

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ СТЕНКОЙ И ЖИДКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ *

Р.А. Степанов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Н. Сухановский, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Ю. Васильев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Е.Н. Попова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Титов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Исследование направлено на поиск новых решений, позволяющих повысить эффективность теплообмена. Рассматриваются пассивные методы, которые могут иметь широкое применение в теплообменных системах в секторе ЖКХ и промышленности. Проведены экспериментальные и численные исследования свойств вихревой структуры конвективных течений в зависимости от величины управляющих параметров и формы нагреваемых поверхностей. Задача исследовалась в двумерной и трехмерной постановках. На основе данных численного моделирования было показано, что изменение конфигурации распределения температуры приводит к существенному изменению структуры крупномасштабного течения. Установлено, что использование фрактального нагрева позволяет значительно снизить уровень пульсаций теплотока без потерь в эффективности теплопереноса.

Ключевые слова: конвекция, турбулентность, теплоперенос, крупномасштабная циркуляция, фрактальные поверхности.

Введение

Проблема интенсификации теплообмена при помощи неоднородных по пространству граничных условий представляет большой интерес. Ее решение находится в области как теоретических, так и прикладных задач. Естественная конвекция в замкнутых полостях является классическим объектом фундаментальных исследований, притягивающим внимание разнообразием ее динамических режимов [2, 3]. Наиболее

полно изучена конвекция Релея-Бенара в полостях простой геометрии (цилиндр, параллелепипед), когда нижняя граница подогревается, а верхняя охлаждается [4, 5]. Большое количество прикладных задач, требует рассмотрения более сложных систем, включая конвекцию от локализованных источников тепла [6, 7].

Целью данной работы является исследование возможности повышения эффективности теплообмена за счет неоднородности теплопроводящих свойств нагрева-

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-41-590406-урал.

теля. Особенный интерес представляет фрактальное распределение. В зависимости от формы и размерности фрактала можно получить различное распределение энергии пульсаций температуры по спектру, что в свою очередь открывает возможность непосредственного влияния на каскадные процессы турбулентной конвекции. В рамках данной работы экспериментально и численно устанавливается зависимость числа Нуссельта от основных управляющих параметров, таких как число Рейля (или Грассхофа) и число Прандтля, а также от топологии неоднородно нагреваемой нижней границы.

Численное моделирование в двухмерной постановке

Рассматривается задача о несжимаемой теплопроводящей жидкости в прямоугольной области с твердыми границами. Эволюция поля скорости и температуры описывается системой уравнений термогравитационной конвекции в приближения Буссинеска. Для скорости на всех границах выполняется условие прилипания. Все стенки являются теплоизолированными, за исключением некоторых областей на нижней границе, где находятся нагревательные элементы. На них установлено условие постоянной температуры. На рис. 1 показаны четыре распределения нагреваемых областей. Для удобства вводится параметр D , описывающий конфигурацию нагревателя: фрактальный нагреватель ($D=f$), один сплошной нагреватель ($D=1$) и нагреватели, состоящие из равномерно распределенных элементов ($D=4$ и $D=8$). Суммарная длина нагреваемой области одинакова для

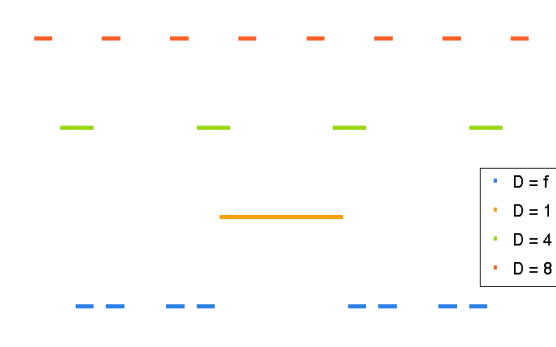


Рис. 1. Конфигурации нагревательных элементов, использованных в численном моделировании

всех D . Цель данного этапа исследования состояла в оценке влияния неоднородности нагрева на скорость прогрева среды.

