

УДК 621.438

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА ДАРСИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКАХ ЛОПАТОК ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО САМОЛЁТА

© 2014 Б.Е. Байгалиев<sup>1</sup>, А.Г. Тумаков<sup>2</sup>, Е.А. Тумаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет

имени А.Н. Туполева – КАИ

<sup>2</sup> «Энергомаш (Волгодонск) – Атоммаш»

Рассматриваются два метода моделирования пористого материала. На первом этапе расчётным путём получены расходные характеристики и, соответственно, вязкостные и инерционные коэффициенты для моделей пористых материалов, состоящих из сферических частиц. На основании этих данных выполнена оценка соответствия расходных характеристик для моделей пористых материалов, состоящей из сферических частиц произвольной засыпки и точно такой же по геометрическим размерам модели течения в соответствии с законом Дарси. Полученные данные были использованы для оценки диссипации энергии вследствие вязкостного трения при течении среды через пористое тело. В результате работы были сделаны следующие выводы. Во-первых, при отсутствии сведений о вязкостном и инерционном коэффициентах, определяющих расходную характеристику, данные коэффициенты с достаточной точностью можно получить расчётным путём в среде Ansys CFX для периодического фрагмента пористого тела. Во-вторых, наблюдается удовлетворительное согласование расходных характеристик для пористости  $\gamma \geq 0,1601$ , полученных в среде Ansys CFX для периодических фрагментов пористых тел и модели течения в соответствии с законом Дарси.

*Пористость, диссипация энергии, теплоноситель, закон Дарси, лопатки.*

В настоящее время одной из проблем создания воздушно-космического самолёта является разработка новых лопаток двигателя, способных переносить большие тепловые нагрузки в земных и космических условиях. В охлаждаемых лопатках высокотемпературных газовых турбин используется заградительное воздушное охлаждение, которое осуществляется вдувом относительно холодного воздуха на наружную поверхность профиля лопатки через отверстия или щели в стенке лопатки («плёночное охлаждение»), а также изготовлением её из пористого (пористого) материала («пористое охлаждение»). Варианты выполнения плёночного охлаждения лопаток возможны, когда оболочка целиком [1 - 4] или отдельные её части изготавливаются в виде навитой проволоки или сплетённых сеток, — так называемый материал «металлорезина». Поиск способов охлаждения лопаток газотурбинных установок привёл к идее изготовления их целиком из пористого материала. Охлаждаемая лопатка, содержащая полости для прохода охлаждающей среды, может быть полностью отформована

из пористого материала, проволочные переплетения которого образованы упруго-пористым нетканым материалом «металлорезина», изготовленным по любой известной технологии. Оценка эффективности охлаждения лопатки, полностью выполненной из пористого материала, в настоящей работе осуществлена численным моделированием такого способа её охлаждения. Численное моделирование основано на решении системы уравнений Навье-Стокса для модели турбулентной вязкости Eddy Viscosity Transport Equation, в которой модель пористости является одновременно обобщением уравнений Навье-Стокса и закона Дарси, используемого для потоков в пористой среде.

### Численное моделирование пористого охлаждения

В качестве элемента поверхности при организации пористого охлаждения используются структуры из системы трубок произвольного поперечного сечения, из волокон, сеток, слоёв одинаковых сфер, слоёв проволочных переплетений, «металлорезина» [1]. За

исключением нетканого материала «металлорезина», который представляет собой случайным образом переплетённые проволоочки, названные пористые структуры образованы периодическими элементами поверхности. Известно, что эффективность пористого охлаждения в значительной степени определяется расходной характеристикой (гидравлическим сопротивлением) применяемого материала, которая в свою очередь зависит от пористости, степени её равномерности, диаметра проволоочек или диаметра сферических частиц. Для определения потерь давления при ламинарном и турбулентном режимах течения охлаждающей среды в порах согласно [1] используется следующая зависимость

$$\rho_{жс} \cdot (p_{вх} - p_{вых}) / l = \alpha \cdot \mu \cdot j + \beta \cdot j^2,$$

где  $\rho_{жс}$  - среднее значение плотности охлаждающей среды, кг/м<sup>3</sup>;

$p_{вх}$  - давление на входе в пористый участок, Па;

$p_{вых}$  - давление на выходе из пористого участка, Па;

$j = \rho_{жс} \cdot U$  - массовый расход через единицу площади пористого материала, кг/с·м<sup>2</sup>;

$U$  - скорость фильтрации, м/с;

$\mu$  - динамическая вязкость охлаждающей среды, Па·с;

$l$  - толщина (длина) пористого материала в направлении фильтрации, м;

$\alpha$  - вязкостный коэффициент пористого материала, 1/м<sup>2</sup>;

$\beta$  - инерционный коэффициент пористого материала, 1/м.

В этой связи большой практический интерес представляют способы расчётной оценки вязкостного  $\alpha$  и инерционного  $\beta$  коэффициента пористого материала.

