющие решать задачи оптимизации методами, основанными на многократном виртуальном моделировании [3, 4]. Главное отличие этого подхода состоит в том, что функциональная зависимость N оптимизируемых параметров, оптимизируемая по K критериям, строится в $(N+K)$ -мерном пространстве (рис. 1) исключительно по данным о значениях критериев, полученных из виртуальных моделей, построенных для соответствующих сочетаний параметров в интересующей области, совершенно без анализа физического влияния параметров на критерии. Последнее является очень важным преимуществом этого подхода, поскольку позволяет рассматривать виртуальную модель как «чёрный ящик», не анализируя причины влияния тех или иных параметров на критерии. При этом оценка взаимного влияния множества параметров на рассматриваемые критерии производится алгоритмом оптимизации автоматически. Современные алгоритмы, такие как ANSYS Design eXplorer и Sigma Technology IOSO позволяют проводить одновременную оптимизацию по нескольким критериям, зависящим от нескольких сотен параметров [5].

На рис. 2 приведена схема процесса построения аппроксимирующей оптимизационной поверхности с использованием в качестве виртуальной модели CFD-модели течения в камере ЖРД. Аналогично могут быть применены как модели более низкого уровня (например, математические функции традиционного подхода), так более высокого, вплоть до полной трёхмерной модели виртуального ЖРД, включающей не только CFD-моделирование течений во всех трактах двигателя с учётом фазовых переходов и химических превращений, но и FEM-оценку прочностного состояния конструкции. Также могут использоваться и комбинированные, многоуровневые модели, когда, например, моделирование течения топлива по

трубопроводам ведётся в одномерной постановке, качество его распыла форсунками оценивается по нуль-мерным критериальным зависимостям, а моделирование процесса горения в камере выполняется в трёхмерной нестационарной постановке. Естественно, поскольку значения, полученные из «чёрного ящика» покрывают исследуемую область сеткой конечной густоты, такой подход к оптимизации содержит методологическую ошибку: аппроксимирующая поверхность в общем случае не может гарантировать отыскание глобального экстремума при резких изменениях критерия (рис. 3). Однако, как показывает практика, существующие технологии программ-оптимизаторов позволяют свести вероятность ошибки [6].

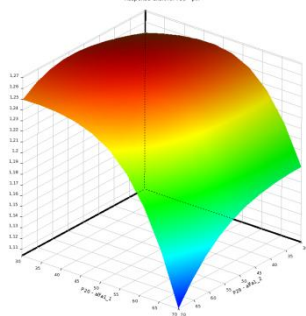


Рис. 1. Пример визуализации в трёхмерном пространстве двух-параметрической зависимости, оптимизируемой по одному критерию

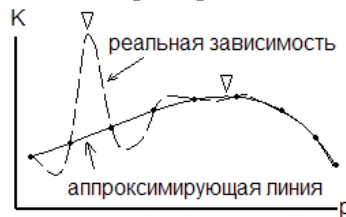


Рис. 3. Ошибка оценки глобального максимума оптимизируемого критерия при недостаточной дискретизации области аппроксимации

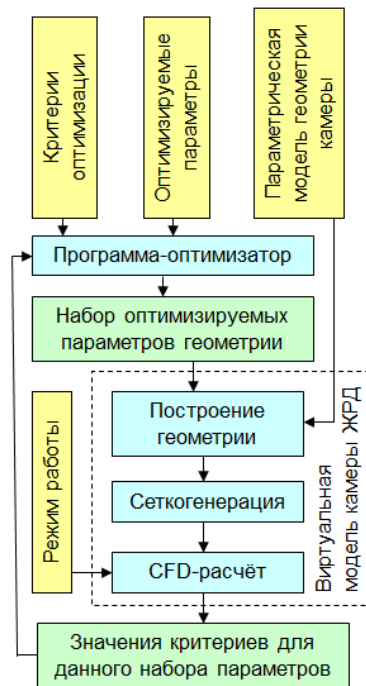


Рис. 2. Схема оптимизации через многократное виртуальное моделирование (на примере CFD-моделирования камеры ЖРД)

Библиографический список

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели: Основы проектирования: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1968. – 396 с.
2. 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.
3. Kuzmenko M. L., Shmotin Yu. N., Egorov I. N., Fedechkin K. S. Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation. Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2007, Vol. 6, pt. A, pp. 425-431. DOI:10.1115/GT2007-28205.
4. 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.
5. Egorov I. N., Kretinin G. V., Leshchenko I. A., Kuptzov S. V. Multi-objective approach for robust design optimization problems. Inverse Problems in Science and Engineering, 2007, 15 (1), pp. 47–59. DOI:10.1080/17415970600573916.
6. Shabliy L. S. and Cherniaev A. V. Optimization of Compressor Blade Geometry for Efficiency and Pressure Ratio Under Strength Constraint. ASME 2014 Gas Turbine India Conference GTINDIA2014-8132, 2014, DOI: 10.1115/GTINDIA2014-8132.