

УДК 536.34

Теплообмен при ламинарной свободной конвекции и отрывном течении за ребром в вертикальном канале с изотермическими стенками*

В.И. Терехов^{1,2}, А.Л. Экаид³, Х.Ф. Яссин^{2,4}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

³Технологический университет, Багдад, Ирак

⁴Северный технический университет, Киркук, Ирак

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты численного расчета свободной ламинарной конвекции и теплообмена между двумя параллельными изотермическими пластинами при наличии на поверхности канала одиночного ребра. Исследования проведены для канала с удлинением $AR = L/w = 10$, где L — высота канала, а w — расстояние между пластинами. Бесконечно тонкое адиабатное ребро располагалось на одной из стенок канала на половине его высоты. Относительная высота ребра l/w изменялась в диапазоне $0 \div 0,8$. Температура стенок была выше температуры окружающей среды, а число Релея изменялось в диапазоне $Ra = 10^2 \div 10^5$. Основное внимание уделено изучению влияния высоты ребра и числа Релея на локальный и интегральный теплообмен и число Рейнольдса в канале (конвективную тягу). Показано принципиальное отличие распределения теплоотдачи по высоте канала на стенке с ребром и на гладкой поверхности. Проведены сопоставления результатов расчета со случаем симметричного распределения ребер на обеих стенках с суммарной высотой, равной одиночному ребру.

Ключевые слова: ламинарная свободная конвекция, теплообмен, отрыв потока.

Введение

Необходимость изучения естественной конвекции в вертикальных каналах возникает в связи с ее наличием во многих инженерных приложениях, например, при охлаждении электрического и электронного оборудования, в ядерных реакторах, в системах вентиляции домов, а также во многих энергетических аппаратах. С целью дальнейшего повышения эффективности охлаждения оборудования и развития фундаментальных представлений о свободно-конвективных течениях важным этапом является проведение комплексных исследований закономерностей тепломассопереноса и расхода газа между пластинами (конвективной тяги) в широком диапазоне изменения параметров. При этом актуальным

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 16-58-00018) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-8780.2016.8.

является вопрос о ламинарном режиме течения, который реализуется, например, в зазорах вентилируемых фасадов [1, 2], стенах Тромба [3, 4] или конструкциях солнечных панелей, устанавливаемых на вертикальных поверхностях зданий и сооружений [5].

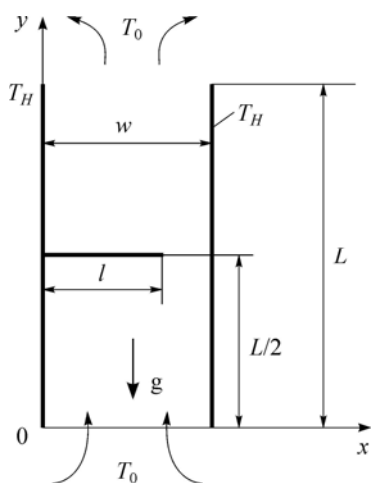
Течение и теплообмен в вертикальных прослойках с гладкими стенками изучены достаточно подробно [6–9], чего нельзя сказать о каналах с оребренными поверхностями. В литературе в большей мере представлены данные по замкнутым прослойкам с дифференциальным подогревом боковых стенок [10–12]. Каналы с открытыми границами, картина течения в которых имеет принципиально иной вид по сравнению с замкнутыми прослойками, изучались фрагментарно [12–14] несмотря на большое прикладное значение таких работ.

В работе [15] были представлены результаты численного исследования течения и теплообмена в вертикальном плоском канале при симметричном расположении ребер на обеих стенках друг против друга. Данные исследования свидетельствовали о подавлении теплообмена при увеличении высоты адиабатических ребер, что обуславливалось сильным уменьшением расхода газа через канал за счет роста гидравлических потерь. Построенные режимные карты позволяют определять интенсивность теплоотдачи и конвективную тягу, создаваемую в канале гравитационными силами.

Настоящая работа является развитием исследований в этом направлении, но в отличие от данных [15] здесь рассматривается развитие динамического и теплового поля при установке ребра только на одной стенке. Все остальные режимные и геометрические параметры оставлены такими же, как и в работе [15], что дало возможность провести сопоставление результатов вычисления для этих двух случаев. При этом основное внимание было уделено анализу интегральных характеристик теплообмена и течения.