Моделирование характеристик пористого материала может быть реализовано двумя способами. Первый из них предполагает полное геометрическое моделирование элемента периодической структуры пористой поверхности, второй - использование модели течения в

соответствии с законом Дарси, которая имеется в большинстве расчётных программ по гидродинамике, например Ansys CFX [2]. Очевидно, что при моделировании пористой структуры по первому способу требуется выполнить её дискретизацию большим количеством мелких элементов. В этом случае качество дискретизации определяется наличием значительных мощностей вычислительной техники и, в большинстве случаев, не позволяет решить задачу в исходной геометрической постановке. Применение модели течения в соответствии с законом Дарси позволяет обойти это препятствие. Рассмотрению особенностей моделирования пористого материала для этих двух случаев посвящена настоящая работа. На первом этапе расчётным путем были получены расходные характеристики и, соответственно, вязкостные и инерционные коэффициенты для моделей пористых материалов, состоящих из сферических частиц. На основании этих данных была выполнена оценка соответствия расходных характеристик для моделей пористых материалов, состоящих из сферических частиц произвольной засыпки и точно такой же по геометрическим размерам модели течения в соответствии с законом Дарси. Полученные таким образом данные затем были использованы для оценки диссипации энергии вследствие вязкостного трения при течении среды через пористое тело.

Рассмотрены пористые материалы, образованные сферическими частицами диаметром от 0,1010 до 0,1121 мм и имеющие различную объёмную пористость, изменяющуюся в диапазоне  $\gamma = 0,2919 - 0,1121$ . Для устранения особенностей в точках контакта сферических частиц при дискретизации расчётной области с пористостью  $\gamma = 0,2919$  они имели минимальные диаметры 0,1010 мм, а уменьшение пористости материала до  $\gamma = 0,1121$  достигалось увеличением диаметра сферических частиц до 0,1121 мм и, соответственно, их

взаимного пересечения при неизменных расположениях центров сфер в пространстве. На рис. 1 в качестве примера приведены фрагменты матриц и областей течения охлаждающей среды моделей из сферических частиц. Совместным периодическим продолже-

нием вышеупомянутых матриц и областей течения по направлениям «x» и «z» можно получить бесконечные пористые структуры при  $\gamma = 0,1104$  и  $\gamma = 0,2919$ , причём размер моделей в плане составляет  $0,1732 \times 0,2$  мм.

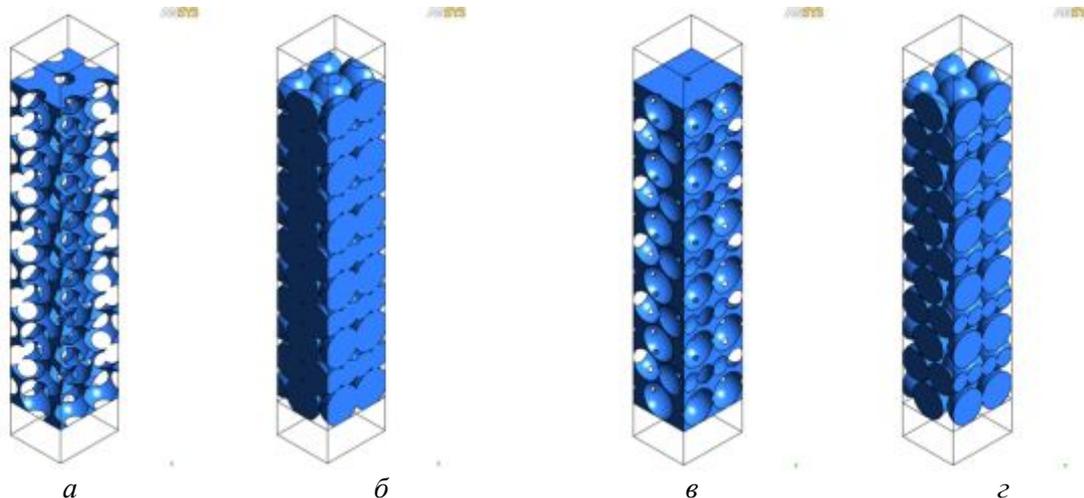


Рис. 1. Модели периодических элементов пористых тел из сферических частиц различной пористости:  $\gamma = 0,1104$ (а,б);  $\gamma = 0,2919$ (в,г); а, в – матрицы; б, г – области течения среды

Расчётная модель пористого материала из сферических частиц пористостью  $\gamma = 0,2919$  представлена на рис. 2 а). Для других значений пористости модели отличались только количеством элементов в пористой области течения среды и матрицы. Для реализации расчёта средствами Ansys CFX во всех случаях до и после пористого элемента были добавлены участки длиной 0,1мм (общая длина модели равна 1,166 мм). Дискретизация расчётной области течения среды в пористой части выполнена тетраидальными элементами с максимальным размером ребра 0,005 мм, а матрицы – 0,01 мм. Дискретизация участков входа и выхода среды выполнена 50 слоями призматических элементов с максимальным размером ребра 0,01 мм. Расчёты выполнены для модели потока Total Energy с использованием модели турбулентности Shear Stress Transport (SST) [2]. Граничные условия представляют собой условия периодического продолжения (симметрии) в направлениях «x» и «z».

