

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛООБМЕНА НА БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ И ДНЕ УЗКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты численного исследования структуры течения и теплообмена в высокой замкнутой прослойке при вариации теплоподвода к её дну. Вертикальные стенки были изотермическими, и перепад температур между ними был постоянным. Численно решались нестационарные уравнения Навье - Стокса в двумерной постановке для ламинарного режима течения. При малых числах Рейля ($Ra \approx 10^3$), когда превалирует кондуктивный теплоперенос, влияние подвода теплоты снизу приводит к изменению теплопередачи только в непосредственной окрестности дна. С ростом числа Рейля и величины подводимой теплоты наблюдается дестабилизация течения, приводящая к сильной неравномерности плотности теплового потока по высоте стенки. При этом на горячей вертикальной стенке тепловой поток при определенных числах Рейля и нагревах снизу может изменить знак на противоположный.

1. ВВЕДЕНИЕ

Возросший в последнее время интерес к изучению теплообмена в протяженных прослойках обусловлен чрезвычайно широкими практическими приложениями подобных конструкций. Замкнутые газовые прослойки обладают хорошими теплоизоляционными свойствами и используются в энергоустановках различного назначения. Наиболее характерным объектом с высокими воздушными прослойками являются светопрозрачные ограждающие конструкции. Интерес к ним усилился еще и благодаря бурному развитию технологий современных стеклопакетов. Об этом говорит большое число экспериментальных и теоретических работ [1—6], в которых подробно исследована динамическая и тепловая картины многоячейной конвекции, построены карты режимов течения. Верхняя и нижняя стенки в этих работах принимались адиабатическими. В ряде практических задач через торцевые поверхности прослойки может подводиться тепловой поток [7—9]. Так, например, нагрев нижней части стеклопакета приводит к более равномерному распределению температур по высоте прослойки [9]. Однако подробных численных и опытных исследований с нагревом дна замкнутых высоких прослоек до настоящего времени не проводилось. В данной работе изучается влияние интенсивности теплового потока на дне прямоугольной полости на течение и теплообмен в прямоугольных замкнутых прослойках.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается вертикальная замкнутая прослойка шириной L и высотой H . Относительная высота принималась равной $A = H/L = 16$. Температура вертикальных стенок была постоянной по высоте и равнялась соответственно T_{hot} и T_{cold} . Тепловой поток к дну прослойки подводился равномерно, а его суммарная величина изменялась в пределах $\bar{Q} = Q_W / Q_0 = 0 \div 2$, где Q_0 — интегральное значение теплоты, переносимое через прослойку в режиме теплопроводности при $Ra = 10^3$, и при отсутствии дополнительного теплоподвода $\bar{Q} = 0$. Лучистый теплоперенос в расчётах не учитывался.

Расчёты были проведены в диапазоне чисел Рейля $Ra = 10^3 \div 5 \cdot 10^4$. Этот интервал охватывает режим теплопроводности и многоячейной ламинарной конвекции [4]. При нагреве в прослойке мог реализовываться и нестационарный режим течения.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ, ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Решение нестационарной системы уравнений Навье- Стокса в двумерной постановке проводилось в переменных «завихренность — функция тока». При решении уравнения для завихренности использовался метод переменных направлений. Для дискретизации диффузионных членов была использована центрально-разностная схема второго порядка точности, а для конвективных — противопоточная третьего порядка точности. Уравнение для функции тока (уравнение Пуассона) дискретизовалось центральными разностями второго порядка точности, получаемая система линейных уравнений решалась при помощи модифицированной сильно неявной процедуры. Представленные стационарные решения были получены как предел нестационарных.

На предварительном этапе был проведен анализ влияния количества узлов сетки на точность получаемого решения. В результате было получено, что достаточная степень точности достигается при использовании сетки 64×384 . При дальнейшем увеличении количества узлов изменение распределения величин тепловых потоков на стенке, завихренности, компонент скорости и других параметров не превышало 0.1 %.

Величина шага по времени была ограничена условиями устойчивости численной схемы и для получения стационарных решений подбиралась таким образом, чтобы получить последнее с минимальны-

ми затратами вычислительных ресурсов. При рассмотрении нестационарных процессов величина шага по времени так же, как в случае пространственной дискретизации, определялась таким образом, чтобы решение не зависело от неё.

