Численное моделирование пористого охлаждения в соответствии с законом Дарси

Б.Е. Байгалиев,
Д.В. Кошелев

Введение

В настоящей работе рассматривается возможность численного моделирования пористого охлаждения путем замены гомогенного пористого материала из сферических частиц на материал аналогичной пористости в соответствии с законом Дарси [1,2]. В качестве критериев при сравнительной оценке использовались рассчитанные величины эффективности охлаждения и потерь полного давления при прокачивании охлаждающей среды через пористое тело. Численное моделирование выполнено для пористых тел, имеющих объемную пористость равную 0,1104, 0,1609, 0,2110 и 0,2919. Температура набегающего потока (воздуха) со скоростью 300 м/с задавалась во всех случаях равной 1473K, а температура охлаждающей среды (воздуха) — равной 573K. Расчеты выполнены при изменении расхода через пористое тело в диапазоне от 1,1547 до 6,9282 кг/с·м^2, при этом средняя величина статического давления на выходе смешанного потока задавалась равной 0,6 МПа. Полное давление охлаждающей среды на входе в таком случае определялось суммированием фактических потерь напора и полного давления на выходе. Все вычисления выполнены в программе Ansys CFX (версия 14.5).

Анализ расчетной модели исследования

Расчетная модель для исследования теплообмена пористого тела представлена на рис.1. В верхней части рисунка представлена модель из сферических частиц с объемной пористостью 0,2019 для расчета пористого охлаждения с учетом набегающего потока (при других значениях объемной пористости во время выполнения расчетов заменялось только пористое тело). Данная модель состоит из двух частей, первая из которых, представляет собой гомогенные пористые элементы в соответствии с работой [1], вторая — моделирует область набегающего потока. Отдельно на рисунке 1 в нижней его части крупно показаны входной и выходной элементы пористого тела. Дискретизация области набегающего потока выполнена тетраидальными элементами, для расчета течения набегающего потока в пристенной области использовано 20 слоев призматических элементов суммарной толщиной 0,5 мм, модель турбулентности — SST [2]. В данном случае периодическое продолжение модели подразумевалось в направлении «x», передняя, задняя поверхность пористой зоны, а также нижняя часть области набегающего потока моделировались адиабатическими стенками. Для случая с моделью Дарси, габаритные размеры модели были те же, только вместо пористой части из сферических частиц был вставлен параллелепипед из пористого материала с соответствующими коэффициентами α и β [1]. Верхняя плоскость зоны набегающего потока соответствовала плоскости симметрии.

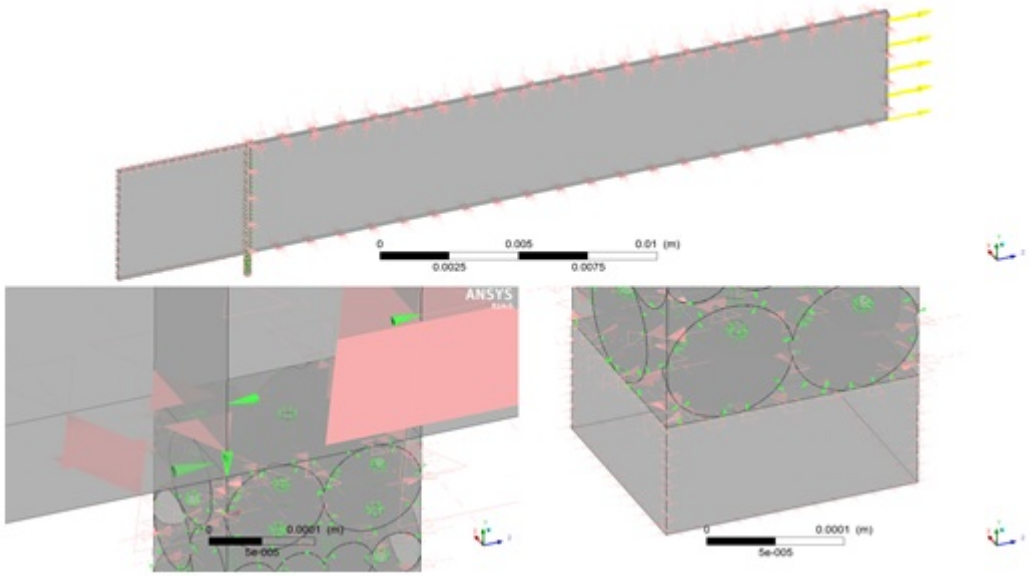


Рис. 1. Расчетная модель для исследования теплообмена пористого тела из сферических частиц с объемной пористостью 0,2919. Верхняя часть рисунка — полная модель, левая нижняя часть рисунка — место выхода охлаждающей среды в набегающий поток, нижняя правая часть рисунка — зона входа охлаждающей среды.

