

УДК 536.2
PACS 02.60.Cb; 44.25.+f

Влияние граничных условий нагрева на процессы теплообмена в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости

А. В. Евграфова^{a,b}, А. Н. Сухановский^b, М. О. Кучинский^a

^a Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: eav@icmm.ru

^b Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Ак. Королева, 1

В работе экспериментально исследованы процессы теплообмена в горизонтальном слое жидкости, локально подогреваемом снизу. Эксперименты были проведены для различных жидкостей в диапазоне чисел Рэлея Ra от 10^5 до 10^7 . Особое внимание было уделено исследованию влияния граничных условий нагрева (условие постоянной температуры нагревателя и постоянного потока тепла) на структуру течения и интенсивность теплообмена. Локальный нагрев в центре приводит к появлению как горизонтального, так и вертикального градиента температуры. Формируется крупномасштабная адвективная ячейка, на фоне которой возникает система вторичных конвективных структур. Мелкомасштабные вали развиваются в пограничном слое над нагреваемой областью, их структура и интенсивность существенно зависят от степени нагрева. В данной статье описано влияние граничных условий нагрева на динамику как основного течения, так и вторичных структур. Получены зависимости интенсивности теплообмена при фиксированной мощности нагревателя и фиксированной температуре.

Ключевые слова: естественная конвекция; теплообмен; локальный нагрев

Поступила в редакцию 13.03.2018; принята к опубликованию 17.05.2018

The influence of thermal boundary conditions on heat transfer from a localized heat source

A. V. Evgrafova^{a, b}, A. N. Sukhanovskii^b, M. O. Kuchinskii^c

^a Perm State University, Bukireva street, 15, 614990, Perm

email: eav@icmm.ru

^b Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Academician Korolev Street, 1, 614013, Perm

Heat transfer from a localized heat source in a cylindrical fluid layer was studied experimentally. Experiments were performed for fluids with different values of the Prandtl number and for the Rayleigh number varied from 10^5 to 10^7 . Particular attention has been paid to the ways of heat control which leads to different boundary conditions (constant temperature or a constant heat flux). We investigated the influence of thermal boundary conditions on flow structure and intensity of heat transfer. The dependences of the Nusselt number on the Rayleigh number were obtained.

Keywords: natural convection; heat exchange; local heating

Received 13.03.2018; accepted 17.05.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-68-74

1. Введение

Термогравитационная конвекция является основным механизмом переноса тепла в ряде технологических и природных процессов. Одним из критериев эффективности теплообмена является число Нуссельта, которое вводится как отношение полного потока тепла к потоку тепла за счет теплопроводности. Ключевым вопросом является выявление зависимости числа Нуссельта от управляющих параметров задачи.

Часто предметом изучения оказывается конвекция в слое жидкости, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху, – конвекция Рэлея–Бенара. Теория, описывающая процессы теплообмена в конвекции Рэлея–Бенара для широкого диапазона чисел Рэлея и Прандтля, была предложена в работах Гроссмана и Лозе [1, 2]. Результаты теории хорошо согласуются с экспериментами [3, 4]. Однако остается ряд вопросов, связанных с влиянием граничных условий нагрева на динамику основного течения и эффективность теплопереноса.

Широкий класс прикладных задач, таких как оптимизация систем охлаждения электронного оборудования, создание полупроводниковых монокристаллов, проектирование ядерных реакторов, требует рассмотрения конвекции от локализованного источника тепла. Существует ряд экспериментальных [5, 6] и численных работ [7, 8] по исследованию турбулентной конвекции от нагретого диска. Описана структура основного течения в широком диапазоне чисел Рэлея и при различных соотношениях высоты слоя жидкости к диаметру нагревателя. Случай ламинарного течения, возникающего в слое жидкости над неоднородно нагретой поверхностью, экспериментально и численно исследован в [9–11].