Численное решение находилось в переменных $U-V-P$ с помощью метода конечных элементов, который реализован в пакете Wolfram Mathematica. На рис. 2 показана сетка, на которой производились расчёты. В зависимости от конфигурации нагревательных элементов сетка перестраивалась. На рис. 3 представлены результаты расчёта процесса прогрева объема жидкости (холодный старт). Показаны временные зависимости средней температуры и полной кинетической энергии течения для числа Грассхофа $Gr = 10^4$. Было обнаружено, что при увеличении числа Прандтля распределение нагревательных элементов начинает оказывать более существенную роль. Можно отметить, что при использовании фрактального нагревателя температура растет несколько быстрее после момента времени $t=0,15$.

Различное поведение кривых на рис. 3 объясняется структурой крупномасштабной циркуляции и теплового пограничного слоя. Распределения температуры и

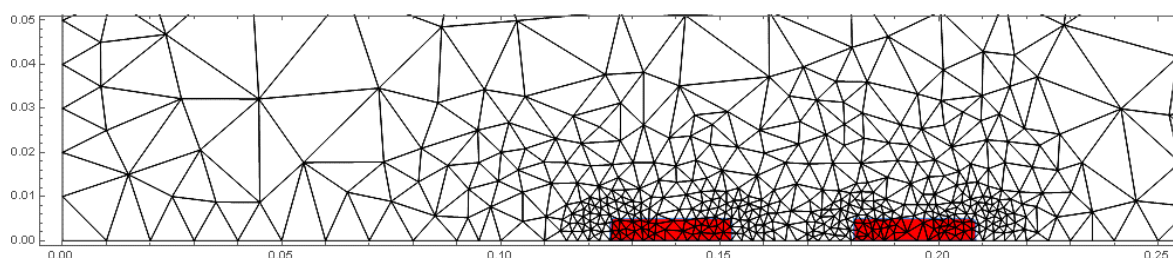


Рис. 2. Фрагмент вычислительной сгущающейся сетки в окрестности нагреваемой области (выделено красным)

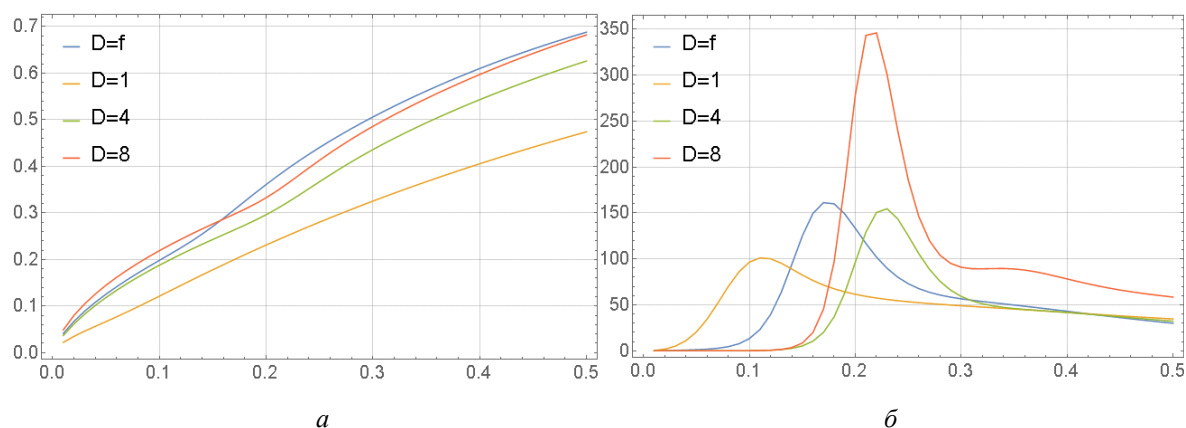


Рис. 3. Временные зависимости для средней температуры среды(а) и суммарная кинетическая энергия течения(б)

