

УДК 532.5:536.25

ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ПОДОГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ ЧАСТИЧНО ПЕРЕГОРОЖЕННОЙ КВАДРАТНОЙ ОБЛАСТИ. ЛОКАЛЬНЫЙ И СРЕДНИЙ ТЕПЛООБМЕН

© 2023 г. И. А. Ермолаев*

*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
г. Саратов, Россия*

**E-mail: iermolaev@rambler.ru*

Поступило в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 05.07.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

Представлены результаты численного исследования локального и среднего теплообмена при естественной тепловой конвекции воздуха в области квадратной формы с двумя симметричными горизонтальными перегородками (ребрами) в серединах боковых сторон. Область подогревалась снизу постоянным однородным тепловым потоком, горизонтальные границы и перегородки полагались адиабатическими, верхняя граница изотермической. Получены зависимости локального и среднего чисел Нуссельта от размеров перегородок и интенсивности конвективного течения.

DOI: 10.31857/S0040364423050046

ВВЕДЕНИЕ

В [1] методом вычислительного эксперимента были выявлены зависимости температурных полей и полей течений от размеров перегородок и значений критерия Грасгофа при свободной термогравитационной конвекции в частично перегородженной квадратной области, подогреваемой снизу. Подобная задача обусловлена рядом технических приложений и встречается в микротеплообменниках, использующихся в микрореакторах, испарителях, конденсаторах, микрокриогенных системах, а также в охлаждающих системах устройств микроэлектроники.

Особый интерес представлял режим формирования пограничного слоя (слабая или малоинтенсивная конвекция), отличающийся особенностями локального теплообмена и температурного расслоения [2–4]. В этом режиме величина температурного расслоения проходит через максимум, а локальный поток тепла на части стенки может быть меньше потока, соответствующего режиму теплопроводности. При заданной на стенке плотности теплового потока температура на этом участке выше, чем температура в режиме теплопроводности. При этом среднее значение критерия Нуссельта всегда больше единицы. Данный эффект слабой конвекции, названный “локальным перегревом стенки” [2], связан с неполнотой смешения и приводит к максимальному температурному расслоению. Чаше он связывается с условиями микрогравитации [4], однако, как следствие миниатюризации, он может сопровождать теплообмен в современных системах микроэлектроники.

К обзору работ, представленному в [1], следует добавить работы [5–7], где численно изучалась конвекция воздуха в вертикальной полости [5] и вертикальном канале [6, 7] с одним [6], двумя [7], несколькими [5] адиабатическими либо теплопроводными горизонтальными ребрами на боковых стенках. В них также отмечены существенные изменения локального теплообмена и снижение теплопереноса в связи с количеством, расположением и тепловыми свойствами перегородок.

В настоящей работе, являющейся продолжением [1], численно изучается локальный и средний теплообмен в той же области. Показано, что даже небольшие перегородки существенно снижают средний теплообмен и перераспределяют локальные тепловые потоки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассматривалась вязкая, термически сжимаемая среда с постоянными теплофизическими свойствами, для которой справедливо приближение Буссинеска. Значение числа Прандтля $Pr = 0.71$. Конвективное течение полагалось двумерным, стационарным. Расчетная область квадратная, замкнутая, высотой H с твердыми непроницаемыми стенками и симметричными горизонтальными тонкими перегородками (ребрами) длиной h в серединах боковых сторон [1]. Поскольку, несмотря на симметрию рассматриваемой области и условий на границах, возможно существование устойчивых стационарных и нестационарных несимметричных течений, рас-

сма тривалась полная расчетная область, а не ее половина с условиями симметрии на внутренней границе.

Боковые стенки и перегородки полагались адиабатическими, на нижней границе задавался постоянный по времени равномерный тепловой поток, верхняя граница изотермическая, температура ее постоянна. В начальный момент времени поле температур имеет значение, как на верхней границе T_0 , среда находится в гидростатическом равновесии в поле силы тяжести, направленной вертикально вниз, к нижней стенке подводится поток тепла. Задача решалась в декартовой системе координат, начало которой совпадало с левым нижним углом полости, оси x и y направлены горизонтально и вертикально соответственно.

