

26 сентября 2019 г.

СЕКЦИЯ №2

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

УДК 621.453/.457

**УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ ПРИ РОБАСТНОМ
ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ
И ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Попков А.Н., Краснодарское высшее военное авиационное
училище летчиков имени. А.К. Серова, г. Борисоглебск
Кретинин А.В. Федий Г.Л., Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
popkov.grop@yandex.ru

Ключевые слова: ракетные двигатели, смесеобразование, охладитель

В настоящее время не прекращаются работы по формированию облика перспективного ракетного двигателя России. При этом для отечественного ракетостроения важную роль играет создание семейства кислородно-керосиновых, кислородно-водородных и кислородно-метановых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [1–4].

Среди перспективных двигателей отечественных двигателестроительных предприятий, в которых целесообразно в дальнейшем использовать полученные результаты, можно отметить: кислородно-керосиновый двигатель повышенной тяги для модернизации РН «Союз-2», семейства РН «Ангара» и др.; однокамерный кислородно-керосиновый ЖРД для РН «Союз-2», «Ангара», «Воздушный старт»; кислородно-керосиновый маршевый двигатель для разгонных блоков средних и тяжелых РН, кислородно-керосиновый ЖРД для РБ РН «Воздушный старт»; кислородно-водородный ЖРД для РБ «Ястреб-С» РН «Онега» [2].

Неопределенности гидравлических характеристик охлаждающих каналов рубашки камеры ЖРД обуславливают изменение параметров распределения по ним охладителя. Роль случайных флуктуаций весьма значительная и подтверждается результатами экспериментальных исследований. Результаты опытной отработки и эксплуатации подтверждают, что уровень

неблагоприятной неравномерности распределения компонента по каналам рубашки и форсункам смесительной головки ЖРД может составлять более 10 %, причем главная причина формирования высокой неравномерности состоит именно в случайных отклонениях геометрии проточной части отдельных смесительных элементов, либо охлаждающих каналов. Кроме того, неравномерность может быть вызвана особенностями организации подвода к отдельным форсункам [3].

Смесительные головки должны обладать стабильными гидравлическими характеристиками, которые вытекают из требований высокой точности изготовления проточной части форсуночной головки и самих смесительных элементов. Вынужденная допускаемая погрешность геометрических координат расположения смесительных элементов составляет $\pm(0,1-0,3)$ мм. Форсунки подвергаются автономным испытаниям, после которых форсунки с погрешностью выше (1–5)% отбраковываются. Повышение класса точности изготовления форсунок для уменьшения допустимого технологического допуска на форсунку приводит к усложнению технологии изготовления и к повышению стоимости и времени изготовления набора форсунок для смесительной головки.

Технологические недоработки приводят к значительной неравномерности распределения компонента по факелу распыла форсунки в процессе испытаний. Это может вызывать резкое местное изменение отклонений соотношения компонентов от номинальных значений. Математическое моделирование и расчет систем смесеобразования и охлаждения ЖРД в настоящее время в подавляющем большинстве случаев основывается на детерминированных алгоритмах, т.е. без учета случайных влияний различных факторов и их сочетаний. Хотя в ряде работ предпринимаются попытки повышения надежности (робастности) проектных расчетов с использованием различных методов оценки случайных воздействий.

Расчетному анализу проблемы расходной неравномерности в системах смесеобразования и охлаждения посвящено ограниченное число работ. В частности, автором представленной работы осуществлено моделирование гидродинамических процессов распределения охладителя по отдельным каналам тракта охлаждения для ее абстрактной конструкции. Компьютерный эксперимент подразумевает CFD- моделирование регенеративной системы охлаждения, в частности, с использованием инструментов ANSYS Workbench.

Рассматривается геометрическая модель рубашки охлаждения, которая представляет совокупность 101 канала длиной 200 мм и площадью поперечного сечения $4,25 \text{ мм}^2$, соединенных тремя отверстиями диаметром 1,75 мм с кольцевыми входным и выходным коллекторами. Входной и выходной штуцеры могут иметь различные углы наклона относительно перпендикуляра к оси симметрии каналов охлаждения.

