

Эволюция внутренней конвекции в системе слоёв воздуха и волокнистой тепловыделяющей пористой среды с изменением перепада температур на внешних границах

Колчанов Н.В., Колчанова Е.А., Сидоров А.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

В работе демонстрируются результаты эксперимента, в рамках которого исследовалось влияние на порог возникновения и структуру внутренней конвекции в двухслойной системе, состоящей из следующих слоёв: верхнего слоя воздуха и нижнего слоя волокнистой тепловыделяющей пористой среды. Образец пористой среды состоял из фотополимерного 3D-каркаса и тепловыделяющих волокон. Объёмная доля пор в образце составляла 80% от общего объёма образца. Тепловыделение в пористой среде генерировалось джоулевым разогревом при пропускании электрического тока по проводящей сердцевине волокон. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Возникновение конвекции регистрировалось при помощи тепловизора по искажению поля температуры на поверхности пористого образца. Контроль температуры верхней границы с прозрачным для инфракрасного излучения стеклом из ZnSe осуществлялся при помощи специальной системы термостатирования и одного из двух жидкостных криотермостатов. Второй криостат поддерживал температуру нижней медной границы системы.

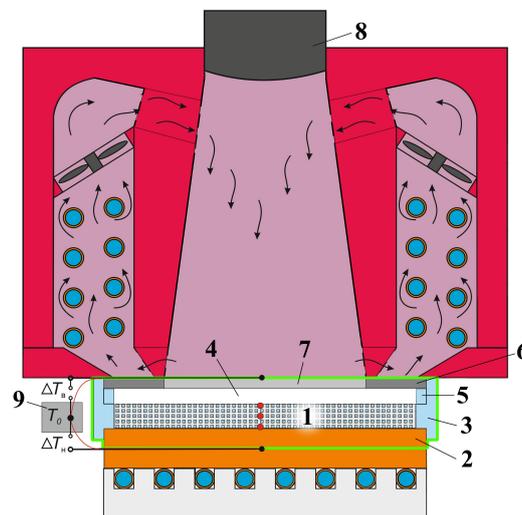


Рис. 1: Сечение экспериментальной установки для измерения поля температуры на поверхности пористой среды: 1 – слой волокнистой тепловыделяющей пористой среды; 2 – медная квадратная пластина, являющаяся нижней границей полости; 3 – боковое пространство, заполненное ватой; 4 – прослойка воздуха; 5 – угловая вставка для установки толщина воздушной прослойки 4; 6 – пластина из нержавеющей стали (AISI 304), являющаяся верхней границей полости; 7 – круглое стекло из селенида цинка (ZnSe); 8 – объектив тепловизора; 9 – совокупность дифференциальных медь-константановых термопар для измерения температур в различных точках внутри экспериментальной установки. Светло-зелёный контур выделяет рабочую полость с двухслойной системой.

Результаты эксперимента сравнивались с результатами численного моделирования. Численная модель Дарси в приближении Буссинеска [1, 2] содержала два безразмерных управляющих параметра, вычисляемых по следующим формулам:

$$Ra_I = g \left(\frac{\beta \rho c_p}{\nu} \right)_{air} \frac{Q K h_{pm}^3}{2 \kappa_{pm}^2}, \quad (1)$$

$$Ra_E = g \left(\frac{\beta \rho c_p}{\nu} \right)_{air} \frac{\Delta T K h_{pm}}{\kappa_{pm}}, \quad (2)$$

Здесь Ra_I и Ra_E – соответственно внутреннее и внешнее числа Рэлея; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воздуха; β – температурный коэффициент объемного расширения воздуха; c_p – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении; ν – кинематическая вязкость воздуха; Q – объемная мощность тепловыделения; K – проницаемость пористой среды, определяемая по данным статьи [3]; ΔT – перепад температур на внешних границах двухслойной системы (считается положительным при подогреве снизу); κ_{pm} – теплопроводность пористой среды, насыщенной воздухом; h_{pm} – высота пористого слоя. Для исследуемого образца $h_{pm} = 13.2$ мм, $\kappa_{pm} = 0.043$ Вт/м/°С и $K = 2.6 \cdot 10^{-8}$ м².

В результате анализа устойчивости механического равновесия воздух в двухслойной системе "воздух-пористая среда" была построена карта устойчивости (рис. 2) для трех значений толщины воздушной прослойки: 9.6, 8.5 и 8.0 мм. Кроме порога устойчивости по тепловизионным картинкам измерялась длина волны λ , через которую далее по формуле $k = (2\pi h_{pm})/\lambda$ вычислялось безразмерное волновое число. Значения волнового числа для трёх толщин воздушного слоя в зависимости от внешнего числа Рэлея представлены на рис. 3. На рисунках видно, что результаты эксперимента хорошо согласуются с численными расчётами при $Ra_I < 0.5$. При $Ra_I > 0.5$ на графике рис. 3 наблюдается резкое 10%-ое уменьшение волнового числа для $h_{air} = 8.5$ мм. Для толщины $h_{air} = 9.6$ мм это уменьшение носит плавный характер. При $h_{air} = 8.0$ мм волновое число в исследуемой области Ra_I с учётом погрешности эксперимента не изменяется.