Использовались безразмерные уравнения Буссинеска в переменных вихрь скорости—функция тока—температура. Безразмерные переменные определены как $X = x/H$, $Y = y/H$, $\tau = \nu t/H^2$, $U = uH/\nu$, $V = vH/\nu$, $\theta = \lambda \vartheta/(q_0 H)$. Здесь t — время; ν — коэффициент кинематической вязкости; u, v — составляющие скорости и проекции на оси x, y соответственно; $\vartheta = T - T_0$, $T_0 = 0$; λ — коэффициент теплопроводности; q_0 — поток тепла; $Gr_y = g_y \beta q_0 H^4/(\lambda \nu^2)$ — число Грасгофа; $Pr = \nu/\chi$ — число Прандтля; g_y — y -составляющая силы тяжести ($g_x = 0$); β — температурный коэффициент объемного расширения; χ — коэффициент теплопроводности.

Задача решалась методом конечных элементов Галеркина. Температура, вихрь скорости и функция тока аппроксимировались линейной комбинацией не зависящих от времени базисных функций (функций формы) на линейных треугольных конечных элементах. Для временной аппроксимации использовалась неявная двухслойная схема. Стационарные решения получены методом установления, расчетные параметры аналогичны [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В квадратной области с небольшими симметричными перегородками в серединах боковых сторон, подогреваемой снизу тепловым потоком, возможны три режима конвективного течения, показанные на рис. 1: одновихревой, двухвихревой с несимметричными вертикальными вихрями, двухвихревой с симметричными горизонтальными вихрями [1]. Течения возникают кризисно. В рэлеевской конвекции при подогреве снизу направление движения жидкости равновероятно. Для ускорения сходимости в начальный момент времени задавалось несимметричное температурное поле. Тем самым определялось направление движения жидкости.

С увеличением относительного размера перегородок критические величины критериальных чисел смещаются в сторону больших чисел Грасгофа. Это же относится к значению числа Грасгофа, со-

ответствующему максимуму температурной стратификации.

Запишем местное конвективное число Нуссельта как отношение конвективной и кондуктивной компонент:

$$Nu_x = \frac{q_{cv} \theta_{cd}}{q_{cd} \theta_{cv}},$$

где q_{cv} , q_{cd} — местные конвективный и кондуктивный безразмерные тепловые потоки в движущейся и неподвижной жидкости на соответствующей стенке; θ_{cd} , θ_{cv} — местные кондуктивные и конвективные безразмерные температуры в движущейся и неподвижной жидкости на той же стенке. При фиксированных на границах области температурах $Nu = q_{cv}/q_{cd}$, при заданном тепловом потоке $Nu = \theta_{cd}/\theta_{cv}$. Среднее значение критерия Нуссельта

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H} \int_0^H Nu(x) dx.$$

Изменения локального теплообмена на нагреваемой нижней стенке с ростом интенсивности конвекции при наличии перегородок различных размеров показаны на рис. 2. Температурное поле на нижней границе неоднородно (рис. 1). Кривые 1 (рис. 2а–2в) соответствуют неперегороженной полости. Здесь при одновихревом течении нагретый вблизи нижней границы воздух поднимался вдоль левой стенки. Максимум температурной стратификации для неперегороженной области приходится на число Грасгофа $Gr \approx 5 \times 10^3$. Поэтому кривая 1 соответствует уже развитому пограничному слою. Теплообмен в правой части области заметно выше, чем в левой. Это связано с движением вдоль правой боковой стенки охлажденного вблизи верхней границы воздуха. При значениях $Gr \geq 10^5$ безразмерный коэффициент теплоотдачи становится приблизительно постоянным на трети нижней границы (кривая 1 на рис. 2в).

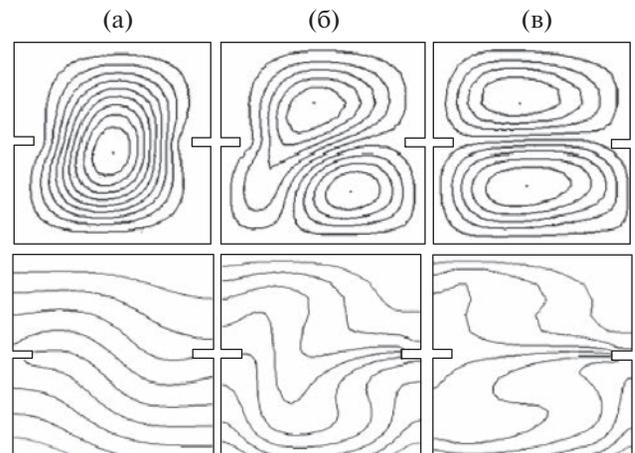


Рис. 1. Линии тока (сверху) и изотермы (снизу) при $h/H = 0.1$: (а) — $Gr = 10^4$, (б) — 2×10^5 , (в) — 10^6 .