Модели для расчётов течений в соответствии с законом Дарси в гомогенной постановке при различных величинах объёмной пористости представляли собой параллелепипеды, соответствующие наружному контуру модели со сферическими частицами (рис. 2 б).

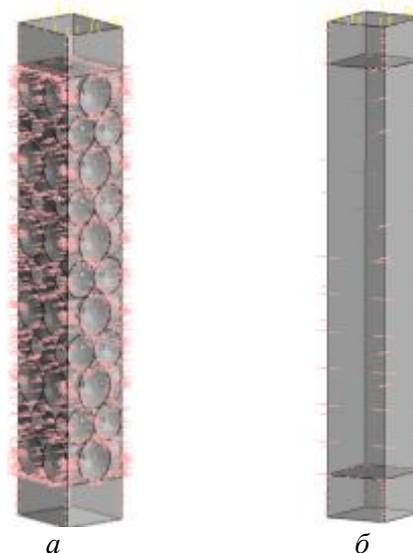


Рис. 2. Расчётные модели пористого материала: а - образованного сферическими элементами диаметром 0,1010 мм, пористость  $\gamma = 0,2919$ ; б – модель течения Дарси [2]

Расчёты расходных характеристик для моделей из сферических частиц, имеющих пористость  $\gamma = 0,1104; 0,1609; 0,2110; 0,2919$ , были выполнены при массовых расходах воздуха через единицу поверхности пористого материала, равных  $j = 1,1547; 2,3094; 3,4641; 4,6188$  кг/с·м<sup>2</sup> (рис. 3) при постоянной температуре на входе 300°С. На основании полученных расходных характеристик затем по

методике [1] были вычислены вязкостный (рис. 4) и инерционный (рис. 5) коэффициенты в зависимости от изменения объёмной пористости. На этих же рисунках для сравнения приведены аналогичные зависимости для вязкостного и инерционного коэффициентов, вычисленных для тела из сферических частиц по формулам [1].

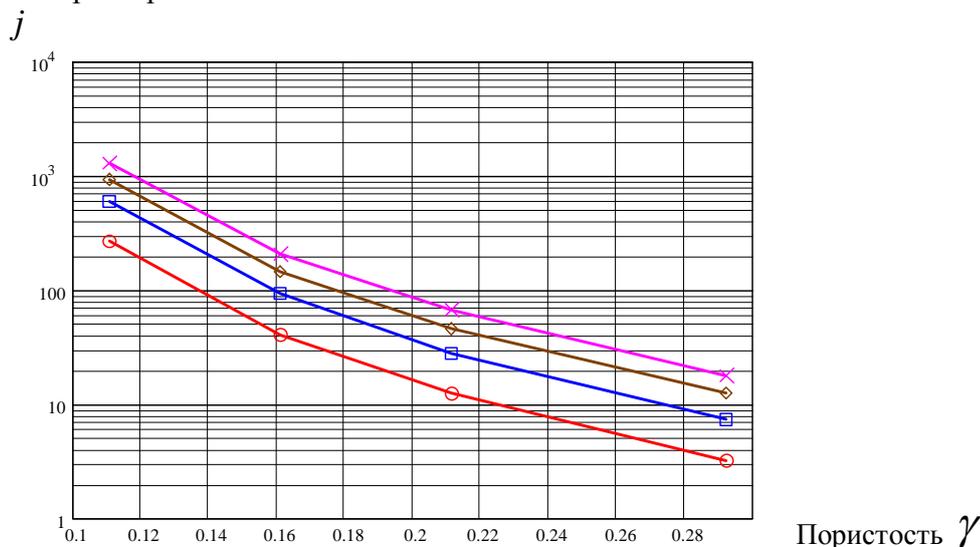


Рис. 3. Расходные характеристики моделей, образованных сферическими частицами, при различных величинах пористости и удельного расхода среды