Процессы теплообмена в случае конвекции от локализованного источника тепловыделения численно исследованы в [12]. Модель представляла собой прямоугольную полость, которая однородно охлаждалась сверху. Показано, что локально теплоотдача падает при приближении к центру нагревателя. Такое поведение характерно для наличия в центре полости крупномасштабной тороидальной ячейки. При увеличении размера нагреваемой области данный эффект пропадает. Также показано, что теплопроводность боковых стенок не оказывает существенного влияния на процессы теплоотдачи, что было показано и для случая конвекции Рэлея–Бенара [13]. Если охлаждение осуществляется только за счет теплопроводности окружающих границ, то с ростом коэффициента теплопроводности существенно увеличивается интенсивность теплообмена на поверхности источника энергии. Это было показано в [14] для случая сопряженного конвективно-радиационного теплообмена в замкнутом кубе.

Эффект влияния условий нагрева на конвекцию в замкнутой полости с локализованным нагревом

дна был обнаружен в [15], где задавались следующие граничные условия: верхняя граница теплоизолирована, боковые стенки равномерно охлаждаются, на поверхности нагревателя задавалась либо постоянная температура, либо постоянный поток тепла. Задача была решена в двухмерной постановке для чисел Ra от 10^8 до 10^{12} и различных размеров нагреваемой области. Было показано, что способ задания граничных условий имеет значительное влияние на структуру течения. Эффективность теплообмена оказывается выше для случая постоянной температуры нагревателя. Таким образом, теплоперенос в случае локализованного нагрева существенно отличается от конвекции Рэлея–Бенара [16, 17], когда число Нуссельта не зависит от типа граничных условий.

Экспериментальных работ, посвященных анализу процессов теплообмена для случая локализованного нагрева мало. Основные результаты согласуются с данными, представленными в [12]. Влияние типов граничных условий нагрева не обсуждалось.

В данной работе представлено экспериментальное исследование процессов теплообмена в горизонтальном слое жидкости при наличии на дне локализованного нагрева. Измерения были проведены в диапазоне чисел Рэлея от 10^5 до 10^7 для различных жидкостей. Основной акцент сделан на определении зависимости интенсивности теплообмена от граничных условий нагрева.

2. Экспериментальная установка

Рабочая кювета представляла собой цилиндрическую полость диаметром $D = 300$ мм и высотой $L = 40$ мм. Схематичное изображение установки, а также расположение системы координат представлены на рис. 1. Боковые стенки и дно кюветы изготовлены из плексигласа толщиной 3 мм и 20 мм соответственно. Подогрев жидкости осуществлялся при помощи медного теплообменника, диаметром $d = 100$ мм и толщиной 20 мм, расположенного в центре кюветы заподлицо с ее дном. Питание нагревателя происходило через источник постоянного тока. Контроль нагрева мог осуществляться двумя способами – постоянный поток тепла или постоянная температура нагревателя. Температура нагревателя измерялась при помощи дифференциальной медь-константановой термопары. Измерительный спай термопары был расположен в центре нагревателя на глубине порядка 18 мм. Второй спай был расположен в термостатирующем слое жидкости комнатной температуры. Управление температурой и мощностью нагрева осуществлялось системой Термодат.

В качестве рабочих жидкостей использовались силиконовые масла различной вязкости – 3.2, 5.8 и 21 сСт при 25°C . Значения вязкости для различных температур жидкости были получены при помощи ротационного вискозиметра Brookfield MA 02346.

Поверхность жидкости всегда была свободной, температура в комнате поддерживалась постоянной в ходе всех экспериментов. Высота слоя жидкости в экспериментах не менялась и составляла $h = 30$ мм.

Температура масла в кювете измерялась при помощи гребенки из 12 медь-константановых термопар с диаметром спая не более 0.2 мм и диаметром проводов 0.1 мм. Расположение термопар показано на рис. 1, б. Температура измерялась в центральном вертикальном сечении над нагреваемой областью. Данные с термопар передавались на систему сбора данных Agilent, с 16 канальным мультиплексором. Контроль над частотой измерений и временем приема данных реализован программным обеспечением Agilent BenchLink Data Logger 3. Для оценки средней температуры была использована дополнительная термопара, она была помещена на периферию исследуемой области ($z = 15$ мм и $r = 120$ мм).

