

## **ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СОПЛАХ РДМТ И РАЗГОННЫХ БЛОКОВ**

Безменова Н.В.

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва,  
г. Самара, bezmenovanv@mail.ru

*Ключевые слова: разгонный блок, ракетный двигатель, конвективный теплообмен, турбулентный пограничный слой, продукты сгорания, тепловое состояние.*

В настоящее время постоянно увеличивается число запусков космических аппаратов, расширяется сфера их использования. В связи с этим растет разнообразие используемых двигательных установок (ДУ), расширяются диапазоны тяг, а также растут требования по эффективности и надежности к ракетным двигателям (РД), используемым в данных ДУ. На сегодняшний день большое внимание получает использование разгонных блоков (РБ) с диапазоном тяг используемых двигателей от 1 Н до 100 кН. Таким образом, разработка численных методов исследования и повышения эффективности и надежности РД РБ является на сегодняшний день актуальной проблемой [1-5].

Одним из актуальных вопросов обеспечения экономичности и надёжности современных РД малых и средних тяг является моделирование их теплового состояния.

На сегодняшний день известно сравнительно немного работ, посвящённых исследованию процессов теплообмена и формирования теплового состояния РД РБ [3-5].

Как известно, основным источником тепла, влияющим на формирование теплового состояния элементов конструкции РД РБ, является конвективный теплообмен с высокотемпературными продуктами сгорания.

Основной сложностью при разработке и использовании моделей процессов конвективного теплообмена в РД РБ является их сопряженный характер. Непосредственное влияние на них оказывают рабочие процессы в камере сгорания и сопле: впрыск, испарение и смешение компонентов топлива, химические реакции, термодинамические и газодинамические процессы.

Кроме того, у данных двигателей имеется ряд особенностей, которые требуют дополнительного анализа – небольшие размеры, частичное либо полное отсутствие регенеративного охлаждения, малое количество топливных форсунок, малые расходы компонентов, а также импульсные режимы работы.

Исследуются вопросы особенностей конвективного теплообмена в камерах сгорания и соплах ракетных двигателей в диапазоне тяг, характерных для использования в составе РБ.

Параметры конвективного теплообмена с продуктами сгорания в РД определяются большой совокупностью параметров: химический состав продуктов сгорания, термодинамические свойства, газодинамические параметры течения.

Кроме того, существенное влияние на интенсивность конвективного теплообмена оказывает характер течения в пограничном слое: при переходе от ламинарного к турбулентному течению в пограничном слое интенсивность конвективного теплообмена увеличивается в 5-10 раз. Это означает, что для обеспечения адекватности модели теплового состояния РД РБ, помимо обеспечения адекватности определения параметров конвективного теплообмена для разного характера течения в пограничном слое, существенную роль играет надежное определение характера течения в пограничном слое по всей длине камеры сгорания и сопла.

Кроме неоднократной смены характера течения в пограничном слое, существенное влияние на процесс конвективного теплообмена оказывают процессы формирования низкотемпературного пристенка, который во многих РД является основным фактором тепловой защиты конструкции.

Низкотемпературный пристенок формируется в камере сгорания за счет перераспределения расходов компонентов в периферийных форсунках, и в дальнейшем

модифицируется при течении рабочего тела в сопле. При этом температура продуктов сгорания в пристенке хоть и ниже, чем в высокотемпературном ядре, тем не менее, она может достигать уровня 1000 К и выше. При таких температурах повышается интенсивность химических реакций в продуктах сгорания, изменяются их термодинамические и теплофизические свойства.

Процесс формирования и модификации пристенка при течении продуктов сгорания в сопле является сложной задачей. В пристенке происходят интенсивные термодинамические процессы, которые приводят в итоге к существенному повышению его температуры по длине сопла.

Таким образом, учитывая все перечисленные особенности протеканий процессов теплообмена в РД РБ, весьма актуальным является вопрос разработки и апробации численных моделей конвективного теплообмена, которые учитывали бы вышеуказанные особенности.

Приводится анализ применимости существующих моделей конвективного теплообмена, предлагается приемлемая для использования численная модель конвективного теплообмена для ламинарного и турбулентного, характер течения в пограничном слое РД РБ. Приводятся результаты апробации данной модели.

### **Список литературы**

1. 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.
2. Токарев А.С., Грачев В.Д. Методика расчета теплового состояния стенки камеры сгорания // Ракетно-космическая техника, вып. 3 (136). НИИ тепловых процессов, 1992 г. 34-39 с.
3. Воробьев А.Г. Математическая модель теплового состояния ЖРДМТ // Вестник МАИ, т.14, 2007, с.42-49.
4. 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.
5. Безменова Н.В. Объектно-ориентированный подход в сопряженных задачах нестационарного теплового и напряженно-деформированного состояния ЖРДМТ / Н.В. Безменова // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 12-14 сентября 2018г. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2018 – С. 326-327.

Сведения об авторе

Безменова Наталья Витальевна, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов: численное моделирование рабочих процессов в ЖРДМТ.

## **FEATURES OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE NOZZLES OF LOW-THRUST ROCKET ENGINES AND UPPER STAGES**

Bezmenova N.V.

Samara University, Samara, bezmenovanv@mail.ru

*Keywords: upper stage, rocket engine, convective heat transfer, turbulent boundary layer, combustion products, thermal state.*

The author describes the features of physical processes that affect the parameters of convective heat transfer in the nozzles of low-thrust rocket engines and upper stages, provides approaches to the mathematical modeling of these parameters.