Линии, использованные для анализа эффективности охлаждения, показаны на рис. 2. Линией голубого цвета обозначено распределение температуры в матрице, а линией красного цвета — в охлаждающем потоке пористого тела. Данные линии попеременно пересекают зоны потока охлаждающей среды и матрицы, однако при построении графических зависимостей с целью упрощения они выполнены в виде непрерывных линий (т.е. на рисунках не показаны места перехода из одной зоны в другую).

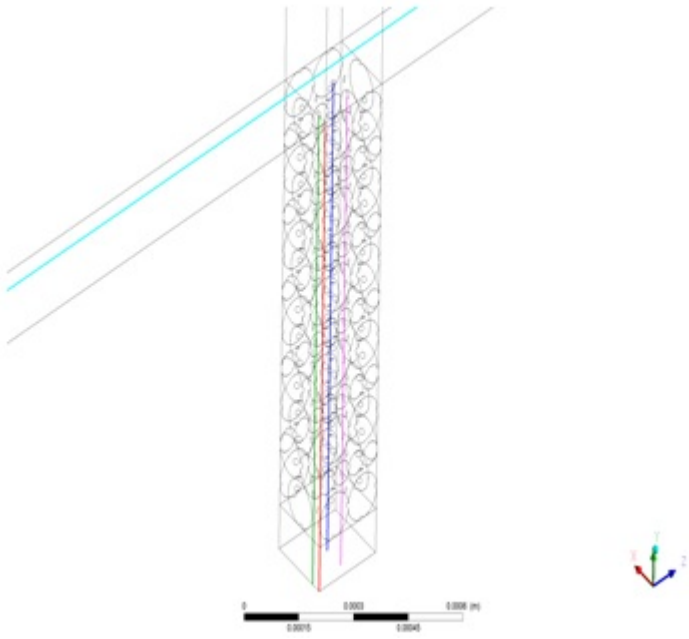


Рис. 2. Линии, использованные при анализе эффективности охлаждения и распределения температур в матрице и охлаждающей среде пористого тела

При этом для анализа эффективности охлаждения и распределения температуры в потоке охлаждающей среды для пористых тел, состоящих из сферических частиц и в соответствии с гомогенной моделью Дарси, использовалась одна и те же линия. Оценка эффективности охлаждения выполнена на основании значений полной температуры, а для оценки охлаждения

матрицы применялась ее термодинамическая температура.

Эффективность охлаждения вычислялась в соответствии с общепринятыми зависимостями [3]

$$\theta(\bar{z}) = (T_{наб.}(\bar{z}) - T_{слоя}(\bar{z}))/(T_{наб.}(\bar{z}) - T_{в.вх}(\bar{z})) \quad (1)$$

где $\bar{z}$ — относительная координата движения набегающего потока;

$T_{наб.}(\bar{z})$ — полная температура набегающего потока, 1473K;

$T_{слоя}(\bar{z})$ — текущее значение полной температуры слоя смешения охлаждающей среды и набегающего потока поверхности, K;

$T_{в.вх}(\bar{z})$ — полная температура охлаждающего воздуха на входе в пористый элемент, 573K.

Результаты исследования

На рис.3 и 4 приведено распределение эффективности охлаждения в слое смешения (область Interface) набегающего потока (непосредственно у поверхности пористого тела) и охлаждающей среды при изменении ее расхода на выходе из пористых тел различной объемной пористости, состоящих из сферических частиц и гомогенной моделью Дарси.