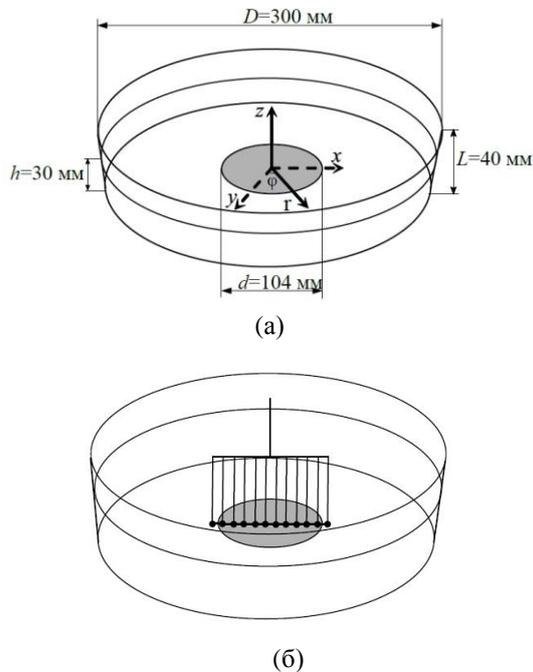


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – геометрия кюветы и нагревателя; б – расположение гребенки термопар

Для визуализации течения в нижней части слоя был использован теневой метод. Суть теневого метода в данной постановке задачи заключается в следующем: источник излучения, находящийся непосредственно над экспериментальной моделью, давал пучок света, который, отражаясь от нагревателя, рассеивался в пограничном слое. Наличие в пограничном слое температурных неоднородностей в виде конвективных структур приводит к появлению на картинах чередующихся областей света и тени.

В качестве безразмерных параметров, характеризующих течение, были использованы число Прандтля Pr и число Рэлея Ra :

$$Pr = \frac{\nu}{\chi} \quad (1)$$

$$Ra = \frac{g\beta h^3 \Delta T}{\nu\chi} \quad (2)$$

где g – модуль вектора гравитационного ускорения, h – высота слоя жидкости, β – коэффициент теплового расширения, ΔT – разница температур между температурой нагревателя и комнатной температурой, ν – коэффициент кинематической вязкости, χ – коэффициент температуропроводности.

Для оценки интенсивности теплообмена было использовано число Нуссельта Nu .

$$Nu = \frac{q}{q_\lambda}, \quad (3)$$

где q_λ – поток тепла за счет теплопроводности, q – полный поток тепла. Тепловые потоки вычислялись по формулам:

$$q = \frac{P}{S}; \quad q_\lambda = \lambda \frac{T_h - T_s}{h}, \quad (4)$$

где P – мощность нагрева, S – площадь поверхности нагревателя, T_h – температура нагревателя, T_s – температура поверхности жидкости. Температура поверхности жидкости определялась следующим образом. Гребенка термопар последовательно располагалась на высотах $z = 28, 29$ и 30 мм. Время измерений составляло около 1000 секунд на каждой высоте. Затем температура усреднялась по времени и пространству в этом тонком приповерхностном слое. Результирующая температура T_s была использована для вычисления q_λ . Здесь мы пренебрегаем теплоотдачей со дна и боковых стенок, считая, что жидкости в основном охлаждается за счет теплообмена на свободной поверхности.

Температура поверхности жидкости T_s измерялась только в центральной области кюветы вдоль одного направления, навязанного расположением линейки термопар. Параллельно с экспериментом были получены термограммы всей свободной поверхности жидкости при помощи тепловизионной камеры Fluke для различных режимов течения. Недостатком тепловизионных измерений являются достаточно большая погрешность и необходимость в постоянной калибровке. Однако данный способ измерения температуры был использован только для анализа распределения температуры во всех направлениях поверхности жидкости. На рис. 2 представлена карта температуры свободной поверхности жидкости для $Ra = 4.2 \cdot 10^6$. Видно, что есть пространственная неоднородность в распределении температуры, обуслов-

ленная всплытием мелкомасштабных конвективных структур. Однако, несмотря на это, оценки показали, что погрешность вычисления температуры поверхности T_s указанным выше способом не превышает 5 %.

