

УДК 532.5+536.3

**Излучение не серого газа в сочетании
с естественной конвекцией
внутри квадратной полости
с внутренним источником тепла**

А. Мазгар¹, Ф. Хажжи², К. Жаррэ², Ф.Б. Нежма²

¹*Университет Суса, Сус, Тунис*

²*Университет Монастира, Монастир, Тунис*

E-mail: mazgarakram@yahoo.fr

Исследование направлено на изучение влияния излучения газа на ламинарную естественную конвекцию в квадратной полости с внутренним тепловыделением. Реализовано изотермическое охлаждение стенок полости, в то время как температура внутреннего нагревателя поддерживалась постоянной. Из проведенного анализа следует, что тепловое излучение интенсифицирует вихревое движение в полости, обеспечивая однородность температурного поля. Также показано, что оптимальный уровень энергоэффективности достигается, когда нагреватель расположен в центре нижней части полости при угле её наклона $\pi/4$.

Ключевые слова: тепловое излучение, свободная конвекция, не серый газ, внутренний источник тепла.

Совместный конвективно-радиационный теплоперенос в замкнутых полостях [1–3] является важным процессом и встречается во многих инженерных приложениях, которые включают системы теплоизоляции, проектирование теплообменников, теплопередачу в зданиях, котлы и т.д. В частности, наличие замкнутых областей с внутренним нагревателем [4–6] имеет существенное значение для большинства задач теплообмена в промышленности, где свободная конвекция и тепловое излучение играют первостепенную роль в управлении структурой течения и теплообменом. В таких системах очень важно определить оптимальную конфигурацию, которая обеспечивала бы наилучшие характеристики теплообмена и, следовательно, максимальную энергоэффективность данных систем.

Основная цель настоящей работы — проведение численного исследования влияния излучения газа на ламинарную естественную конвекцию в квадратной полости с изотермическими стенками и внутренним источником тепла. Особое внимание уделяется также анализу энергоэффективности, направленному на выявление оптимальной конфигурации, обеспечивающей наилучшие характеристики теплообмена.

Физическая модель, рассматриваемая в данной работе, представляет собой двумерную квадратную полость, содержащую локальный внутренний источник тепла с серыми диффузно излучающими стенками. Рабочей жидкостью является перегретый водяной пар,

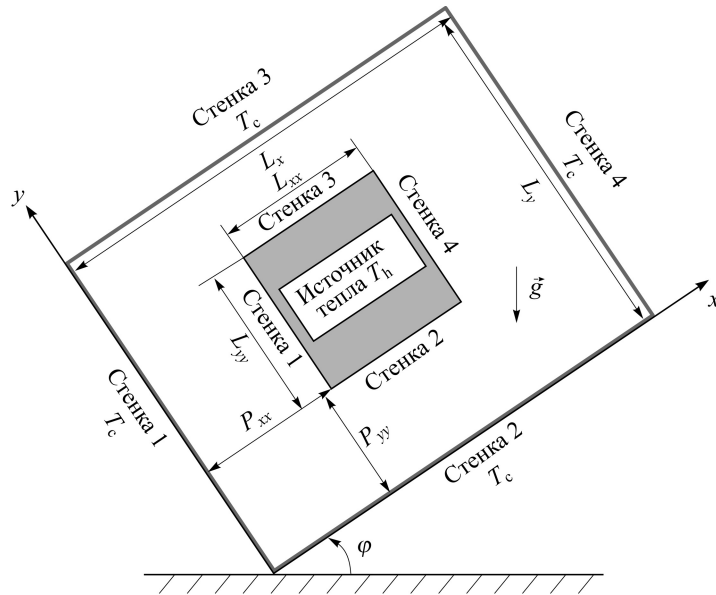


Рис. 1. Схема области решения.

который можно рассматривать как не серую излучающую/поглощающую нерассеивающую среду (см. рис. 1). Течение предполагается стационарным, ламинарным и сжимаемым. Стены поддерживаются изотермическими при низкой температуре T_c , тогда как источник тепла находится при высокой температуре T_h .

Для изучения характеристик теплообмена и структуры течения использовался коммерческий пакет вычислительной гидродинамики COMSOL Multiphysics. Для итерационных вычислений применялся программный комплекс Matlab.

