

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](mailto:ryazhskih_vi@mail.ru), [Nikolenko.Alexandr.93@yandex.ru](mailto: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.

В работе [6] представлен новый рекуперативный теплообменный аппарат для жидкостного ракетного двигателя на основе принципа межканальной транспирации теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл. Экспериментально показано, что эффективность теплообмена в тракте с межканальной транспирацией теплоносителя сквозь пористый сетчатый металл при межсеточной фильтрации теплоносителя выше, чем у других теплообменных трактов. Представим математическую модель, которая может быть применена при расчетах теплофизических процессов в данном теплообменном аппарате.

Пористый сетчатый материал является анизотропным материалом. Проницаемость является основным носителем анизотропности пористой среды, которая в данном случае имеет тензорную природу. Учитывая, как правило, что теплоноситель через пористую среду движется в ламинарном режиме, в основу математической модели положены уравнения Дарси-Бринкмана [7]. В стационарном виде уравнения выглядят следующим образом

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0; \quad (1)$$

$$\left( \frac{\bar{V}}{\varepsilon} \right) \cdot \nabla \bar{V} = \frac{\varepsilon}{\rho} \left[ -\nabla P + \frac{\eta}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\bar{V} \cdot \nabla T' = \frac{1}{\rho C_p} \left( \nabla \cdot (\bar{\lambda} \nabla T') \right). \quad (3)$$

где  $\bar{V}$  – вектор скорости,  $P$  – давление жидкости,  $T'$  – температура,  $\varepsilon$  – пористость,  $\rho, \mu, C_p$  – плотность, вязкость, и массовая теплоемкость теплоносителя соответственно.

Проницаемость определяется тензором

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_1 \cos^2 \theta + K_2 \sin^2 \theta & (K_1 - K_2) \sin \theta \cos \theta \\ (K_1 - K_2) \sin \theta \cos \theta & K_2 \cos^2 \theta + K_1 \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – проницаемости по направлениям, которые отличаются на угол  $\theta$  от декартовых осей в случае формулировки задачи с 2D.

Представим вставку из пористо-сетчатого материала [6] в качестве плоского горизонтального канала, тогда декартова система координат примет следующую ориентацию: ось абсцисс перпендикулярна стенкам канала, ось ординат направлена по потоку теплоносителя, тогда система (1) – (3) примет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{U}{\varepsilon^2} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{V}{\varepsilon^2} \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Pr}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] - \\ - \frac{Pr}{Da} \left[ U (\cos^2 \theta + \lambda^* \sin^2 \theta) + V \left( (1 - \lambda^*) \sin \theta \cos \theta \right) \right]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{U}{\varepsilon^2} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{V}{\varepsilon^2} \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Pr}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] - \frac{Pr}{Da} \left[ U \left( (1-\lambda^*) \sin\theta \cos\theta \right) + V \left( \lambda^* \cos^2\theta + \sin^2\theta \right) \right]; \quad (6)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad (7)$$

Полученная модель положена в основу численного определения полей скоростей и температур теплоносителя в пористом анизотропном канале при тепловых условиях второго рода и может быть применена при моделировании теплообменных процессов в теплообменном аппарате с пористой анизотропной вставкой для жидкостного ракетного двигателя.

### Список литературы

1. Ingham D.V., Pop I. Transport phenomena in porous media. V. III. New York: Elsevier, 2005. 467 p.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
3. Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. Теплоотдача в оболочках из пористых сетчатых материалов // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 46–52.
4. Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче в проницаемых оболочках из пористых сетчатых материалов // Теплоэнергетика. 2010. № 6. С. 57–62.
5. Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах // Теплофизика высоких температур. 2010. т. 48. № 3. С. 402–408.
6. Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя // Известия высших учебных заведений. М.: Машиностроение. 2015. № 6 (663). С. 74–81.
7. Abdelraheem M. Aly, Sameh E. Ahmed. An incompressible smoothed particle hydrodynamics method for natural/mixed convection in a non-Darcy anisotropic porous medium // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. V. 77. Pp. 1155–1168.