Проводя постобработку результатов моделирования, получены следующие обобщенные результаты:

- в каналах охлаждающего тракта напротив штуцера подвода получены максимальные расходы, при этом значение расхода в первом канале превышает средние значения по всем каналам более чем в 2 раза. Штуцер подвода оказывает влияние примерно на 10 % всех охлаждающих каналов, таким образом формируя пониженные значения расходов через оставшиеся 90% каналов;

- так как для охлаждения «хуже» низкие расходы через каналы, то, судя по результатам, схема «прямоток» предпочтительнее схемы «противоток»;

- неперпендикулярное исполнение подводящего и отводящего штуцеров обуславливают изменение расходов через каналы на 4–5 %;

- тепловой поток в охлаждающую жидкость повышает расходную неравномерность.

Совокупное влияние большого количества внешних и внутренних факторов на значения расходов охладителя в отдельных каналах и форсунках систем смесеобразования и охлаждения даже для современного уровня развития вычислительной техники не может быть исследовано с достаточной надежностью. Значит, соглашаясь с «неизбежностью» этого явления, т.е. с тем, что оно характерно, пожалуй, для всех ЖРД, и принимая, таким образом, стохастическую модель данного явления, имеет смысл попытаться определить эпистемические неопределенности, обуславливающие большую долю величины критерия неравномерности, которые возможно выявить и попытаться убрать их из генеральной совокупности неопределенностей и, значит, сгладить величину неравномерности распределения расходов компонентов топлива по каналам или форсункам ЖРД и, таким образом, повысить надежность функционирования систем смесеобразования и охлаждения ЖРД.

Список литературы

1. Кретинин А.В., Галдин Д.Н., Спицына Е.Е., Попков А.Н. Расчет неравномерности распределения компонента по охлаждающим каналам камеры жидкостного ракетного двигателя на основе моделирования в ANSYS CFX // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. т. 14. № 3. С. 61–65.
2. Кретинин А.В., Галдин Д.Н., Спицына Е.Е., Попков А.Н. Численное моделирование теплообмена в жидкостных каналах термоэлектрического блока охлаждения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. т. 14. № 3. С. 86–93.
3. Попков А.Н., Кретинин А.В. Повышение надежности системы наружного охлаждения ЖРД с использованием принципов робастного проектирования // Научная опора Воронежской области. Воронеж. 2018. С. 165–167.

4. Кретинин А.В., Попков А.Н. Влияние неопределенностей внешних факторов на функционирование систем смесеобразования и охлаждения ЖРД // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 8 (8). С. 127–139.

УДК 621.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ С ПОРИСТОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ВСТАВКОЙ ДЛЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ряжских В.И., Николенко А.В., Ерин О.Л.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
ryazhskih_vi@mail.ru, Nikolenko.Alexandr.93@yandex.ru

Ключевые слова: теплоноситель, рекуперативный теплообменный аппарат, пористая среда, эффективность теплообмена, ламинарное течение, анизотропия, тензор проницаемости.

В последние годы во многих отраслях техники, в том числе авиационной и ракетно-космической, важной проблемой является создание высокоэффективных теплообменных аппаратов. Одним из таких перспективных способов интенсификации теплообменных процессов является использование в теплообменных устройствах пористых материалов, в основном металлизированного или металлического состава, так как в этом случае достигается наибольшая величина тепловых потоков ввиду сравнительно больших значений коэффициентов теплопроводности металлов [1–5]. В этом случае физической основой интенсификации является высокая интенсивность теплообмена между металлическим каркасом и протекающим сквозь него теплоносителем вследствие большой величины поверхности теплопередачи и условий смешения теплоносителя в межпоровом пространстве.

Основной проблемой при применении пористых теплообменных аппаратов является отсутствие достоверного математического инструментария, описывающего теплофизические процессы. В большинстве случаев при проектировании пористых теплообменных аппаратов с пористой вставкой применяются экспериментальные методы, поэтому необходимо создание адекватной математической модели.