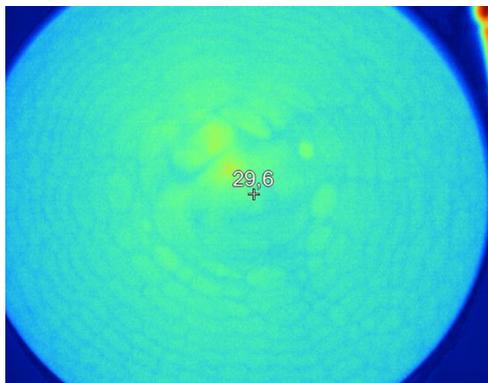


Рис. 2. Термограмма свободной поверхности жидкости, полученная тепловизионным способом (цветной в электронной версии)

3. Результаты эксперимента

Структура основного течения представлена рис. 3. Локализованный нагрев в центре приводит к появлению интенсивного подъемного течения, тогда как на периферии температура жидкости близка к комнатной. Таким образом, возникает перепад давления между центром и периферией. В результате в нижней части слоя жидкость движется к центру, создавая конвергентное (сходящееся) течение, а в верхнем слое к периферии, формируя дивергентное (расходящееся) течение.

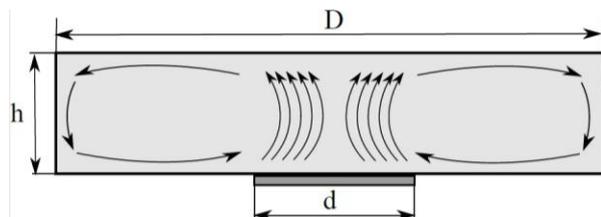
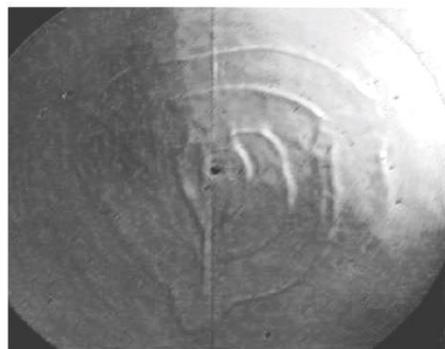


Рис. 3. Структура основного течения

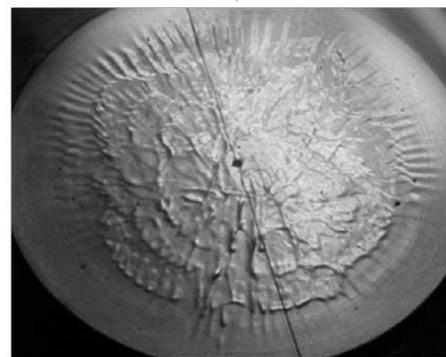
При натекании конвергентного потока на нагреватель формируется пограничный слой с неустойчивой стратификацией температуры. В этом пограничном слое происходит развитие вторичных структур в виде конвективных валов различной ориентации. Форма вторичных структур существенно зависит от степени нагрева, а их возникновение носит периодический характер [10]. Визуализация течения в нижней части слоя представлена на рис. 4.

Конвергентный поток сносит вторичные структуры в центр нагреваемой области, что приводит к флуктуациям температуры. Распределение температуры для различных положений термопары на высоте $z=3$ мм представлено на рис. 5. Используя термопарные измерения, можно оценить скорость

конвергентного потока, для этого необходимо знать сдвиг по времени между максимумами температуры и расстояние между термопарами.