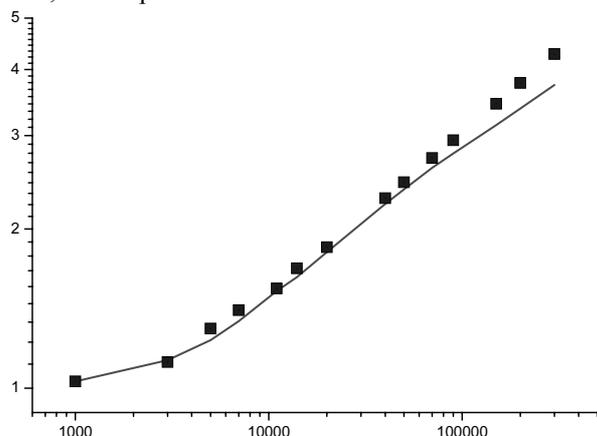


Рис. 1. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, $A = 16$: точки — эксперимент — [2], линия — настоящий расчет

Результаты тестовых расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными [2] по интегральному числу Nu в прослойке с $A = 16$ и изотермическими боковыми стенками. Результаты сопоставления показаны на рис. 1. Как видно, результаты расчета хорошо описывают опытные данные до $Ra < 10^5$. При больших числах Релея корреляция данных ухудшается, что обусловлено переходом к турбулентному режиму конвекции в прослойке [4].

Тестовые расчеты при нестационарном течении сравнивались с численными исследованиями работы [10]. Получено хорошее соответствие результатов по измерению по времени локальных чисел Нуссельта и кинетической энергии потока.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуализация течения и поля температур в прослойке при вариации числа Ra и интенсивности теплоподвода \bar{Q} представлены на серии рис.2. При отсутствии подогрева снизу (рис. 2, а—в) при малых числах Ra имеет место режим теплопроводности (рис. 2, а), переходящий затем в многоячейчатый (рис. 2, б), а при числах $Ra=5 \cdot 10^4$ (рис. 2, в) течение вновь переходит к одноячейчатой структуре.

При относительно слабых нагревах ($\bar{Q} = 0.5$) и небольших числах $Ra=10^3$ (рис. 2, г) влияние подогрева сказывается только в непосредственной окрестности дна; в основном же объеме прослойки возмущения, вызванные нагревом, практически отсутствуют. В режиме многоячейчатой конвекции (рис. 2, д, $Ra = 10^4$) подогрев дестабилизирует течение, ячеек при этом становится больше, а температурное поле более возмущенным. При больших числах $Ra = 5 \cdot 10^4$ (рис. 2, е) течение становится нестационарным и в нижней части прослойки форми-

руется интенсивный вихрь, приводящий к интенсификации теплопереноса.

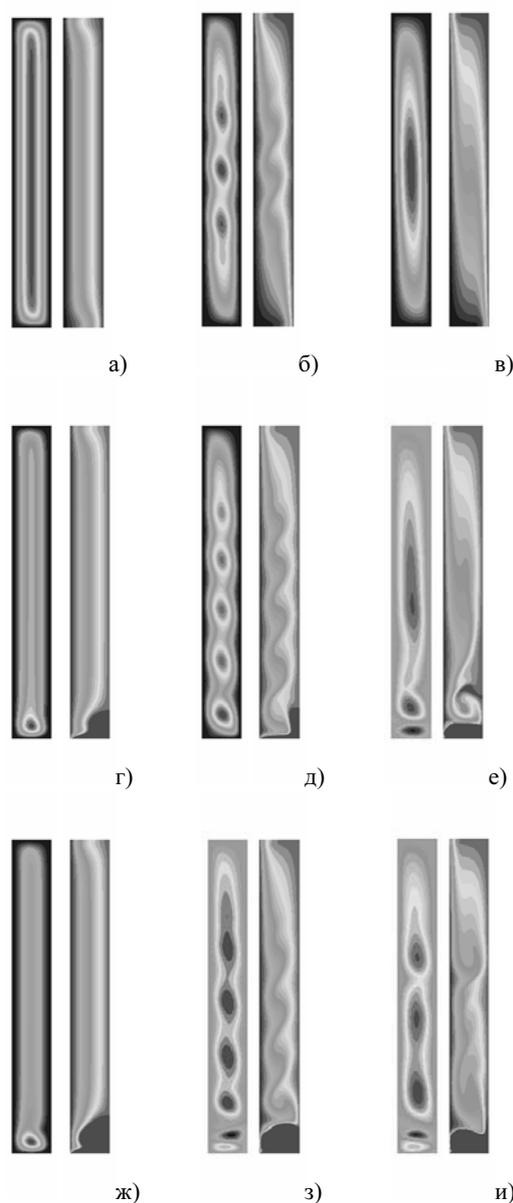


Рис. 2. Распределение функции тока и температуры в прослойке при различных числах Релея и теплоподводах: а—в — $\bar{Q} = 0$, г—е — $\bar{Q} = 1$, ж—и — $\bar{Q} = 2$. а, г, ж — $Ra = 10^3$, б, д, з — $Ra = 10^4$, в, е, и — $Ra = 5 \cdot 10^4$

При интенсивных подогревах ($\bar{Q} = 2$; рис. 2, ж—и) происходит еще большая интенсификация теплообмена, зона повышенной температуры у дна занимает большее пространство, а режим многоячейчатой конвекции начинает разрушаться за счет интенсивной конвекции от нагретого дна.