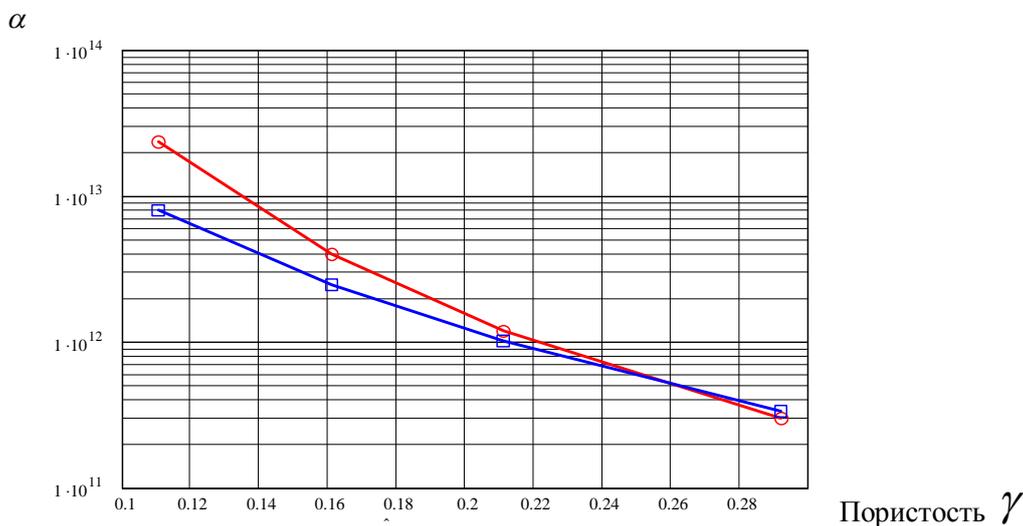


Рис. 4. Зависимости вязкостных коэффициентов от объёмной пористости моделей, образованных сферическими элементами

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, наблюдается удовлетворительное согласование результатов, полученных расчётом в среде Ansys CFX и по формулам работы [1] для идеальных сфер. При этом деформация

сферических частиц при построении моделей в среде Ansys CFX (рис. 1) практически не отражается на величинах вязкостного и инерционного коэффициентов.

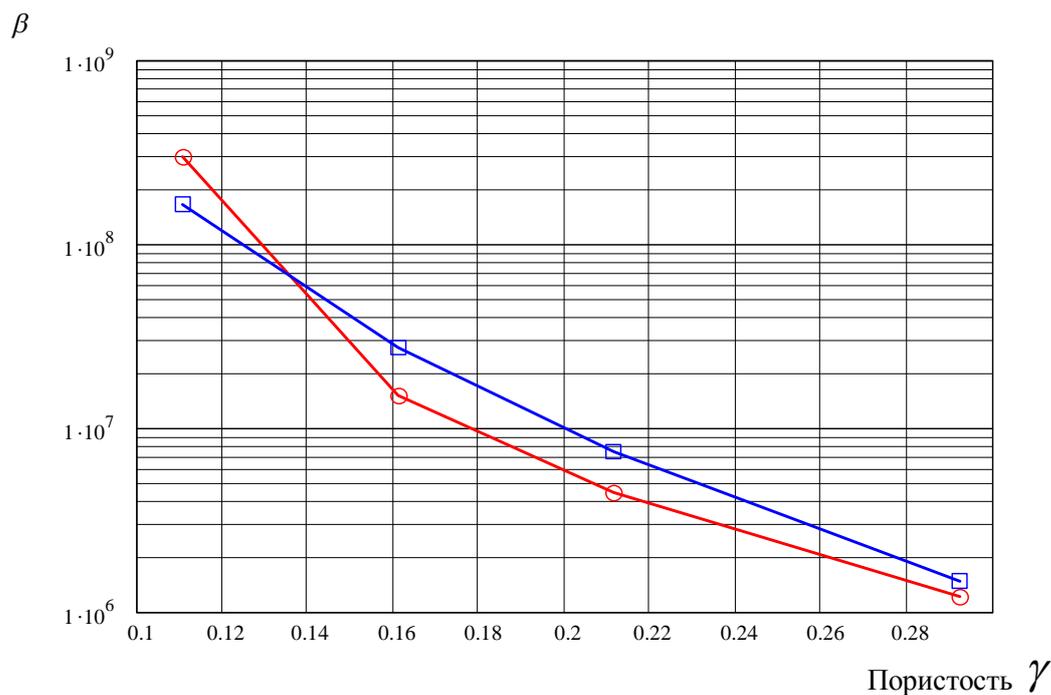


Рис. 5. Зависимости инерционных коэффициентов от объёмной пористости моделей, образованных сферическими элементами

На рис. 6 приведены относительные величины изменения потерь давления в зависимости от объёмной пористости

$$\delta = \frac{\Delta p_{\text{Дарси}}}{\Delta p_{\text{сф}}},$$

где  $\Delta p_{\text{сф}}$  - потери давления, вычисленные в среде Ansys CFX, для моделей, образованных сферическими частицами

(рис. 2а), Па;

$\Delta p_{\text{Дарси}}$  - потери давления, вычисленные в среде Ansys CFX, для модели течения в соответствии с законом Дарси [2] (рис. 2б), Па.

