



## Тепловизионное исследование конвекции, вызванной внутренним тепловыделением в двухслойной системе «воздух–пористая среда»<sup>1</sup>

Колчанов Н.В., Сидоров А.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

В работе представлены результаты экспериментов по конвекции воздуха в системе, состоящей из горизонтального пористого тепловыделяющего слоя и воздушной прослойки над ним. Свойства самой пористой среды определялись в отдельных экспериментах и подробно описаны в работе [1]. Определен порог возникновения конвективного течения для разных толщин воздушной прослойки через относительный тепловой поток и объемную мощность тепловыделения. Уменьшение толщины воздушной прослойки приводит к существенному повышению устойчивости механического равновесия и увеличению порогового значения числа Рэлея–Дарси. С помощью тепловизионных измерений показано, что конвективные течения в двухслойной системе, вызванные внутренним тепловыделением в нижнем волокнистом пористом слое, имеют форму двумерных валов, ось которых ориентирована поперёк тепловыделяющих волокон.

### Эксперимент

На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, которая состоит из конвективной камеры с рабочей полостью (выделена контуром зеленого цвета) и системы термостатирования. Пористая среда 1 располагается на медной квадратной пластине 2, являющейся нижней границей полости и частью теплообменника. Толщина и сторона пластины соответственно равны 10.0 мм и 160 мм. К ней по периметру прикреплены монолитные боковые границы 3 с помощью стальных болтов. Над образцом 1 расположена воздушная прослойка 4, толщина которой устанавливается дополнительной вставкой из органического стекла 5. Сверху двухслойная система накрывается дюралюминиевой пластиной 6, которая имеет толщину 5.0 мм и крепится к боковым границам 3. В центральной части пластины 6 сделано круглое отверстие, в которое вмонтировано и закреплено стекло из селенида цинка (ZnSe) 7 с диаметром 104 мм. Толщины стекла 7 и пластины 6 совпадают. Стекло 7 прозрачно для электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 0.5–20 мкм, поэтому инфракрасное излучение, испускаемое поверхностью пористой среды, почти без поглощения выходит из рабочей полости и регистрируется тепловизором

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045/>.

Testo 890. В верхней части устройства термостатирования предусмотрено отверстие для объектива 8 тепловизора. Для точечного измерения температуры использовались медь–константановые дифференциальные термопары 9 совместно с приборами Термодат-38С1 и Термодат-38В1. Две термопары измеряют температуры на нижней и верхней границах двухслойной системы относительно температуры в лаборатории  $T_0$ . Красными точками отмечены места расположения спаев ещё трех термопар в центральной части образца пористой среды, которые измеряют температуру в этих точках относительно температуры  $T_0$ . Температура  $T_0$  измерялась ртутным термометром с точностью 0.1 °С.

Система термостатирования используется для контроля температуры верхней границы полости. В верхней части устройства вмонтированы восемь вентиляторов, которые создают вынужденное циркулирующее внутри течение воздуха. Центральная часть устройства термостатирования направляет воздух на верхнюю границу рабочей полости (черные стрелки на Рис. 1). Нижняя часть устройства плотно прилегает к верхней границе рабочей полости, поэтому набегающий на границу воздух растекается через рассекатели и попадает в периферийное пространство устройства термостатирования. На периферии устройства находится радиатор из медной трубки, который позволяет менять температуру циркулирующего внутри воздуха. Оболочка устройства термостатирования выполнена из теплоизоляционного материала.

Тепловыделение в пористом слое возникает, когда по волокнам подводится электрический ток от двух согласованно соединённых источников электропитания GPR-11Н30D.

## Результаты

Интенсивность конвекции определялась внутренним безразмерным числом Рэлея–Дарси [2]

$$Ra = g \left( \frac{\beta \rho_0 c_p}{\nu} \right)_{air} \frac{QKh_{pm}^3}{2\kappa_{eff}^2},$$

где  $Q$  — объемная мощность тепловыделения,  $K$  — проницаемость,  $\kappa_{eff}$  — эффективная теплопроводность,  $h_{pm}$  — толщина пористого слоя,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\beta$ ,  $\rho_0$ ,  $c_p$ ,  $\nu$  — это коэффициент объёмного расширения, плотность, теплоёмкость и кинематическая вязкость воздуха соответственно при температуре, поддерживаемой на границах двухслойной системы ( $\beta = 1/273 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\rho_0 = 1.21 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 1.01 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ;  $\nu = 15.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