При учете вышеупомянутых допущений основные уравнения могут быть записаны в следующем виде:

— уравнение неразрывности: $\nabla(\rho \vec{u}) = 0$; (1)

— уравнение движения: $\rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \left[-P \vec{I} + \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{u}) \vec{I} \right] + \rho \vec{g}$; (2)

— уравнение энергии: $\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla(\lambda \nabla T) - \text{div}(\vec{q}_r)$. (3)

Уравнение переноса излучения решалось с использованием метода дискретных ординат по направлениям FT_{40} [2], а радиационные свойства среды рассчитывались с помощью модели SNBcK [2].

С целью оценки эффективности теплообмена будем определять энергоэффективность процесса нагрева как отношение повышения температуры, имеющего место вследствие теплообмена, к тепловому потоку, необходимому для поддержания этого повышения температуры:

$$E = \left(\frac{T_a - T_c}{T_h - T_c} \right) / \sum_{j=1}^4 (\overline{Nu}_{coj} + \overline{Nu}_{roj}). \quad (4)$$

На рис. 2 показана структура течения при угле наклона полости $\pi/4$. В этом случае структура течения содержит две рециркуляционные ячейки и демонстрирует идеальную

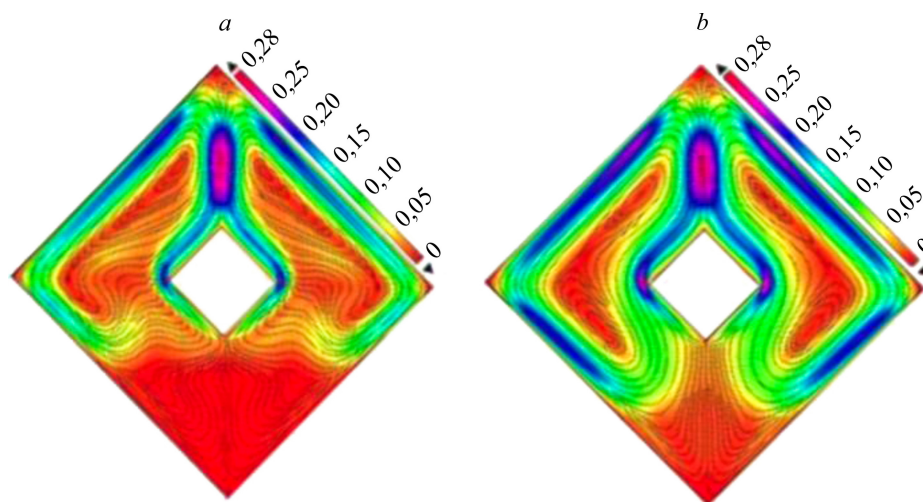


Рис. 2. Поля скорости (м/с) без излучения (а) и с излучением (b).

$$T_c = 400 \text{ K}, T_h = 800 \text{ K}, P = 1 \text{ атм}, L_x = L_y = 0,1 \text{ м}, L_{xx} = L_{yy} = 0,025 \text{ м},$$

$$P_{xx} = P_{yy} = 0,0375 \text{ м}, \varepsilon_c = \varepsilon_h = 1, \varphi = \pi/4.$$

симметрию относительно биссектрисы верхнего угла. Кроме того, рециркуляционные ячейки деформируются в квазиэллипсоидальные структуры, что приводит к появлению застойных зон вблизи нижнего угла полости.