поля скорости в последний момент времени показаны на рис. 4(а). Видно, что для $D=f, 1, 4$ характерна двухвихревая структура, а для $D=8$ крупномасштабная циркуляция представляет собой один вихрь. Пограничный температурный слой в значительной степени зависит от топологии границы. Модельное исследование влияния топологической неоднородности

нагреваемых поверхностей выполнено в той же постановке с тем лишь изменением, что нагревательные элементы выступают над начальным уровнем нижней границы. По распределениям температуры на рис. 4(б) видно, что в случае топологической «шероховатости» нижний слой жидкости прогревается более однородно по сравнению с гладкой границей.

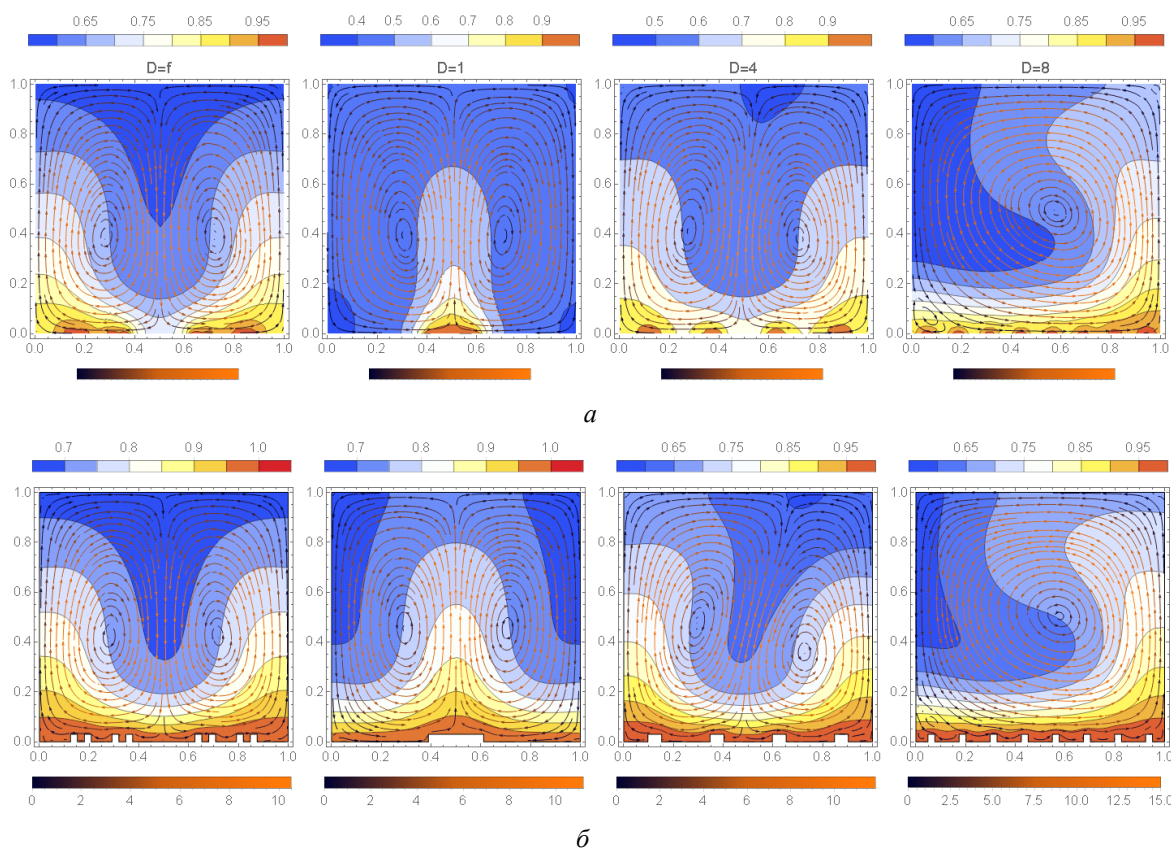


Рис. 4. Пространственные распределения полей температуры и скорости. Цветом обозначена температура, стрелочками – направление движения. Цвет стрелочек определяет величину модуля скорости. (а) – плоская нижняя граница, (б) – «шероховатая» нижняя граница

