

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

RUSSIAN ACADEMY OF  
SCIENCES

ИНСТИТУТ

ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО  
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

NUCLEAR  
SAFETY INSTITUTE

Препринт № IBRAE-95-03

Preprint IBRAE-95-03

А.Е. Аксенова, П.Н. Вабищевич, В.Ф. Стрижов,  
В.В. Чуданов

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ  
ДВИЖЕНИЙ  
СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ  
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ**

Москва  
1995

Moscow  
1995

Аксенова А.Е., Вабишевич П.Н., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ. Препринт № ИБРАЕ-95-03. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1995. 18 с.

#### Аннотация

В работе численно исследуется двумерная естественная конвекция тепловыделяющей жидкости в приближении стратифицированного корнума при различных режимах теплообмена на верхней границе в геометрической области подобной нижней части корпуса реактора. Основной целью работы является оценка влияния неоднородностей корнума на распределение тепловых потоков на боковой, нижней и верхней поверхностях для различных режимов теплосъема на верхней границе (чисел Био) и различных аспектных соотношениях.

В численных исследованиях применена новая эффективная методика для решения нестационарных задач гидродинамики с теплопроводностью, которая проверена на широком классе тестовых задач.

Эти результаты могут быть использованы для построения упрощенных моделей поведения расплава топливосодержащих масс в различных системах удержания.

©ИБРАЭ РАН, 1995

Aksenova A.E., Vabishchevich P.N., Strizhov V.F., Chudanov V.V. NUMERICAL SIMULATION OF THE BUOYANCY DRIVEN FLOW OF THE STRATIFIED HEAT-GENERATING FLUID (in Russian). Preprint IBRAE-95-03. Moscow: Nuclear Safety Institute, 1995. 18 p.

#### Abstract

The 2D natural convection of a heat-generating fluid in a stratified corium for the different regimes of cooling on the upper boundary in a geometric domain similar to the vessel lower head is investigated numerically in present work. This paper deals to the analysis of the corium nonhomogeneity influence on the heat flux distribution on the lateral, lower and upper surfaces in depending on the cooling regimes at the upper boundary (Biot number) and different aspect ratio.

To solve unsteady problems of hydrodynamics with heat conductivity, new efficient numerical method, inspected at the wide set of test problem, was employed.

These results may be used for construction of simplified models describing the behaviour of a molten heat-generating masses (corium) in different retention system (core catcher).

©Nuclear Safety Institute, 1995

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

*Аксенова А.Е., Вабищевич П.Н., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В.*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

113191 Москва, ул. Б.Тулльская, 52

тел.: (095) 952-24-21, факс: (095) 230-20-29, эл. почта: pbl@ibrae.msk.su

## 1 Введение

При моделировании гипотетических тяжелых аварий на АЭС с плавлением и разрушением активной зоны одним из важных сценариев является удержание расплавленных компонент активной зоны в корпусе реактора или в страховочном корпусе. При таком сценарии, как правило, предполагается идеальное охлаждение на боковой поверхности корпуса реактора или страховочного корпуса. Для учета теплосъема на верхней границе рассматриваются различные сценарии, которые включают в себя как залив водой на верхней границе, так и менее активные условия теплового излучения (и взаимное переизлучение) горячей поверхности кориума и разогретых конструкций реактора. При численном исследовании такой задачи многообразии граничных условий на верхней границе учитывается путем варьирования в соответствующем диапазоне основных безразмерных параметров, главным образом, числа Био. Использование подобного подхода позволяет вполне адекватно описывать основные тенденции поведения расплава тепловыделяющей жидкости, что является важным в силу достаточно большой неопределенности параметров при описании сценария тяжелой аварии.