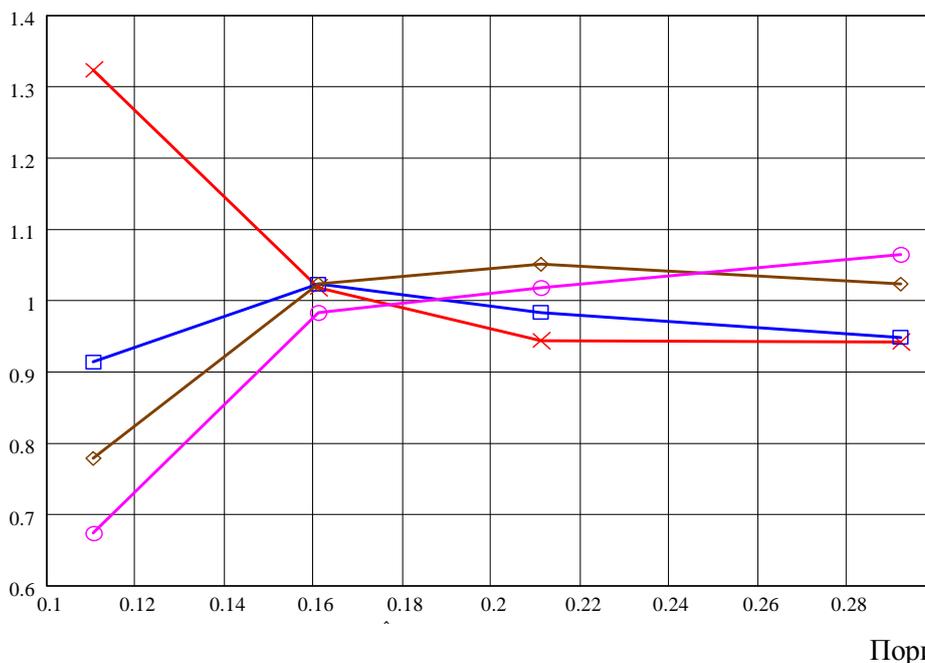


Рис. 6. Относительные величины изменения давления  $\delta$  в зависимости от объёмной пористости модели из сферических частиц и модели течения в соответствии с законом Дарси [2]

Как видно из рис. 6, потери давления, вычисленные в среде Ansys CFX для модели из сферических частиц и модели течения в соответствии с законом Дарси, согласно [2], удовлетворительно согласуются между собой при объемной пористости  $\gamma \geq 0,1601$ .

В данной работе предпринята попытка оценки диссипации энергии вследствие вязкого трения и преобразования её в тепло, выражающаяся в

изменении температуры среды при её прохождении через пористое тело. Для этой цели в моделях, образованных сферическими частицами, были выбраны 4 линии, соответствующие возможным траекториям течения среды в пористом теле. Данные линии приведены на рис. 7 и представляют собой траектории течения среды, которые могут прерываться материалом матрицы.

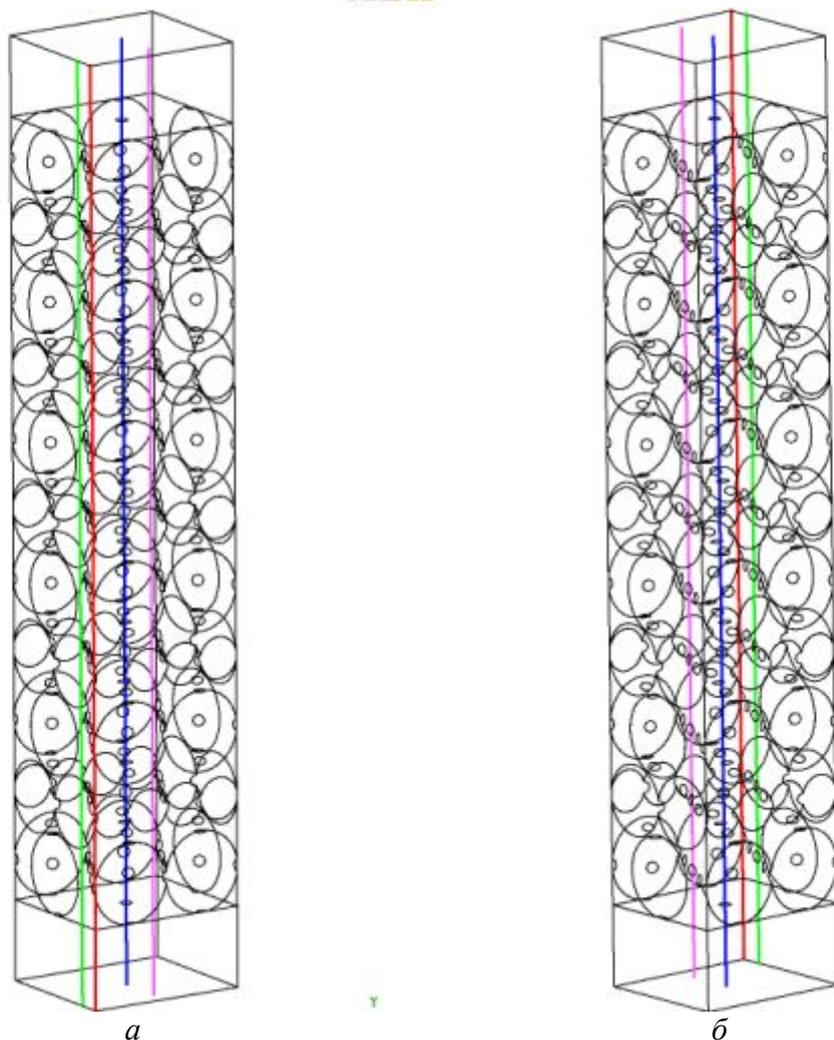


Рис. 7. Цветные линии в объёме пористого тела приняты для оценки диссипации энергии (модели в положениях а) и б) отличаются поворотом на 180° относительно оси Y)

При построении зависимостей, представленных на рис. 8 и 9, характеризующих диссипацию энергии вследствие вязкого трения, относительная полная температура вычислялась по формуле

$$\delta T = \frac{T}{T_{\text{вх}}}$$

где  $T$  - текущее значение полной температуры среды по длине модели пористого тела, К;

$T_{\text{вх}}=300\text{К}$  - полная температура среды на входе в модель пористого тела.