**Численное моделирование
в трехмерной постановке**

На втором этапе исследования проведено численное моделирование конвективной турбулентности при неоднородном распределении нагрева на нижней границе в трехмерной постановке с использованием свободно распространяемого пакета вычислительной гидродинамики с открытым исходным кодом OpenFoam 4.1. В качестве объекта исследования выбрана кубическая полость. Неоднородный нагрев нижней границы также задавался при помощи смешанных граничных условий: одна часть поддерживалась при постоянной

температуре, а на оставшейся части задавался нулевой поток тепла (теплоизолированная граница). Были рассмотрены три вида распределений, показанных на рис. 5. В случаях неоднородного распределения нагрева трехмерные поля температуры, показанные на рис. 6, и крупномасштабная циркуляция, зависят от распределения температуры на нижней границе.

Интенсивность теплообмена слабо зависит от распределения температуры на нижней границе. Максимальное отличие в числе Нуссельта при трех вариантах неоднородного распределения температуры не превышает 5%. Сравнение результатов численного моделирования при однород-

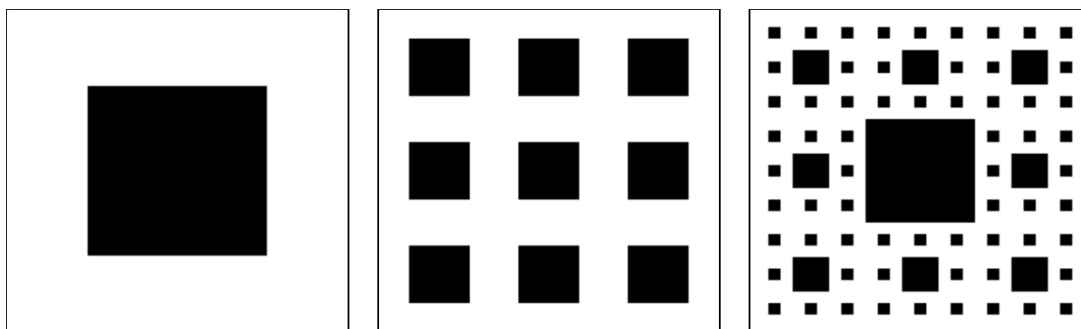


Рис. 5. Схематическое изображение распределения температуры на нижней границе. Черными квадратами отмечены области, в которых температура поддерживается постоянной