Постановка задачи. Метод решения

Схема течения демонстрируется на рис. 1. Две вертикальные параллельные пластины с постоянной и одинаковой температурой T_H расположены на расстоянии w друг от друга. Высота их равна L , а параметр удлинения в расчетном исследовании не изменялся: $AR = 10$. Посредине канала ($y/L = 5$) на одной из стенок располагалось тонкое (толщиной, равной шагу расчетной сетки) не теплопроводное ребро варьированной высоты $l/w = 0 \div 0,8$. Сторону, на которой располагалось ребро, для краткости будем называть левой, а противоположную стенку — соответственно, правой. Температура окружающей среды до входа и после выхода из канала имела одно и то же значение и была ниже температуры стенок: $T_H > T_0$.



Характеристики ламинарного течения и теплообмена в канале были получены из численного решения системы уравнений Навье–Стокса в двумерной постановке с использованием приближения Бусинеска. Уравнения движения и энергии приводились к безразмерному виду с использованием в качестве характерного линейного масштаба ширины зазора w , скорости $u_{ref} = [g\beta(T_H - T_0)w]^{1/2}$ и температуры $\theta = (T - T_0)/(T_H - T_0)$. Число Рейля изменялось в диапазоне $Ra = 10^2 \div 10^5$, а число Прандтля было постоянным: $Pr = 0,7$.

Рассматриваемая краевая задача имеет неизвестные условия на входе и на выходе между пластинами, поэтому расчетная область кроме пространства

Рис. 1. Схема течения.

между пластинами включает два дополнительных прямоугольника у входа и выхода канала с мягкими граничными условиями. Оптимальный размер этих областей и число расчетных узлов определялись в серии численных экспериментов и верификацией на опытных данных, полученных в более простых условиях. Как правило, линейный размер входной и выходной областей был не меньше, чем высота пластины L . Описание условий на границах дано в работах [8, 9, 15]. Там же приведена схема численной реализации, методика решения, анализ сеточного разрешения и результаты тестирования.

Результаты расчетов и их обсуждение

Рассмотрим изменение локального числа Нуссельта $Nu = 2\alpha w/\lambda$ по высоте канала, здесь α и λ — коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности газа соответственно. Расчетные данные для случая установки самого высокого ребра $l/w = 0,8$ при вариации числа Ra демонстрируется на рис. 2. Значения числа Nu на левой и правой стенках в силу отсутствия симметрии течения принципиально отличаются между собой. Так, на правой гладкой стенке в сечении ребра за счет ускорения потока формируется значительный локальный максимум. Напротив, на стенке с ребром из-за торможения потока в месте сопряжения ребра со стенкой интенсивность теплоотдачи при всех числах Релея близка к нулю. Течение в канале до ребра в целом сохраняет симметрию, поэтому интенсивность теплообмена на правой и левой стенках одинакова. В области за ребром, где формируется отрыв потока, течение не успевает восстанавливаться и число Nu на левой стенке заметно ниже, чем на правой.

Влияние высоты ребра на теплоперенос наглядно демонстрируется на рис. 3. Так же, как это было показано на рис. 2, теплообмен на обеих стенках при всех значениях высоты ребра, за исключением самого большого ($l/w = 0,8$), в зоне до отрыва потока практически одинаков и совпадает по величине с теплообменом в канале без преграды. Распределение числа Нуссельта по высоте левой стенки за преградой (рис. 3а) принципиально отличается от такового на правой стенке (рис. 3б). Уровень интенсивности теплопереноса здесь всегда ниже, чем в гладком канале, и его величина значительно понижается для более высоких ребер. При этом следует иметь в виду, что кроме структурных изменений аэродинамики течения, вызванных отрывом потока, большое влияние может оказывать расход газа через канал, который формируется подъемными силами и величина которого зависит не только от числа Релея, но и от высоты преграды.

Зависимости числа Рейнольдса $Re = 2U_m w/\nu$, где U_m — среднемассовая скорость в канале, и интегрального по высоте числа Нуссельта Nu_m демонстрируются на рис. 4а и 4б соответственно. Здесь представлены результаты для гладкого канала, канала с ребром на обеих стенках (симметричная геометрия) [15] и с ребром на одной стенке (несимметричная геометрия) с такой же суммарной высотой ребра ($l/w = 0,8$), что и для симметричного случая. Как видно, наличие ребра приводит к значительному (в 3÷5 раз) снижению числа Рейнольдса, причем эта разница практически не меняется во всем диапазоне чисел Релея. В то же время конвективная тяга в канале слабо зависит