Отмеченные на рис. 2 особенности структуры конвективного течения при подводе теплоты к нижней стенке прослойки сказываются на распределении по её высоте локальных коэффициентов теплоотдачи. В качестве примера на рис.3 показано поведение числа Nu вдоль боковой холодной стенки. Без

подогрева (рис. 3, а) наглядно демонстрируется тепловая картина перехода с ростом числа Ra от режима теплопроводности и многоячейковой конвекции ($Ra = 10^4$) к дальнейшему её разрушению при $Ra = 5 \cdot 10^4$. Подогрев дестабилизирует течение, но при малых нагревах (рис. 3, б) наиболее сильное изменение коэффициента теплоотдачи наблюдается в непосредственной окрестности дна, а также в верхней части прослойки, где происходит разворот потока. С увеличением подводимого потока растут и значения максимумов температур в нижней части (рис. 3, в) и соответственно в верхней части прослойки.

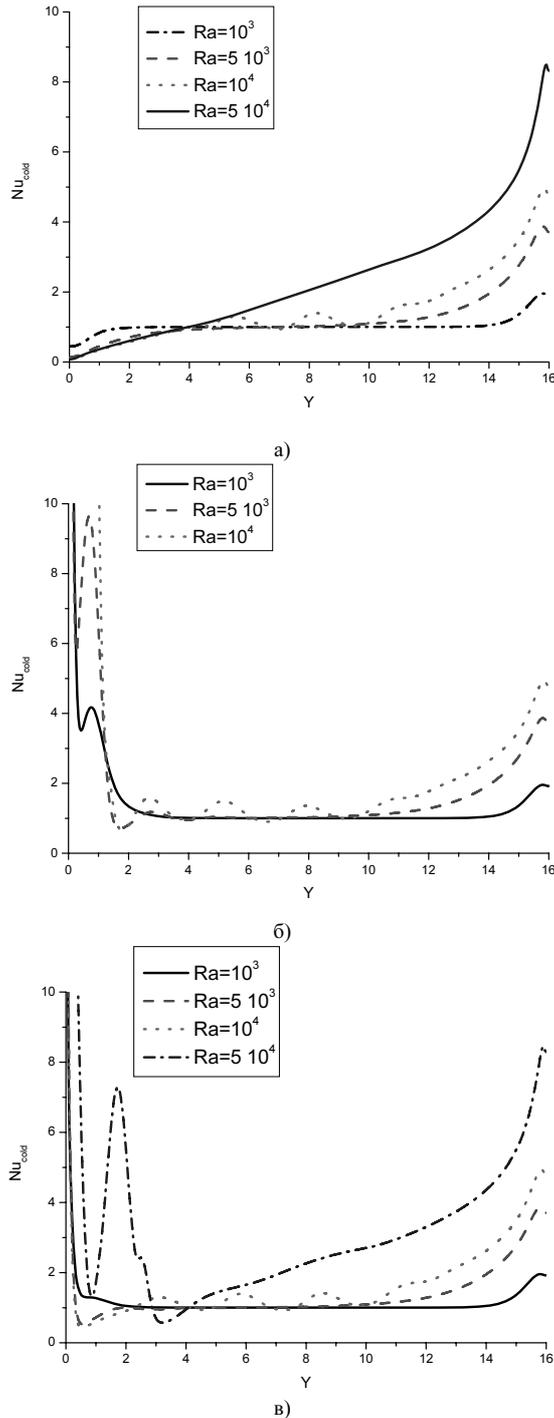


Рис. 3. Распределение теплового потока на холодной стенке: а — $\bar{Q} = 0$, б — $\bar{Q} = 0.5$, в — $\bar{Q} = 2$

Еще более сложный сценарий развития структуры теплового слоя имеет место на горячей стенке. Начиная с определенных подогревов \bar{Q} , температура воздуха внутри прослойки становится выше температуры стенки и тепловой поток меняет знак на противоположный. Это следует из рис. 4, а, где показана зависимость интегрального числа \bar{Nu} на горячей стенке от числа Ra и интенсивности нагрева \bar{Q} . Изменение знака теплового потока на противоположный наблюдается в диапазоне $\bar{Q} = 1$, когда значение подводимой тепловой энергии соответствует теплопереносу через прослойку теплопроводностью. Дальнейшее увеличение подогрева приводит к росту теплового потока, направленного из прослойки через горячую стенку.