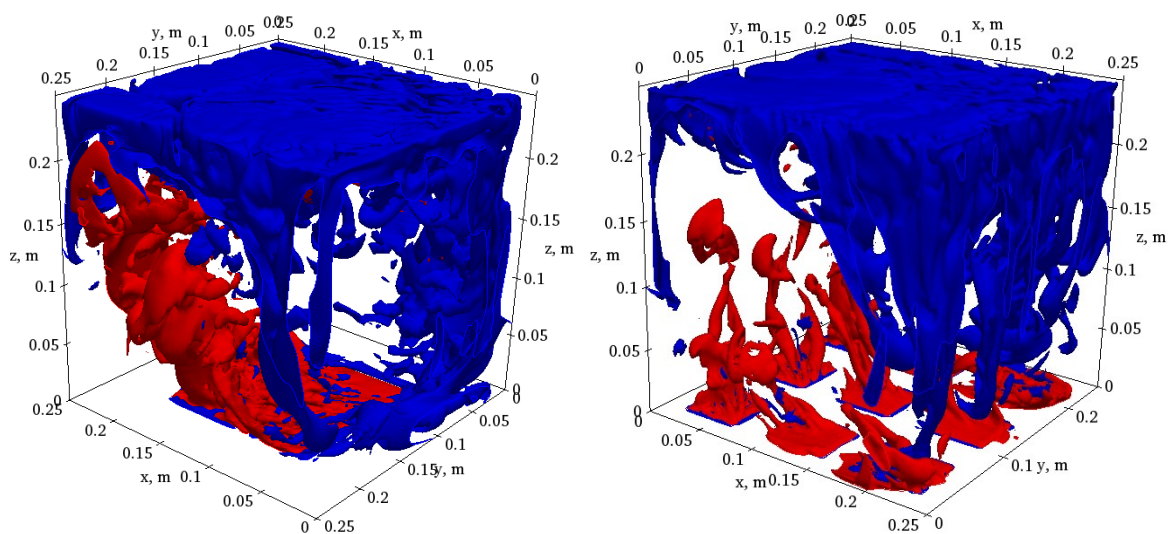


Рис. 6. Изоповерхности температуры, отображающие поднимающиеся горячие плюмы (красные) и опускающиеся холодные плюмы (синие), для различных распределений нагревательных элементов

Выводы

ном и неоднородном распределении температуры при $Ra=1,1 \cdot 10^9$ показало, что уменьшение площади нагрева на 70% приводит к снижению числа Нуссельта на 10%. Для практических приложений важную роль играет стабильность конвективного теплового потока, которая характеризуется отсутствием пульсаций. Установлено, что использование фрактального нагрева позволяет значительно снизить уровень пульсаций конвективного теплопотока, без потери в эффективности теплопереноса (рис. 7). Более подробное описание результатов исследования представлено в работах [1, с. 8–9].

Для экспериментальной верификации результатов численного моделирования использовалась существующая лабораторная установка для исследования конвекции в кубической полости с однородным нагревом [8]. Были созданы и использованы специальные тонкие накладки, моделирующие. С использованием были определены временные зависимости теплопотоков от холодного и горячего теплообменников для двух перепадов температуры и трех различных конфигураций распределения температуры на горячем теплообменнике. Показано, что вариации конфигурации теплоизоляционных накладок приводят к изменению динамики и интенсивности теплопотоков на границе «горячий теплообменник-жидкость», которые наблюдались и при численном моделировании.

При помощи системного подхода, включающего в себя математическое моделирование и экспериментальные измерения, была изучена возможность усиления и стабилизации теплопотока при помощи неоднородного распределения нагрева. Ведущие мировые группы уделяют решению этой проблемы самое пристальное внимание. Отличительной особенностью нашего исследования являлось использование особого, фрактального распределения нагрева, представляющего собой суперпозицию локализованных структур различных масштабов. Показано, что фрактальный нагрев может эффективно использоваться для влияния на теплоперенос в ходе нестационарной фазы установления конвективных течений. В случае развитых режимов, при высоких значениях чисел Рэлея фрактальное распределение нагрева оказывает существенное влияние на динамику и структуру течения. Заслуживающий особого внимания результат состоит в том, что уровень пульсаций теплопотока понижается при помощи фрактального нагрева без ухудшения эффективности теплопереноса. Дальнейшее развитие этого направления и разработка конкретных устройств и методик представляются чрезвычайно перспективными для целого ряда технологических процессов.