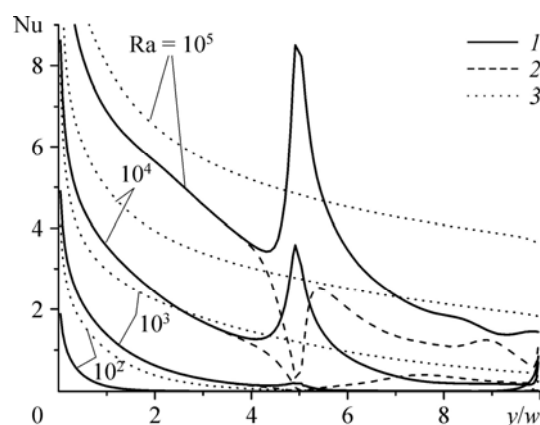


Рис. 2. Изменение числа Нуссельта по длине канала.

$l/w = 10$, $l/w = 0,8$; 1 — гладкая стенка (правая),
2 — стенка с ребром (левая),
3 — канал без ребра.

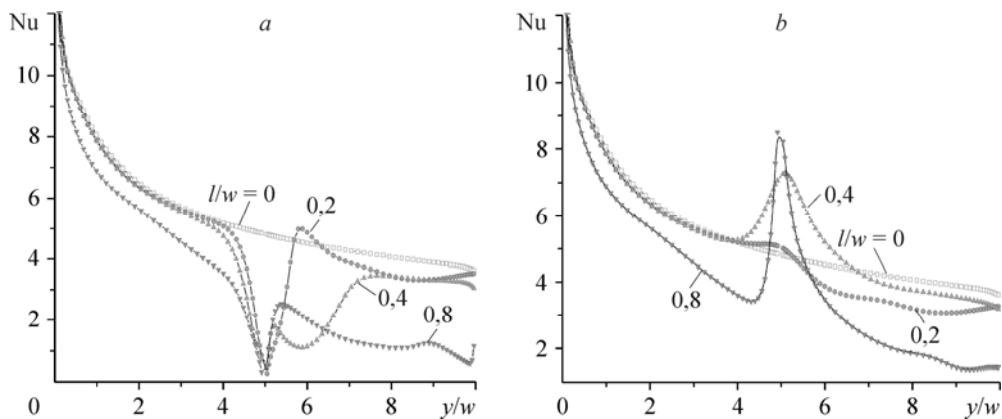


Рис. 3. Влияние высоты ребра на локальный теплообмен при $Ra = 10^5$.
 а — левая стенка, б — правая стенка.

(не более 30 %) от того, на одной стенке расположено ребро или на обеих. Превалирующим фактором здесь является суммарная высота ребра. Расчеты также показали весьма сложные закономерности изменения конвективной тяги от высоты ребра l/w , что требует дополнительного изучения.

Из-за более высокого значения конвективной тяги интегральный теплообмен в гладком канале значительно выше по сравнению с каналом при наличии ребра. Это наглядно следует из рис. 4б, где показаны расчетные данные для среднего по обеим стенкам числа Нуссельта. Особенно сильно установка ребра подавляет теплообмен при малых числах Рейлея. Действительно, при $Ra = 10^2$ теплоотдача в оребренном канале снижается более чем в 4 раза, а в области высоких чисел Рейлея ($Ra = 10^5$) всего на ~50 %. Интенсивность среднего теплообмена, как и величина конвективной тяги, практически не зависит от того, расположены ли два ребра симметрично на противоположных стенках, или присутствует только одно ребро на одной стенке, но с одной и той же суммарной их высотой. При этом в области малых чисел Рейлея более интенсивно теплообмен протекает при симметричной установке ребер на противоположных стенках.

Таким образом, в развитие работы [15] изучены аэродинамика и теплообмен при свободной ламинарной конвекции между двумя вертикальными изотермическими пластинами при установке нормально к поверхности адиабатического ребра различной высоты. Показано принципиальное отличие в распределении локального теплообмена

