

снизились на 3,5 %, КПД КВД снизился на 3,7 %, степень повышения давления КНД уменьшилась на 2,8 %, степень повышения давления КВД уменьшилась на 1,2 %, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания снизился на 1,54 %, КПД ТНД снизился на 2,94 %, КПД ТВД снизился на 2,3 %, коэффициент скорости сопла снизился на 1,31 %. В связи с изменениями вышеуказанных контролируемых характеристик двигателя, тяга изделия уменьшилась на 2,4 %, при этом удельный расход топлива вырос на 2,73 %. После проведения межресурсного ремонта по результатам идентификации математической модели двигателя значения параметров получились следующие: коэффициент полного давления входного устройства повысился на 1,414 %, КПД КНД увеличился на 4,13 %, КПД КВД увеличился на 3,43 %, степень по-

вышения давления КНД повысилась на 2,69 %, степень повышения давления КВД увеличилась на 1,36%, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания увеличился на 0,84 %, КПД ТНД увеличился на 3,3 %, КПД ТВД увеличился на 2,3 %, коэффициент скорости сопла повысился на 1,31 %. В связи с изменениями вышеуказанных контролируемых характеристик двигателя, тяга изделия выросла на 2,53%, а удельный расход топлива уменьшился на 2,84%.

По результатам проведённых исследований сделан вывод, что с использованием метода параметрической диагностики ТРДДФ по данным стендовых испытаний можно оценить изменение характеристик узлов и тем самым состояние проточной части двигателя и сделать предположение о возможных повреждениях.

УДК 629.7.036.54

## **ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В СОПРЯЖЁННЫХ ЗАДАЧАХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО И НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖРДМТ**

©2018 Н.В. Безменова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### **OBJECT-ORIENTED APPROACH IN THE CONJUGATE PROBLEMS OF THE NONSTATIONARY THERMAL AND STRESSED-STRAINED STATE OF SMALL-THRUST ROCKET ENGINES**

Bezmenova N.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*The author shows the necessity of object-oriented approach for numerical simulation of the nonstationary thermal and stressed-strained state of small-thrust rocket engines, taking into account the features of the work processes.*

В настоящее время постоянное увеличивается число запусков космических аппаратов, расширяется сфера их использования, в связи с чем возрастают и требования по эффективности и надёжности к ракетным двигателям, в том числе и к жидкостным ракетным двигателям малый тяг (ЖРДМТ). Таким образом, разработка численных методов исследования и повышения эффективности и надёжности ЖРДМТ является на сегодняшний день актуальной проблемой. [1 - 9].

Основной сложностью при разработке численных моделей рабочих процессов в ЖРДМТ является их сопряжённый характер. Модели должны включать в себя все основ-

ных рабочие процессы, напрямую влияющие на эффективность и надёжность ЖРДМТ, такие как процессы подачи, распыления, испарения и смешения компонентов топлива, процессы неравновесных химических реакций и тепловыделения в камере сгорания и сопле, процессы течения в соплах и струях ЖРДМТ, процессы переноса тепла от рабочего тела к элементам конструкции ЖРДМТ, процессы теплообмена в элементах конструкции, процессы охлаждения, а также деформации элементов конструкции ЖРДМТ под воздействием силовых и тепловых нагрузок от рабочего тела. Кроме того, рабочие процессы в ЖРДМТ имеют ряд существен-

ных отличии от аналогичный процессов в ЖРД больших тяг. Это связано, в первую очередь, с конструктивными особенностями ЖРДМТ - небольшие размеры, отсутствие регенеративного охлаждения, малое количество топливных форсунок, малые расходы компонентов, а также импульсные режимы работы.

В настоящий момент ведутся активные научные исследования рабочих процессов в ЖРДМТ, в результате которых разработано большое количество математических моделей и численных алгоритмов расчёта. Большое внимание авторы уделяют использованию «нестандартных» математических подходов [1,2,4,10]. Однако практически значимых результатов для ЖРДМТ на сегодняшний день крайне мало.

Предлагается использовать объектно-ориентированный подход для анализа и моделирования сопряжённых рабочих процессов в задачах теплового и напряжённо-деформированного состояния ЖРДМТ. Преимущества данного подхода в том, что он изначально разрабатывался для анализа и моделирования сложных систем, с большим количеством взаимосвязанных элементов. К таким системам относятся и рабочие процессы, отвечающие за формирование теплонапряжённого состояния конструкции ЖРДМТ.

Первым шагом использования объектно-ориентированного подхода является объектно-ориентированный анализ предметной области, в результате которого для рабочих процессов в ЖРДМТ разработана структура классов объектов, различные классы объектов используются для описания рабочих процессов в ЖРДМТ, элементов конструкции ЖРДМТ, а также различных численных схем расчётов. Использование структуры классов позволяет создать эффективные интерфейсы для объединения программных продуктов, реализующих различные математические модели для отдельных рабочих процессов.

Данная структура является гибкой и предполагает использование как уже разработанных моделей для различных конструкций ЖРДМТ и отдельных рабочих процессов, так и создание и добавление новых моделей.

## Библиографический список

1. Короткая О.В. Разработка методики расчёта камеры перспективного ЖРД на основе метода подконструкций. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2017. 204 с.

2. Назырова Р.Р. Термодинамический расчёт параметров продуктов сгорания в камере жидкостного ракетного двигателя на основе вариационных принципов механики. Дис. доктор физ.-мат. наук. Москва, 2017.

3. Строкач Е.А. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя малой тяги с центробежными форсунками. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2017. 144 с.

4. Кретинин А.В. Математическое моделирование и расчёт теплового состояния камер сгорания энергетических установок на основе нейросетевой вычислительной архитектуры. Дис. доктор техн. наук. Воронеж, 2006. 355 с.

5. Воробьев А.Г. Экспериментально-теоретическая модель теплового состояния камеры сгорания двухкомпонентных жидкостных ракетных двигателей малых тяг, работающих на непрерывном режиме. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2010. 164 с.

6. Токарев А.С., Грачев В.Д. Методика расчёта теплового состояния стенки камеры сгорания // Ракетно-космическая техника, вып. 3 (136). НИИ тепловых процессов, 1992 г. 34-39 с.

7. Безменова Н.В. Численное моделирование сопряжённого теплообмена в ЖРД малых тяг в целях повышения их эффективности. Дис. ... канд. техн. наук. Самара: 2001. 242 с.

8. Воробьев А.Г. Математическая модель теплового состояния ЖРДМТ // Вестник МАИ, т.14, 2007, С.42-49.

9. Ворожеева О.А. Моделирование и исследование теплового состояния работающего в импульсном режиме жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 148 с.

10. Безменова Н.В. Объектно-ориентированный подход к численному моделированию рабочих процессов в ЖРДМТ.// Тезисы докладов V Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2004), Самара, 5-10 июля 2004 г.- М.: Вузовская книга. - 2004.