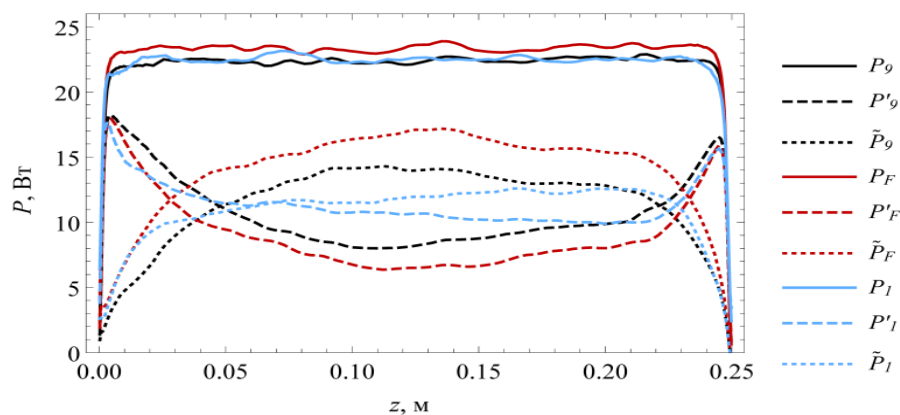


Рис. 7. Мощности конвективных потоков P для трех видов распределений температуры. Штрихом показаны составляющие потоков, определенные по пульсациям полей скорости и температуры, тильдой — по средним полям

Библиографический список

1. Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Степанов Р.А. Конвективная турбулентность в кубической полости при неоднородном нагреве нижней границы // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – № 1. – С. 17–26.
2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
3. Зимин В.Д., Фрик П.Г. Турбулентная конвекция. – М.: Наука, 1988. – 178 с.
4. Ahlers G., Grossmann S., Lohse D. Heat transfer and large-scale dynamics in turbulent Rayleigh-Benard convection // Rev. Mod. Phys. – 2009. – Vol. 81. – № 2. – P. 503–537.
5. Chilla F., Schumacher J. New perspectives in turbulent Rayleigh-Benard convection // Eur. Phys. J. E. – 2012. – Vol. 35, № 7. – P. 58.
6. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physical D: Nonlinear Phenomena. – 2016. – Vol. 316. – P. 23–33.
7. Miroshnichenko I., Sheremet M. Turbulent natural convection heat transfer in rectangular enclosures using experimental and numerical approaches: A review // Renew Sustain Energy Rev. – 2018. – Vol. 82. – P. 40–59. DOI.
8. Vasiliev A., Sukhanovskii A. and Frick P. Turbulent convective flows in a cubic cavity at high Prandtl number // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754. – P. 022010.
9. Titov V. and Stepanov R. Heat transfer in the infinite layer with a fractal distribution of a heater // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 208. – P. 012039.

THE INFLUENCE OF THE TOPOLOGY OF THE HEATED SURFACE ON THE EFFICIENCY OF HEAT TRANSFER BETWEEN THE WALL AND LIQUID COOLANT

R.A. Stepanov, A.N. Sukhanovskii, A.U. Vasiliev, E.N. Popova, V.V. Titov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

The study is aimed to investigate new ways for enhancement of the heat transfer efficiency. Passive methods are considered to be widely used in heat transfer systems in the housing and communal services sector and industry. Experimental and numerical studies of the properties of the vortex structure of convective flows were carried out depending on the values of the control parameters and the shape of the heated surfaces. The problem was investigated in two-dimensional and three-dimensional formulations. Based on numerical simulation data, it was shown that a change in the temperature distribution configuration leads to a significant change in the structure of the large-scale flow. It has been established that the use of fractal heating can significantly reduce the level of heat flow pulsations without loss in heat transfer efficiency.

Keywords: convection, turbulence, heat transfer, large-scale circulation, fractal surfaces.

Сведения об авторах

Степанов Родион Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, ул. Академика Королева, 1; e-mail: rodion@icmm.ru

Сухановский Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: san@icmm.ru

Васильев Андрей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ИМСС УрО РАН; e-mail: vasiliev.a@icmm.ru

Попова Елена Николаевна, кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь, ИМСС УрО РАН; e-mail: popovadu@icmm.ru

Титов Валерий Викторович, инженер-исследователь, ИМСС УрО РАН; e-mail: titov.v@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 03.11.2019 г.