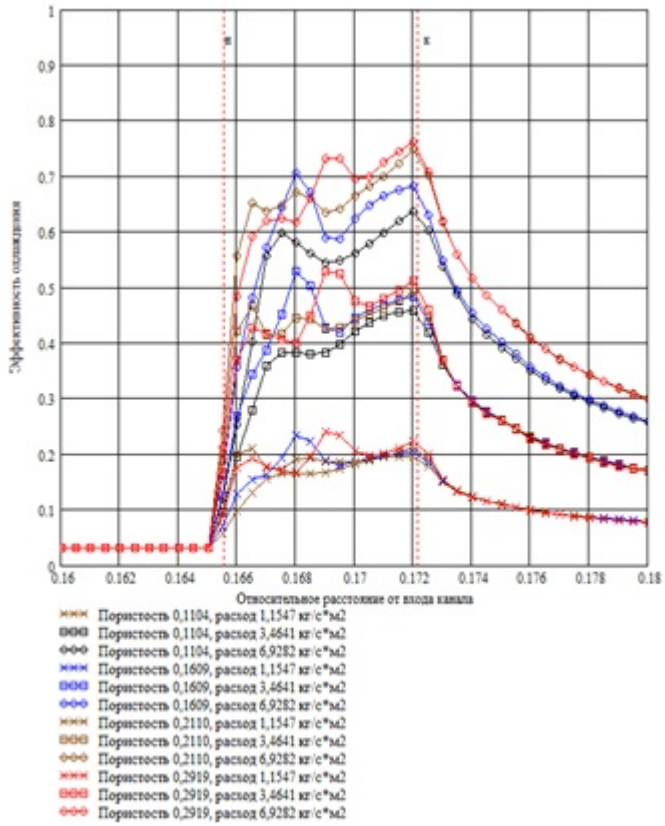


Рис. 3. Распределение эффективности охлаждения пористой вставки из различных сферических частиц в направлении от входа к выходу набегающего потока.

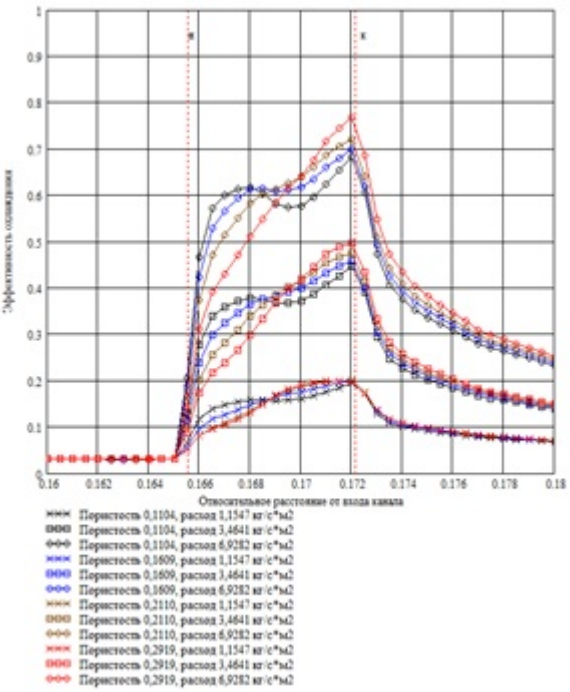


Рис. 4. Распределение эффективности охлаждения пористой вставки различной объемной пористостью в соответствии с моделью Дарси в направлении от входа к выходу набегающего потока.

Вывод

Таким образом, на основании приведенных данных можно были сделаны следующие выводы:

1. Оценку эффективности пористого охлаждения реальных пористых тел с некоторым ее занижением можно выполнять, используя модель Дарси.

2. Для достоверного получения других характеристик пористого охлаждения необходимо использовать моделирование фактической геометрии пористого тела.

Список литературы

1. Байгалиев Б.Е., Тумаков А.Г. Калмыков П.Э., Разработка перспективных лопаток гибридного двигателя для воздушно-космического самолета // Материалы докладов 48 научных чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники». РАН. РАКЦ. (г. Калуга, 17-20 сентября 2013 г.). Калуга: Изд-во «Эйдос», 2013. С. 90-91.
2. Байгалиев Б.Е., Тумаков А.Г. Разработка перспективных лопаток гибридного двигателя для воздушно-космического самолета// Труды 47 чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники». РАН. РАКЦ. (г. Калуга, 18-20 сентября 2012 г.). Казань: Изд-во «Центр оперативной печати», 2013.С.45-66.
3. Байгалиев Б.Е., Калмыков П.Э., Тумаков А.Г. Влияние вязкостной диссипации водорода и кислорода на температурное состояние пористой пластины. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4-2. С. 733-736.