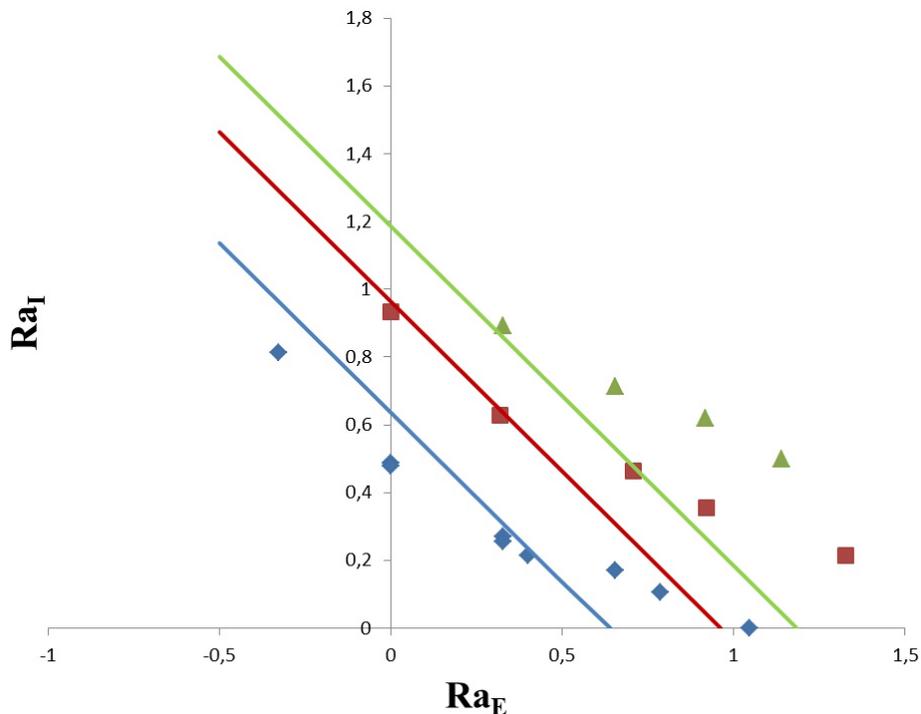


Рис. 2: Карта устойчивости механического равновесия воздуха для трёх толщин воздушной прослойки h_{air} : синий цвет - $h_{air} = 9.6$ мм; красный цвет - $h_{air} = 8.5$ мм; зелёный цвет - $h_{air} = 8.0$ мм. Точки – эксперимент. Сплошные линии – численное моделирование

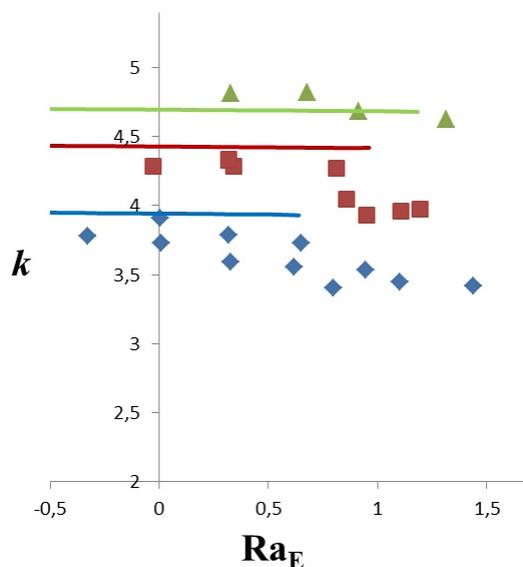


Рис. 3: Безразмерное волновое число при различных внешних числах Рэлея для трёх толщин воздушной слоя h_{air} : синий цвет - $h_{air} = 9.6$ мм; красный цвет - $h_{air} = 8.5$ мм; зелёный цвет - $h_{air} = 8.0$ мм. Точки — эксперимент. Сплошные линии — численное моделирование

Зафиксированные резкие или плавные изменения волнового числа связаны с качественным перестроением структуры конвективных течений, наблюдаемых по полям температуры в надкритической области. С потерей устойчивости механического равновесия возникала одна из двух видов конвективных структур. С ростом внешнего числа Рэлея после описанного перехода по волновому числу возникала структура из конвективных валов, которые были строго ориентированы ортогонально тепловыделяющим волокнам. До перехода была другая конвективная структура из конвективных валов с независимой от пористого образца ориентацией. Данные численного моделирования расходятся с результатами эксперимента после наблюдаемого перехода по волновому числу, т.к. двумерная теоретическая модель не учитывает трёхмерный характер конвекции в двухслойной системе и анизотропность образца волокнистой пористой среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045/>.

Список литературы

- [1] Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. Switzerland: Springer, 2017.
- [2] Kolchanova E., Kolchanov N. Onset of internal convection in superposed air-porous layer with heat source depending on solid volume fraction: influence of different modeling // Acta Mechanica. 2022. V. 233. P. 1769–1788. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03204-8>
- [3] Kolchanova E.A., Kolchanov N.V., Sidorov A.S. Permeability measurements in experiments on convective heat transfer in a complex fibrous porous medium structured by a 3D photopolymer framework // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2023. V. 11, N. 1. P. 65–74. doi: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2023047663