На Рис. 2 представлены фотографии поля температуры, полученные тепловизором, для разных

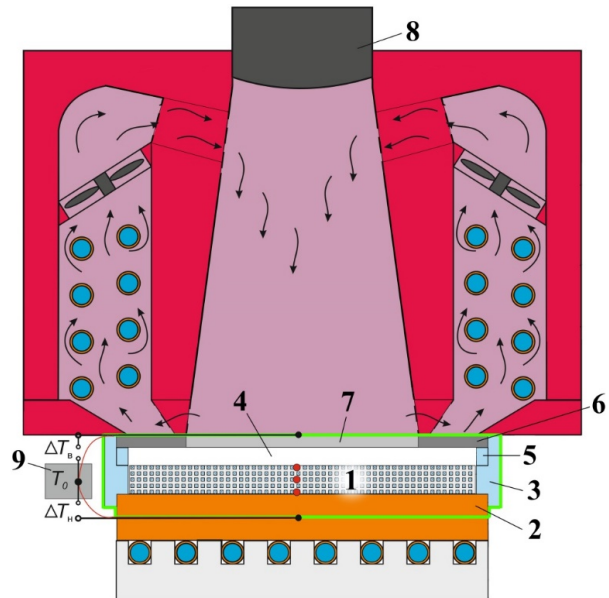


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — слой волокнистой тепловыделяющей пористой среды; 2 — медная квадратная пластина нижнего теплообменника; 3 — монолитные боковые границы из органического стекла; 4 — прослойка воздуха; 5 — вставка из органического стекла, с помощью которой устанавливается толщина воздушной прослойки 4; 6 — дюралюминиевая пластина, являющаяся верхней границей полости; 7 — круглое стекло из селенида цинка (ZnSe); 8 — объектив тепловизора; 9 — совокупность дифференциальных медь–константановых термопар для измерения температуры в различных точках внутри экспериментальной установки. Зелёный контур выделяет рабочую полость с двухслойной системой

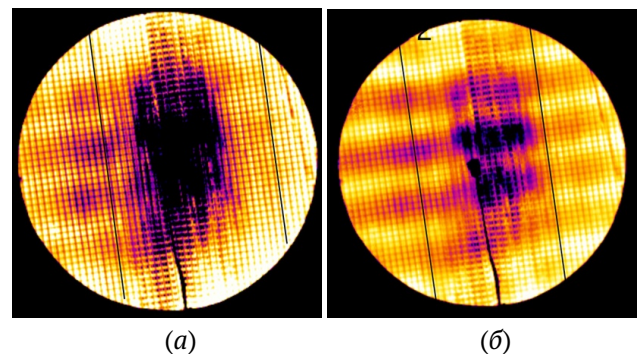


Рис. 2. Эволюция поля температуры на поверхности волокнистого тепловыделяющего пористого слоя в надкритической области при толщине воздушной прослойки:  $h_{air} = 7.6 \text{ мм}$ , полученные для образца с пористостью 0.82: (а)  $Ra = 0.88$ ; (б)  $Ra = 1.07$

чисел  $Ra$ . Тепловизор регистрирует течение, когда оно проникает вглубь пористой среды и имеет интенсивность, достаточную для образования конвективных возмущений температуры. Когда температурные возмущения, вызванные конвективным течением, становятся больше цены наименьшего деления тепловизора ( $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), на картине появляются вытянутые поперёк тепловыделяющих волокон среды чередующиеся темные (холодные) и светлые (горячие) полосы. Каждой полосе соответствует течение от двух соседних валов с разной закруткой. Темное пятно в центре картин обусловлено высокой пористостью среды, благодаря чему тепловое излучение от нижней холодной стенки регистрируется тепловизором.

В экспериментах показано, что увеличение объёмной мощности тепловыделения и числа  $Ra$  приводит к увеличению размеров конвективных

валов. Такое поведение мы связываем с тем, что при увеличении интенсивности конвекции область, занятая конвективными валами, увеличивается за счет проникновения валов вглубь пористого слоя.

Согласно экспериментальным данным критическое число Рэлея–Дарси и критическое волновое число увеличиваются с уменьшением толщины воздушной прослойки. Этот результат согласуется с численными расчетами в подобных средах.

### Список литературы

- [1] Kolchanova E., Kolchanov N., Sidorov A. 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. Vol. 11, no. 1. Pp. 65–74. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2023047663.
- [2] Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.