Наличие даже небольших перегородок размером $h/H = 0.1$ приводит к изменению течения и теплообмена в области. Восходящие и нисходящие вдоль боковых стенок потоки отклоняются перегородками, что приводит как к снижению интенсивности общего теплообмена, так и к перераспределению местных потоков тепла (кривая 2 на рис. 2а–2в, кривые 1–4 на рис. 2г). В частности, это приводит к ослаблению теплообмена вблизи правой части нижней границы.

Одновихревое течение при $h/H = 0.1$ существует до $Gr \approx 10^5$, максимум температурной стратификации соответствует числу Грасгофа 8×10^3 , режим формирования пограничного слоя (слабая, малоинтенсивная конвекция) приходится на интервал $6 \times 10^3 < Gr < 10^4$. В этом интервале возникает зона локального перегрева в левом нижнем углу области (рис. 2г, кривая 1), где локальное число Нуссельта меньше единицы. Теплообмен также интенсивнее в правой части области. С дальнейшим ростом числа Грасгофа локальное число Нуссельта становится приблизительно постоянным на половине границы (кривые 2–4 на рис. 2г).

При $Gr \approx 10^5$ возникает двухвихревое течение с несимметричными вертикальными вихрями, что приводит к ослаблению теплообмена (кривая 2 на рис. 2б, кривая 5 на рис. 2г) особенно вблизи нижних углов области. В правой нижней части формируется замкнутая циркуляция воздуха. Нисходящий поток охлажденного вблизи верхней границы воз-

духа смещается к центру нижней стенки, где у локального числа Нуссельта появляется максимум.

Наконец, при $Gr \approx 3.5 \times 10^5$ формируется двухвихревое течение с симметричными горизонтальными вихрями, что также приводит к существенному изменению локального и среднего теплообмена (кривая 2 на рис. 2в). Течение разделяется на две циркуляционные зоны в верхней и нижней частях области, разделенной перегородками. Причем в нижней части нагретый воздух поднимался вдоль правой стенки, а в верхней вдоль левой. Соответственно, холодный поток попадал к левой части нижней границы, чем и обусловлена величина и распределение локального числа Нуссельта на рис. 2г (кривые 6, 7). Где местный поток тепла высок и равномерен на левой половине границы и заметно меньше, чем поток тепла при одновихревом режиме на правой половине.

Перегородки с относительным размером $h/H = 0.2$ еще более снижают теплообмен и изменяют локальные потоки тепла (кривая 3 на рис. 2а–2в). В отличие от предыдущих случаев здесь формировалось одновихревое течение, где нагретый воздух поднимался вдоль правой стенки. Интервал слабого (малоинтенсивного) конвективного течения иллюстрирует кривая 3 на рис. 2а. Здесь зона локального перегрева существует в правом нижнем углу области. Кривые 3 на рис. 2б, 2в соответствуют режиму развитой стационарной конвекции, при $Gr \approx 7 \times 10^5$ возникло двухвихревое несимметричное течение.

Зависимости среднего безразмерного коэффициента теплоотдачи на подогреваемой стенке от числа Грасгофа показаны на рис. 3. Зависимости носят качественно различный характер для перегородочной и перегородочной областей. Наличие