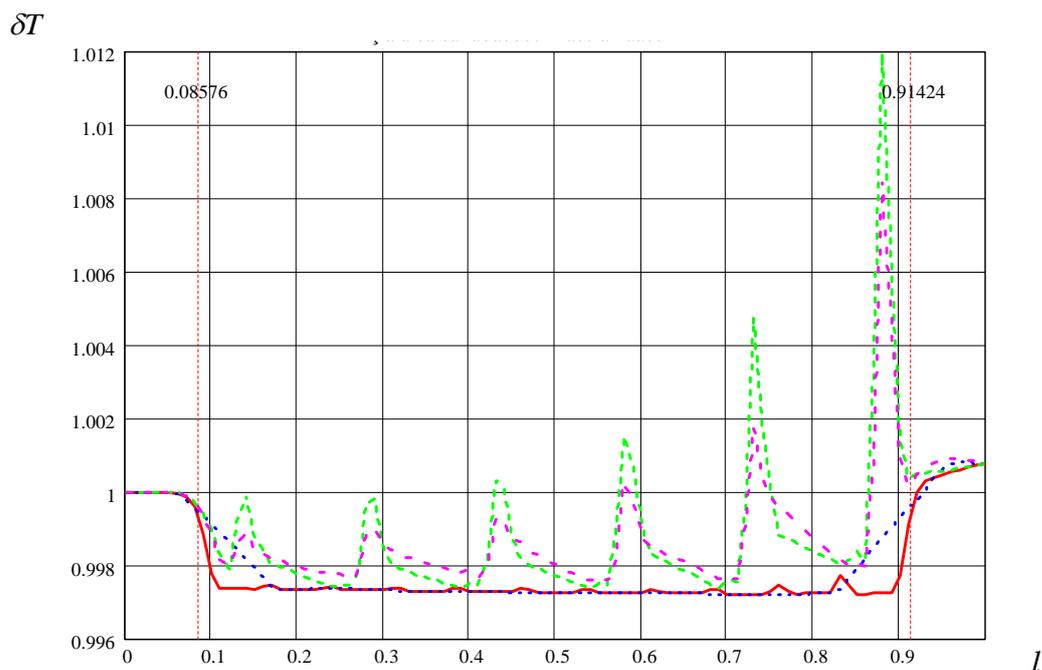


Рис. 8. Распределение относительной полной температуры  $\Delta T$  по длине модели пористого тела, образованного сферическими частицами диаметром 0,1121мм и пористостью  $\gamma = 0,1104$  при расходе  $j = 4,6188 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$