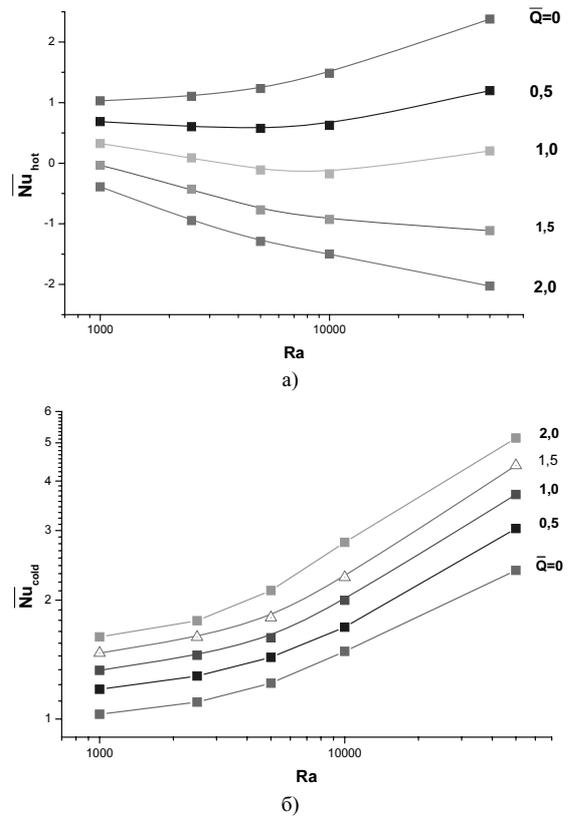


Рис. 4. Зависимость среднего числа Нуссельта по горячей (а) и холодной (б) поверхностям от числа Рейля и степени подогрева

Для холодной боковой поверхности (рис. 4, б) наблюдается монотонное возрастание коэффициента теплоотдачи с ростом степени подогрева. При этом интенсификация может достигать больших значений, особенно при больших значениях числа Рейля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта №-04-02-16070-а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана физико-математическая модель свободноконвективного теплообмена в высоких прослойках с изотермическими стенками и нагревом нижней поверхности. Численные исследования

показали, что в режиме теплопроводности ($Ra \approx 10^3$) дополнительный теплоподвод сказывается на течении и теплообмене только в непосредственной окрестности дна. В режиме многоячейковой конвекции ($Ra \approx 10^4$) нагрев дестабилизирует течение, что в итоге приводит к нестационарному течению в слое. Дополнительный теплоподвод интенсифицирует теплообмен, а на горячей вертикальной стенке при интенсивном подводе тепла направление теплового потока изменяется на противоположное — из полости в окружающую среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-16070-а).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A = H/L$ — геометрический параметр прослойки;

H — высота прослойки, м;

L — ширина прослойки; м

$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$ — число Нуссельта;

\bar{Q} — параметр подогрева;

$Ra = g\beta(T_{hot} - T_{cold}) \cdot L^3 / \nu \cdot a$ — число Релея;

T — температура, градус;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град);

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

β — коэффициент объемного расширения газа, 1/Т;

a — коэффициент температуропроводности, м²/с;

ν — кинематическая вязкость, м²/с;

g — ускорение тяготения, м/с².

Индексы:

O — режим теплопроводности;

hot — горячая стенка;

$cold$ — холодная стенка;

«-» — средняя, интегральная величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wright J.L., Sullivan H.E.** Natural convection in sealed glazing units: a review // ASHRAE Transaction. 1989. V. 95. № 1. P. 592—602.
2. **ElSherbiny S.M., Raithby G.D., Hollands K.G.** Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers // J. of Heat Transfer. 1982. V. 104. P. 96—102.
3. **Математическое** моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Везуб и др. М.: Наука, 1987. 271 с.
4. **Wakitani S.** Flow patterns of natural convection in an air-filled vertical cavity // Physics of Fluids. 1998. V. 10. № 8. P. 1924—1928.
5. **Lartigue B., Lorente S., Bourret B.** Multicellular natural convection in a high aspect ratio cavity: experimental and numerical results // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. V. 43. P. 3157—3170.
6. **Грищенко В.В., Низовцев М.И., Терехов В.В., Терехов В.И.** Математическое моделирование теплообмена в межстекольном промежутке окна // Известия вузов, Строительство. 2002. № 7. С. 72—75.
7. **Mohamad A.A., Sicard J., Bennacer R.** Natural convection in enclosures with floor cooling subjected to a heated vertical wall // International J. Heat and Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 108—121.
8. **Oosthuizen P.H., Paul J.T.** Natural convection in a rectangular enclosure with two heated sections on the low surface // International J. Heat and Fluid Flow. 2005. V. 26. P. 587—596.
9. **Низовцев М.И., Терехов В.И., Гныря Л.И., Петров Е.В.** Влияние обогрева межстекольного пространства на сопротивление теплопередаче стеклопакета // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 11. С. 74—79.
10. **Zhu Z.J., Yang H.X.** Numerical investigation of transient laminar convection of air in a tall cavity // Heat and Mass Transfer. 2003. V. 39. P. 579—587.