(а)



(б)

Рис. 4. Теневые картины течения в нижней части слоя: а – $Ra = 3.3 \cdot 10^5$, б – $Ra = 3.1 \cdot 10^6$

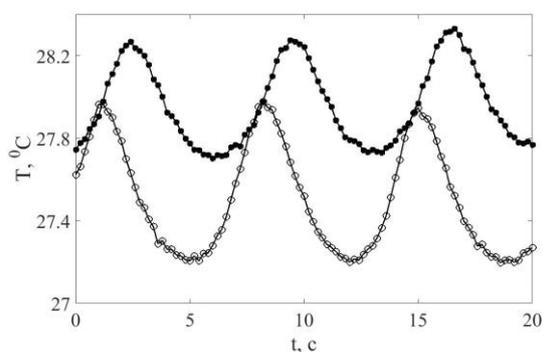


Рис. 5. Зависимость температуры от времени при $Ra = 4.2 \cdot 10^6$: открытые символы – $r = 4$ см, закрытые символы – $r = 3$ см

Таким образом, была получена зависимость характерной скорости конвергентного потока от числа Рэля (рис. 6). На графике представлены два семейства точек, которые соответствуют различным условиям нагрева – постоянной температуре нагревателя ($T = const$) и постоянной мощности ($P = const$). Можно видеть, что способ задания граничных условий не влияет на интенсивность основной циркуляции, точки имеют общий тренд. При этом нужно отметить, что скорость имеет практически линейную зависимость от числа Рэля.

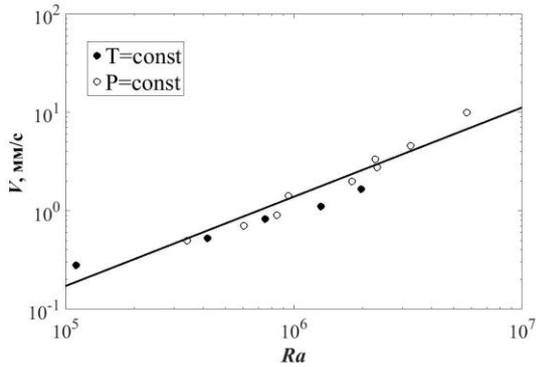


Рис. 6. Зависимость характерной скорости конвергентного потока от числа Рэлея

Частота возникновения вторичных структур растет с увеличением нагрева по степенному закону (рис. 7). Условия нагрева не влияют на динамику вторичных структур, а степень числа Рэлея приблизительно равна 0.6 как для постоянной температуры нагревателя, так и для постоянной мощности нагрева. Однако, как было показано в [18], число Рэлея, определенное через толщину слоя жидкости и разницу температур между температурой нагревателя и температурой окружающего воздуха, не является управляющим для описания динамики конвективных структур в пограничном слое. Ключевыми для определения характера движения вторичных течений являются особенности пограничного слоя – его высота и градиент температуры. На толщину пограничного слоя влияет мощность нагрева и, что самое главное, полная глубина слоя исследуемой жидкости. В данной статье исследуется случай, когда толщина слоя h в ходе экспериментов не изменялась и составляла 30 мм. Рассмотрение процессов теплообмена для других высот представляет собой интересную задачу на будущее и определяет направление дальнейших исследований.

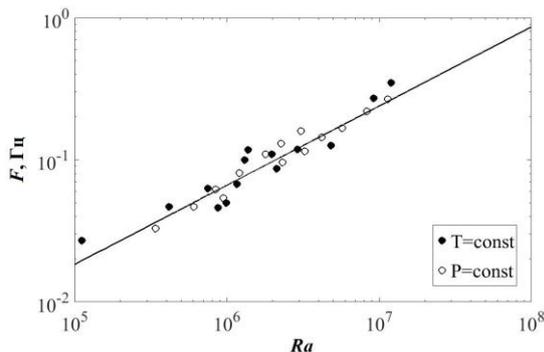


Рис. 7. Зависимость частоты формирования вторичных структур от числа Рэлея

После определения степени влияния интенсивности нагрева на динамику основного и вторичного движения интересно посмотреть, как происходят процессы теплообмена в такой системе.

Зависимость среднего по времени и пространству числа Нуссельта представлена на рис. 8. Точ-

ки соответствуют различным типам граничных условий. Особенности, обусловленные способом задания граничных условий нагрева, не обнаружены. Данный результат противоречит результатам численного моделирования, представленным в [15]. Авторы в этой работе показали, что теплообмен происходит интенсивней при условии постоянной температуры нагревателя. Однако стоит отметить, что в данной работе диапазон чисел Рэлея не соответствует рассмотренному в [15]. А значит, можно ожидать, что интенсивность теплоотдачи подчиняется различным законам в зависимости от диапазона управляющих параметров задачи. Этот факт нуждается в дальнейшем исследовании и в рамках данной статьи не рассматривается.