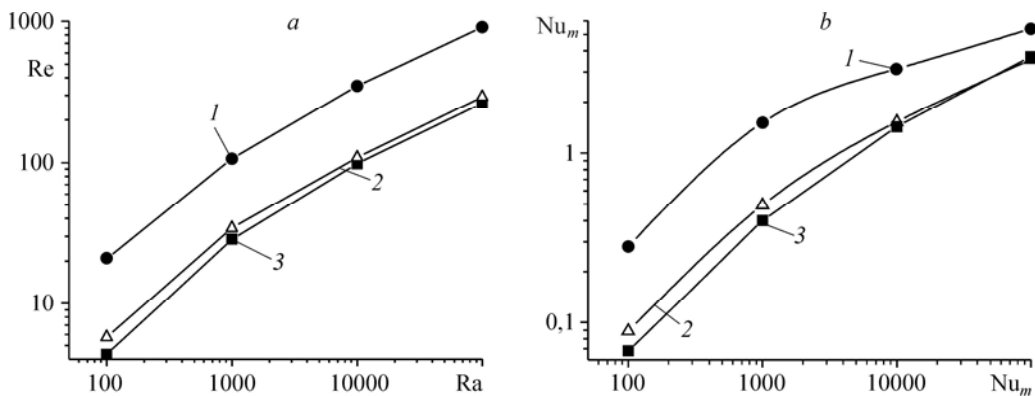


Рис. 4. Число Рейнольдса (а) и интегральный теплообмен (б) в гладком и оребренном каналах.
 $AR = 10, l/w = 0,8$; гладкий канал (1), два симметричных ребра (2), несимметричные ребра (3).

на гладкой и оребренной стенках. Главным выводом работы является значительное снижение числа Рейнольдса и интегрального числа Нуссельта в канале с оребрением. Особенно сильно установка ребра сказывается в области малых чисел Релея. При этом симметричный случай, рассмотренный в работе [15] (ребра расположены на противоположных стенках), практически не отличается от несимметричного, когда ребро расположено только на одной стенке. Полученные данные позволяют качественно и количественно прогнозировать тепловой и аэродинамический режимы течения в вертикальных каналах при наличии ребер на поверхности в различных инженерных приложениях. Отметим также, что значительная часть вопросов требует детальных исследований. К наиболее актуальным из них можно отнести влияние параметра удлинения AR , месторасположения ребер, их числа и теплопроводности материала.

Список литературы

1. Pomponi F., Piroozfar P.A.E., Southall R., Ashton R., Farr E.R.P. Energy performance of double-skin façades in temperate climates: a systematic review and meta-analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 1525–1536.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // *Журнал АВОК*. 2004. № 2. С. 20–26.
3. Shen J., Lassue S., Zalewski L., Huang D. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls // *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39. P. 962–974.
4. Smolec W., Thomas A. Theoretical and experimental investigations of heat transfer in a trombe wall // *Energy Conversation Management*. 1993. Vol. 34, iss. 5. P. 385–400.
5. Tkachenko O.A., Timchenko V., Giroux-Julien S., Menezo C., Yeoh G.H., Reizes J.A., Sanvicente E., Fossa M. Numerical and experimental investigation of unsteady natural convection in a non-uniformly heated vertical open-ended channel // *Int. J. Thermal Sci.* 2016. Vol. 99. P. 9–25.
6. Elenbaas W. Heat dissipation of parallel plates by free convection // *Physica*. 1941. Vol. IX, No. 1. P. 2–28.
7. Bar-Cohen A., Rohsenow W.M. Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates // *J. Heat Transfer*. 1984. Vol. 106. P. 116–123.
8. Терехов В.И., Экаид А.Л. Турбулентная свободная конвекция между вертикальными изотермическими пластинами с несимметричным нагревом // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 2. С. 153–164.
9. Terekhov V.I., Ekaid A.L., Yassin K.F. Laminar free convection heat transfer between vertical isothermal plates // *J. Eng. Thermophys.* 2016. Vol. 25, No. 4. P. 509–519.
10. Scozia R., Frederick R.L. Natural convection in slender cavities with multiple fins attached to an active wall // *Numerical. Heat Transfer*. 1991. Vol. 20. P. 127–158.
11. Terekhov V.V., Terekhov V.I. Numerical investigation of heat transfer in tall enclosure with ribbed walls // *Comput. Thermal Sci.* 2010. Vol. 2, iss. 1. P. 33–42.
12. Терехов В.В., Терехов В.И. Свободноконвективный теплообмен в дифференциально обогреваемой вертикальной полости при дополнительном подводе тепла через нижнюю стенку // *Теплофизика высоких температур*. 2012. Т. 50, № 1. С. 96–103.
13. Tanda G. Natural convective heat transfer in vertical channels with low-thermal-conductivity ribs // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2008. Vol. 29. P. 1319–1325.
14. Abidi-Saad A., Kadja M., Popa C., Polidori G. Effect of adiabatic square ribs on natural convection in an asymmetrically heated channel // *Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 53. P. 743–752.
15. 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. Vol. 26, No. 3. P. 346–362.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2017 г.