Влияние угла наклона полости на среднюю температуру и энергоэффективность показано на рис. 3а и 3б. Из представленных зависимостей можно видеть, что максимальные значения величин наблюдаются при угле наклона полости $\varphi = \pi/4$, что является следствием идеальной симметрии рассматриваемой физической задачи при фиксированных граничных условиях. Соответствующие профили симметричны относительно вертикальной медианы и проявляют тенденцию к уменьшению величин параметров при изменении угла наклона полости в обе стороны от этого направления. Следует обратить внимание, что излучение вносит значительный гомогенизирующий вклад в среднюю температуру, заметно повышая значения последней. Отметим, что выбор угла наклона полости, равного $\pi/4$, по-видимому, обеспечивает наилучшую циркуляцию среды, наилучший теплообмен и однородность температурного поля. Зависимости средних конвективных чисел Нуссельта на стенках полости и источника энергии от угла наклона полости показаны на рис. 3с и 3д. Видно, что при увеличении угла наклона увеличиваются значения чисел $\overline{Nu}_{co2,4}$ и $\overline{Nu}_{ci3}$, а значения чисел $\overline{Nu}_{co1,3}$ и $\overline{Nu}_{ci4}$, наоборот, уменьшаются. Кроме того, профиль числа $\overline{Nu}_{ci1}$, проявляет сначала тенденцию к увеличению значения этого числа с достижением максимума при угле наклона, примерно равном $\pi/6$, и, далее, тенденцию к его уменьшению при изменении угла наклона полости от $\pi/6$ до $\pi/2$; при этом достигается значение рассматриваемого числа, реализующееся также при угле наклона полости 0° . Аналогично число $\overline{Nu}_{co2}$ демонстрирует почти то же поведение, что и число $\overline{Nu}_{ci1}$, но с небольшим смещением, достигая при этом максимума при угле наклона, близком к $\pi/3$. Очевидно, что геометрическая конфигурация, использованная в представленном исследовании, и соответствующие граничные условия делают профили конвективных чисел Нуссельта симметричными относительно средней вертикальной линии. Фактически профиль числа $\overline{Nu}_{co1}$ симметричен профилю числа $\overline{Nu}_{co2}$ относительно

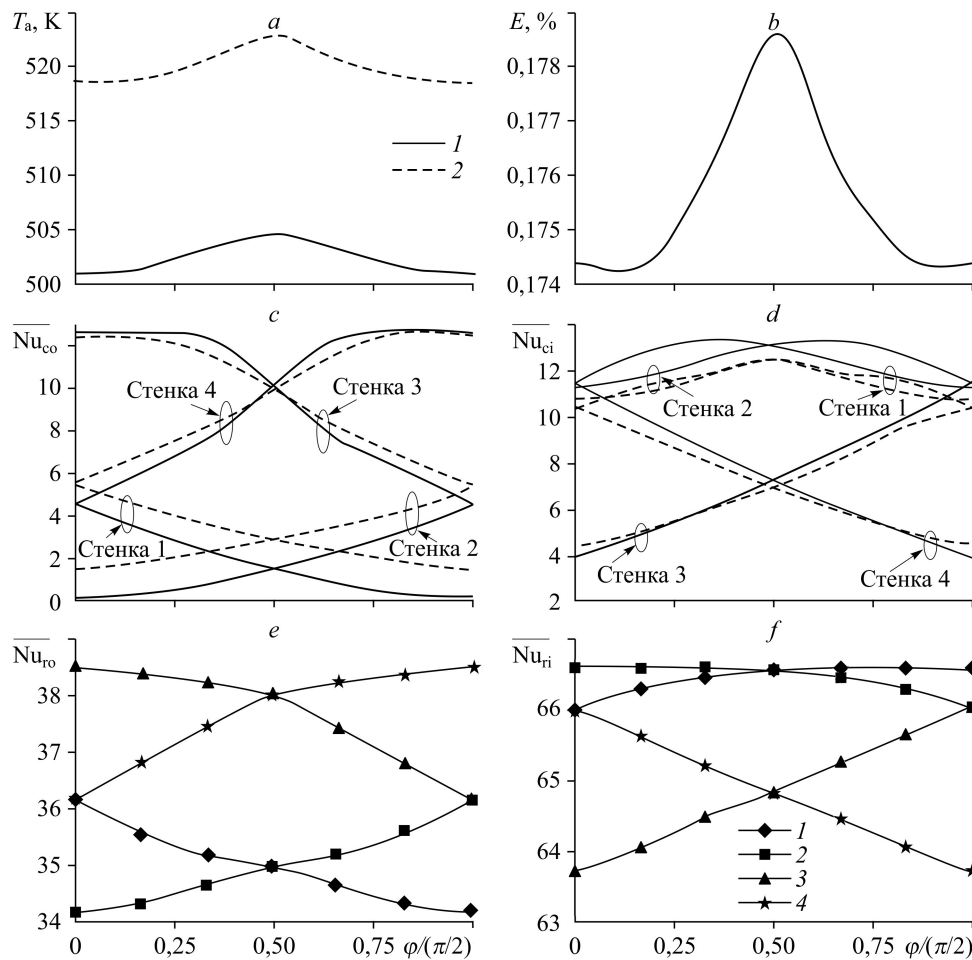


Рис. 3. Влияние угла наклона полости на распределения интегральных параметров при $T_c = 400$ К, $T_h = 800$ К, $P = 1$ атм, $L_x = L_y = 0,1$ м, $L_{xx} = L_{yy} = 0,025$ м, $P_{xx} = P_{yy} = 0,0375$ м, $\varepsilon_c = \varepsilon_h = 1$.

a, c, d : 1 — без излучения, 2 — с излучением; e, f : 1 — стенка 1, 2 — стенка 2, 3 — стенка 3, 4 — стенка 4.