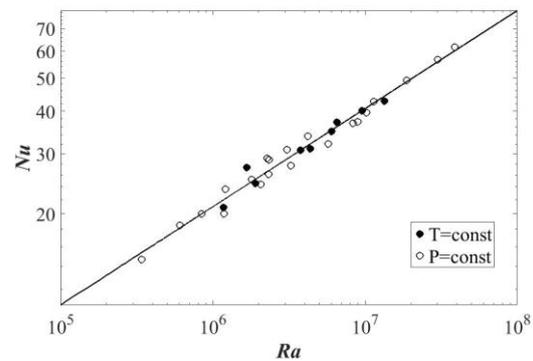


Рис. 8. Зависимость среднего по времени и пространству числа Нуссельта от числа Рэлея

4. Заключение

Проведено экспериментальное исследование процессов теплообмена в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости. Особое внимание было уделено роли граничных условий нагрева на динамику течения в рассматриваемой системе и на интенсивность теплоотдачи. Показано, что локальный нагрев слоя приводит к возникновению крупномасштабной адвективной циркуляции. На фоне основного движения, в пограничном слое над нагреваемой областью, возникает система вторичных конвективных движений. Форма вторичных структур и интенсивность их образования существенно зависят от управляющих параметров.

В качестве граничных условий нагрева были использованы условие постоянной температуры нагревателя и условие постоянного потока тепла. Было показано, что теплоток определяется только интенсивностью основной циркуляции и не зависит от граничных условий нагрева в рассматриваемом диапазоне чисел Рэлея.

Список литературы

1. Grossmann S., Lohse D. Scaling in thermal convection: a unifying theory // Journal of Fluid Mechanics. 2000. Vol. 407. P. 27–56.

2. Grossmann S., Lohse D. Thermal convection for large Prandtl numbers // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 407. P. 27–56.
3. Niemela J. J., Skrbek L., Sreenivasan K. R., Donnelly R. J. Turbulent convection at very high Rayleigh numbers // *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 837–840.
4. Ahlers G., Brown E., Nikolaenko A. The search for slow transients, and the effect of imperfect vertical alignment, in turbulent Rayleigh–Benard convection // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 557. P. 347–367
5. Boubnov B. M., van Heijst G. J. F. Experiments on convection from a horizontal plate with and without background rotation // *Experiments in Fluids*. 1994. Vol. 16. P. 155–164.
6. Lu J., Arya S. P., Snyder W. H., Lawson R. E. Laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment // *Journal of Applied Meteorology*. 1997. Vol. 36. P. 1377–1391.
7. Шварц К. Г., Шкляев В. А. Численное моделирование мезомасштабных вихревых структур вблизи мощного горячего источника примеси в пограничном слое атмосферы // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2009. Vol. 1. P. 96–106.
8. Аристов С. Н., Фрик П. Г. Крупномасштабная турбулентность в тонком слое неизотермической вращающейся жидкости // *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*. 1988. № 4. С. 48–55.
9. Богатырев Г. П. Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // *Письма в ЖЭТФ*. 1990. Т. 51. № 11. С. 557–559.
10. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // *Physica D. Nonlinear Phenomena*. 2016. Vol. 316. P. 23–33
11. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2016. Vol. 142. P. 2214–2223.
12. Sezai I., Mohamad A. A. Natural convection from a discrete heat source on the bottom of a horizontal enclosure // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43. P. 2257–2266
13. Roche P. E., Castaing B., Chabaud B., Hebral B., Sommeria J. Side wall effects in Rayleigh–Benard experiments // *European Physical Journal B*. 2001. Vol. 24. P. 405–408
14. Yang G., Wu J. Y. Effects of natural convection, wall thermal conduction, and thermal radiation on heat transfer uniformity at a heated plate located at the bottom of a three-dimensional rectangular enclosure // *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*. 2016, vol. 69, pp. 589–606.
15. Sharma A. K., Velusamy K., Balaji C. Turbulent natural convection in an enclosure with localized heating from below // *International Journal of Thermal Sciences*. 2000. Vol. 46. P. 1232–1241
16. Verzicco R., Sreenivasan K. R. A comparison of turbulent thermal convection between conditions of constant temperature and constant heat flux // *Journal of Fluid Mechanics*. 2008. Vol. 595. P. 203–209
17. Johnston H., Doering C. R. Comparison of turbulent thermal convection between conditions of constant temperature and constant flux // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 102, 064501
18. Evgrafova A., Sukhanovskii A., Kuchinskii M., Popova E. Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 208, 012016