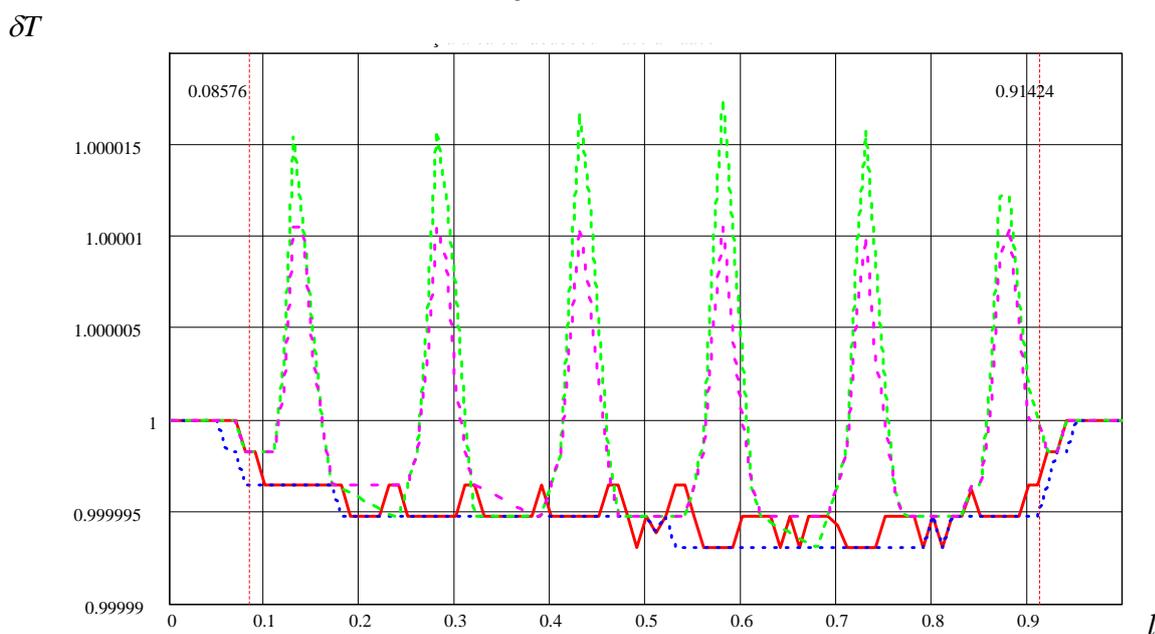


Рис. 9. Распределение относительной полной температуры  $\Delta T$  по длине модели пористого тела, образованного сферическими частицами диаметром 0,1010 мм и пористостью  $\gamma = 0,2919$  при расходе  $j = 1,1547 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$

На рис. 8 и 9 вертикальные линии с координатами относительных длин модели, равных 0,08576 мм и 0,91424 мм, обозначают соответственно положение начала пористой части модели на входе и конца – на выходе.

Как видно из рис.8 и 9, изменение полной температуры среды при прохождении

через пористое тело вызвано ускорением и замедлением движения потока. Интегральная величина диссипации энергии, выражающаяся в незначительном увеличении относительной полной температуры на выходе, наблюдается во всех расчётных случаях при уменьшении пористости и увеличении

расхода среды. Наибольшее изменение относительной полной температуры получено для расчётного случая, когда модель имеет пористость  $\gamma = 0,1104$  при расходе  $j = 4,6188 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ .

На рис. 10 приведены изменения относительной полной температуры в зависимости от объёмной пористости и вычисленной по формуле

$$\delta T_{\text{вых}} = \frac{T_{\text{вых}}}{T_{\text{вх}}},$$

где  $T_{\text{вх}}$  - значение полной температуры

$\delta T$

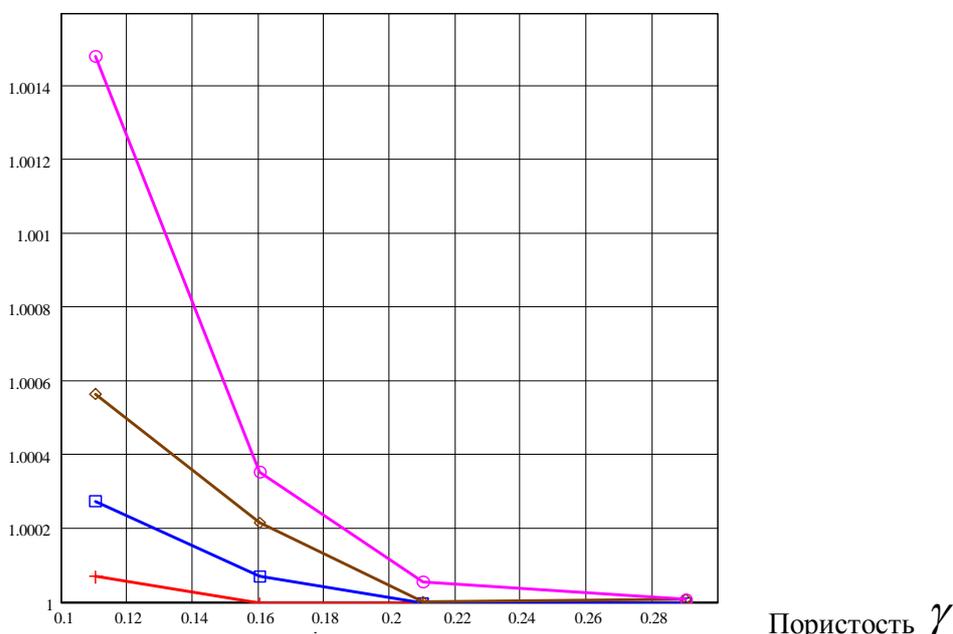


Рис. 10. Зависимости относительных температур на выходе из модели пористого тела в зависимости от объёмной пористости при различных расходах среды

Полученные численными методами результаты моделирования пористого охлаждения позволяют сделать следующие выводы:

1. При отсутствии сведений о вязкостном и инерционном коэффициентах, определяющих расходную характеристику, данные коэффициенты с достаточной точностью можно получить расчётным путём в среде Ansys CFX для периодического фрагмента пористого тела.

2. Наблюдается удовлетворительное согласование расходных характеристик для пористости  $\gamma \geq 0,1601$ , полученных в

среде на выходе из модели пористого тела, К.

Данные, представленные на рис. 8-10, свидетельствуют о наличии диссипации энергии вследствие вязкого трения, однако её величина незначительна и в расчётах может не учитываться. Полученный результат также соответствует модели течения согласно закону Дарси [2], причём в этом случае расчётным путём не удалось оценить величину изменения относительной полной температуры по длине модели вследствие её малости.