вертикальной медианы $\varphi = \pi/4$. Аналогичное поведение наблюдается для следующих пар чисел Нуссельта: $(\overline{Nu}_{co3}; \overline{Nu}_{co4})$ и $(\overline{Nu}_{ci3}; \overline{Nu}_{ci4})$. В случае учета теплового излучения значения чисел $\overline{Nu}_{co1,2}$ и $\overline{Nu}_{ci1,2}$ заметно увеличиваются и уменьшаются соответственно. Также следует отметить, что для углов наклона полости менее $\pi/4$ излучение вызывает уменьшение и увеличение значений чисел $\overline{Nu}_{co3}$ и $\overline{Nu}_{co4}$ соответственно. Это поведение меняется на противоположное при углах наклона, больших $\pi/4$. На рис. 3е и 3ф показаны профили средних радиационных чисел Нуссельта в зависимости от угла наклона полости. Здесь снова наблюдается такая же симметрия между кривыми относительно вертикальной медианы $\varphi = \pi/4$.

В заключение отметим, что вклад от переноса тепла излучением может играть значительную роль в управлении структурой течения и теплообменом за счет интенсификации вихревого движения и обеспечения однородного температурного поля. Кроме того, установлено, что наилучший теплообмен достигается при угле наклона полости $\pi/4$.

Список обозначений

C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К),	$\overline{Nu_c}$ — среднее конвективное число Нуссельта,
g — ускорение свободного падения, м/с ² ,	$\overline{Nu_r}$ — среднее радиационное число Нуссельта,
$\bar{I}$ — единичная матрица,	P — давление, атм,
L_x — длина полости, м,	P_{xx} — положение источника тепло вдоль оси x ,
L_y — ширина полости, м,	P_{yy} — положение источника тепло вдоль оси y ,
L_{xx} — длина нагревателя, м,	T — температура, К,
L_{yy} — ширина нагревателя, м,	u — скорость, м/с,
	x, y — декартовы координаты.

Греческие символы

φ — угол наклона полости, рад,	ε — коэффициент черноты стенки,
λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),	μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с.
ρ — плотность, кг/м ³ ,	

Индексы

a — среднее значение,	i — внутренняя поверхность
c — холодный объект,	o — внешняя поверхность,
h — горячий,	$1, 2, 3, 4$ — стенки 1, 2, 3, 4.

Список литературы

1. Mazgar A., Nejma F.B. Combined effect of natural convection and non-gray gas radiation with partial heating // Sādhanā. 2016. Vol. 41. P. 805–815.
2. Hajji F., Mazgar A., Sakly A., Nejma F.B. Entropy generation due to combined natural convection and thermal radiation within a rectangular enclosure // Heat Transfer Engng. 2017. Vol. 39, No. 19. P. 1698–1714.
3. Sakly A., Nejma F.B. Heat and mass transfer of combined forced convection and thermal radiation within a channel: Entropy generation analysis // Appl. Thermal Engng. 2020. Vol. 171. P. 114903.
4. Шеремет М.А. Математическое моделирование турбулентных режимов сопряженной термогравитационной конвекции в замкнутой области с локальным источником тепла // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 117–131.
5. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Влияние поверхностного излучения на режимы сопряженной естественной конвекции в замкнутой области с локальным источником энергии // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 427–438.
6. Sivaraj C., Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Influence of thermal radiation on thermogravitational convection in a tilted chamber having heat-producing solid body // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2020. Vol. 115. P. 104611-1–104611-11.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2019 г.,
 после доработки — 20 июля 2020 г.,
 принята к публикации 5 августа 2020 г.,
 после дополнительной доработки — 20 января 2021 г.