References

1. Grossmann S., Lohse D. Scaling in thermal convection: a unifying theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 407, pp. 27–56.
2. Grossmann S., Lohse D. Thermal convection for large Prandtl numbers. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 407, pp. 27–56.
3. Niemela J. J., Skrbek L., Sreenivasan K. R., Donnelly R. J. Turbulent convection at very high Rayleigh numbers. *Nature*, 2000, vol. 404, pp. 837–840.
4. Ahlers G., Brown E., Nikolaenko A. The search for slow transients, and the effect of imperfect vertical alignment, in turbulent Rayleigh–Benard convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, vol. 557, pp. 347–367.
5. Boubnov B. M., van Heijst G. J. F. Experiments on convection from a horizontal plate with and without background rotation. *Experiments in Fluids*, 1994, vol. 16, pp. 155–164.
6. Lu J., Arya S. P., Snyder W. H., Lawson R. E. Laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, vol. 36, pp. 1377–1391.
7. Shvarts K. G., Shklyayev V. A. Numerical modeling of mesoscale vortex structures near a strong hot impurity source in the atmospheric boundary layer. *Computational Fluid Dynamics*, 2009, vol. 1, pp. 96–106.
8. Aristov S. N., Frick P. G. Large-scale turbulence in a thin layer of nonisothermal rotating fluid. *Fluid Dynamics*, 1988, vol. 23, no. 4, p. 522–528.
9. Bogatyrev G. P. Excitation of cyclonic vortex or laboratory model of tropical cyclone. *JETP Letters*, 1990, vol. 51, no. 11, pp. 557–559.
10. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2016, vol. 316, pp. 23–33.
11. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic

- ic vortex. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, vol. 142, pp. 2214–2223.
12. Sezai I., Mohamad A. A. Natural convection from a discrete heat source on the bottom of a horizontal enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, vol. 43, pp. 2257–2266.
13. Roche P. E., Castaing B., Chabaud B., Hebral B., Sommeria J. Side wall effects in Rayleigh–Benard experiments. *European Physical Journal B*, 2001, vol. 24, pp. 405–408.
14. Yang G., Wu J. Y. Effects of natural convection, wall thermal conduction, and thermal radiation on heat transfer uniformity at a heated plate located at the bottom of a three-dimensional rectangular enclosure. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, 2016, vol. 69, pp. 589–606.
15. Sharma A. K., Velusamy K., Balaji C. Turbulent natural convection in an enclosure with localized heating from below. *International Journal of Thermal Sciences*, 2000, vol. 46, pp. 1232–1241.
16. Verzicco R., Sreenivasan K. R. A comparison of turbulent thermal convection between conditions of constant temperature and constant heat flux. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 595, pp. 203–209
17. Johnston H., Doering C. R. Comparison of turbulent thermal convection between conditions of constant temperature and constant flux. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 102, 064501.
18. Evgrafova A., Sukhanovskii A., Kuchinskii M., Popova E. Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 208, 012016

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Евграфова А. В., Сухановский А. Н., Кучинский М. О. Влияние граничных условий нагрева на процессы теплообмена в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 2 (40). С. 68–74. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-68-74

Please cite this article in English as:

Evgrafova A. V., Sukhanovskii A. N., Kuchinskii M. O. The influence of thermal boundary conditions on heat transfer from a localized heat source. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 2 (40), pp. 68–74. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-68-74