среде Ansys CFX для периодических фрагментов пористых тел и модели течения в соответствии с законом Дарси.

3. Величины вязкостного и инерционного коэффициентов, полученные расчётом в среде Ansys CFX, удовлетворительно согласуются с аналогичными величинами, вычисляемыми по формулам работы [2], для пористых тел, образованных сферическими частицами.

4. Диссипация энергии, вследствие вязкого трения при движении среды через пористое тело, незначительна и может не учитываться.

### Библиографический список

1. Пористые проницаемые материалы: Справочник / под ред. С.В. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
2. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Basic Solver Capability Theory. Governing Equations. Flow in Porous Media. Turbulence and Wall Function Theory. Eddy Viscosity Turbulence Models.
3. Байгалиев Б.Е., Тумаков А.Г., Кравцов А.В. Охлаждаемая лопатка. Патент на изобретение РФ № 2502875; опубл. 27.12.2013; бюл. №36.
4. 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». Казань: Центр оперативной печати, 2013. С. 45-66.

### Информация об авторах

**Байгалиев Борис Ергазович**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н.Туполева – КАИ. E-mail: [baigaliev@rambler.ru](mailto:baigaliev@rambler.ru). Область научных интересов: теплофизика, тепловые двигатели.

**Тумаков Алексей Григорьевич**, кандидат технических наук, ведущий инженер по расчётам Отдела главного конструктора, Волгодонский филиал ЗАО

Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии». E-mail: [tumakov\\_ag@atommash.ru](mailto:tumakov_ag@atommash.ru). Область научных интересов: авиационные и ракетные двигатели.

**Тумаков Евгений Алексеевич**, аспирант кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н.Туполева – КАИ. E-mail: [tumakov\\_ag@atommash.ru](mailto:tumakov_ag@atommash.ru). Область научных интересов: теплофизика, тепловые двигатели, теплофизика.

## PECULIARITIES OF APPLYING DARCY'S LAW IN RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HYBRID ENGINE BLADES FOR AN ADVANCED AEROSPACE PLANE

© 2014 B.E. Baigaliev<sup>1</sup>, A.G. Tumakov<sup>2</sup>, E.A. Tumakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Technical University named after AN Tupolev – KAI,  
Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>«Energomash (Volgodonsk) – Atommash», Volgodonsk, Russian Federation

This work is devoted to the two methods of modeling porous material. Flow characteristics and, accordingly, the viscous and inertial coefficients for the models of porous materials consisting of spherical particles were obtained by calculation. On the basis of these data conformity assessment of flow characteristics for models of porous materials consisting of spherical particles of arbitrary filling and exactly the same on the geometrical dimensions of the flow model in accordance with Darcy's law was carried out. The data thus obtained were then used to estimate the energy dissipation due to viscous friction in the flow of fluid through the porous body. As a result reached the following conclusions. Firstly, in the absence of information about the viscous and inertial factors that determine the performance curve, data rates with sufficient accuracy can be obtained by calculation in the medium Ansys CFX for periodic fragment of the porous body. Secondly, there is a

satisfactory agreement between flow performance for porosity  $\gamma \geq 0,1601$  obtained in the medium Ansys CFX for periodic fragments of porous bodies and flow model in accordance with Darcy's law.

*Porosity, energy dissipation, thermal fluid, Darcy's law, the blades of turbomachine.*

### References

1. Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnik [Porous permeable materials: Ref. book / ed. by S.V. Belov]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1987. 335 p.
2. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Basic Solver Capability Theory. Governing Equations. Flow in Porous Media. Turbulence and Wall Function Theory. Eddy Viscosity Turbulence Models
3. Baygaliev B.E., Tumakov A.G., Kravtsov A.V. Okhlazhdaemaya lopatka [Cooled blade]. Patent RF, no. 2502875, 2013. (Publ. 12.27.2013, bull. no. 36)
4. Baygaliev B.E., Tumakov A.G. Development of advanced hybrid engine blades for aerospace plane // Proceedings of the 47 readings in the scientific heritage and development of ideas K.E. Tsiolkovsky. Section number 2: "Problems of rocket and space technology." RAS. Kazan: Tsentr operativnoy pechati Publ., 2013. P. 45-66. (In. Russ.)

### About the authors

**Baygaliev Boris Ergazovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Thermal Engineering and Energy Engineering, Kazan State Technical University named after AN Tupolev – KAI. E-mail: baigaliev@rambler.ru. Area of Research: thermal physics, heat engines.

**Tumakov Aleksey Grigorievich**, Candidate of Science (Engineering), Chief engineer for the calculations of the Chief Designer Volgodonsk branch JSC

Engineering Company "AEM technology». E-mail: tumakov\_ag@atomash.ru. Area of Research: aviation and rocket engines.

**Tumakov Evgeniy Alekseevich**, postgraduate student of Thermal Engineering and Energy Engineering, Kazan State Technical University named after AN Tupolev – KAI. E-mail: tumakov\_ag@atomash.ru. Area of Research: thermal physics, heat engines, thermal physics.