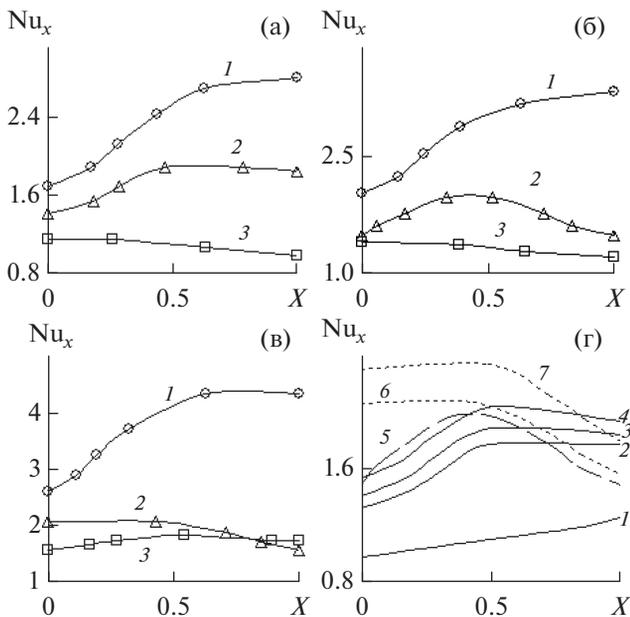


Рис. 2. Зависимости местного числа Нуссельта от критерия Грасгофа и относительного размера перегородок при $Y = 0$, (а) – $Gr = 4 \times 10^4$, (б) – 10^5 , (в) – 4×10^5 ; 1 – $h/H = 0$, 2 – 0.1, 3 – 0.2; (г) – $h/H = 0.1$: 1 – $Gr = 9 \times 10^3$, 2 – 3×10^4 , 3 – 4×10^4 , 4 – 6×10^4 , 5 – 10^5 , 6 – 4×10^5 , 7 – 8×10^5 .

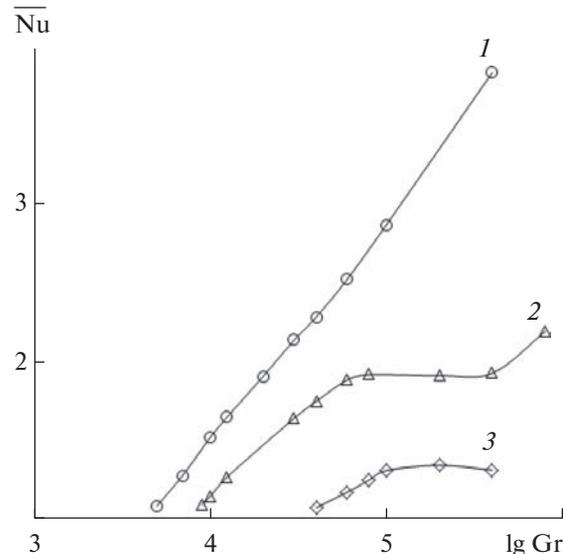


Рис. 3. Изменения среднего числа Нуссельта с ростом интенсивности конвекции: 1 – $h/H = 0$, 2 – 0.1, 3 – 0.2.

перегородок приводит к существенному ослаблению теплообмена. Изменения среднего числа Нуссельта с ростом интенсивности течения становятся немонотонными (кривые 2, 3 на рис. 3). С возникновением двухвихревого асимметричного течения средний коэффициент теплообмена почти не меняется – в интервале $10^5 < Gr < 3.5 \times 10^5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие небольших симметричных горизонтальных перегородок (ребер) в серединах боковых сторон подогреваемой снизу квадратной области приводит к формированию нескольких режимов конвективного течения, кризисно возникающих при больших, чем в неперегородочной полости, значениях числа Грасгофа и значительно отличающихся распределением местных потоков тепла и общим характером теплопереноса.

Внутренние ребра даже относительно небольших размеров существенно подавляют теплоперенос естественной конвекцией, приводят к возникновению многовихревых режимов течения, делают зависимость среднего числа Нуссельта от интенсивности конвекции немонотонной. Максимум температурного расслоения смещается в сторону больших значений критерия Грасгофа. Максимум же местного теплового потока может располагаться как в левой, так и в правой частях

подогреваемой стенки в зависимости от режима течения и размера перегородок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермолаев И.А.* Естественная термогравитационная конвекция в подогреваемой снизу частично перегородочной квадратной области // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 571.
2. *Авдеевский В.С., Полежаев В.И.* Некоторые особенности естественной конвекции жидкостей и газов. В кн.: Избранные проблемы прикладной механики. М.: ВИНТИ, 1974. С. 11.
3. *Полежаев В.И.* Эффект максимума температурного расслоения и его приложения // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218. № 4. С. 783.
4. *Полежаев В.И.* Конвекция и процессы тепло- и массообмена в условиях космического полета // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 5. С. 67.
5. *Терехов В.И., Терехов В.В.* Теплообмен в высоком замкнутом вертикальном канале с оребрением одной из сторон // ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 439.
6. *Терехов В.И., Экаид А.Л., Яссин Х.Ф.* Теплообмен при ламинарной свободной конвекции и отрывном течении за ребром в вертикальном канале с изотермическими стенками // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. № 4. С. 593.
7. *Terekhov V.I., Ekaid A.L., Yassin K.F.* Laminar Free Convection Heat Transfer and Separated Flow Structure in a Vertical Channel with Isothermal Walls and Two Adiabatic Opposing Fins // J. Eng. Thermophys. 2017. V. 26. № 3. P. 346.