Обычно проблема удержания расплава в корпусе реактора рассматривается в предположении гомогенности тепловыделяющего кориума [1]. Однако в действительности расплав кориума многокомпонентной активной зоны ( $UO_2, ZrO_2, Zr, Fe$  и т.д.) представляет собой смесь в достаточно больших объемах тяжелых оксидов  $UO_2$  и более легких металлов  $Zr, Fe$ . Поэтому можно предположить, что в результате продолжительной конвекции расплав может стратифицироваться на два слоя: тяжелых оксидов и легких металлов, находящихся в жидком состоянии. В этом случае распределение тепловых потоков в тепловыделяющем кориуме может существенно отличаться от распределения тепловых потоков в гомогенном тепловыделяющем расплаве кориума. Кроме того, на указанное распределение может оказывать влияние наличие или отсутствие корки на верхней границе. Так в случае залива водой расплавленного кориума возможно формирование корки на верхней границе. Но поскольку в реакторном случае при высоких числах Релея  $10^{13} \div 10^{15}$  тепловыделяющая жидкость находится в состоянии достаточно интенсивного перемешивания, можно предположить, что высокие скорости расплава кориума вблизи верхней границы не дадут сформироваться стабильной корке (даже при высоких числах Био). Поэтому при исследовании проблемы удержания расплава в корпусе реактора представляется важным рассматривать различные условия на верхней границе: в предположении отсутствия стабильной корки на верхней границе рассматривать условия проскальзывания на верхней границе, а при наличии корки — условия прилипания.

Не менее важной с точки зрения распределения тепловых нагрузок и удержания расплава кориума не только в корпусе реактора, но и в страховочном корпусе (который предполагается в конструкциях перспективных АЭС) является задача естественной конвекции тепловыделяющей жидкости при различных аспектных отношениях. Учитывая сделанные предположения представляется актуальным провести небольшую серию параметрических численных исследований с целью выявления некоторых особенностей естественной конвекции тепловыделяющей

жидкости при следующих предположениях и допущениях:

- стратификация расплава кориума;
- условия прилипания или проскальзывания на верхней границе;
- различные аспектные отношения;
- различные режимы теплосъема на верхней границе (различные числа Био);
- $Ra = 10^{14}$ ,  $Pr_{met} = 1$ .

Результаты расчетов представлены в виде таблиц и графиков:

- $Nu_{up}(Bi), Nu_{sd}(Bi)$  для металлов и оксидов,  $Nu_{dn}(Bi)$ ;
- температура в металлическом и оксидном слоях;
- профили температуры;
- поле температур и функции тока.

## 2 Математическая формулировка задачи

Рассматривается задача взаимодействия тепловыделяющего расплава с корпусом реактора с учетом процессов стратификации топлива. Предполагается, что расплав состоит из двух слоев. Верхний слой представлен металлами, нижний слой образован оксидами. Моделирование проводится для случая плоской геометрии.

Для решения вышеназванной задачи строится вычислительный алгоритм в переменных функция тока, вихрь скорости и температура. Система дифференциальных уравнений для описания процессов тепло- и массопереноса в расплавленном кориуме включает в себя уравнение теплопроводности и систему уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для несжимаемой жидкости. Поскольку расплав состоит из двух слоев, для каждого слоя записывается своя система уравнений.

Так для слоя металлов мы имеем систему уравнений вида:

$$-\sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\alpha}^2} = \omega, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \mathbf{v} \operatorname{grad} \omega = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_{\alpha}^2} + Gr_{met} \frac{\partial \Theta_{met}}{\partial x_1}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta_{met}}{\partial \tau} + \mathbf{v} \operatorname{grad} \Theta_{met} = \frac{1}{Pr_{met}} \left( \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \Theta_{met}}{\partial x_{\alpha}^2} + 1 \right), \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2), \quad v_1 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}, \quad v_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}.$$

А для слоя оксидов справедливы следующие соотношения:

$$-\sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\alpha}^2} = \omega, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \mathbf{v} \operatorname{grad} \omega = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_{\alpha}^2} + Gr_{ox} \frac{\partial \Theta_{ox}}{\partial x_1}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta_{ox}}{\partial \tau} + \mathbf{v} \operatorname{grad} \Theta_{ox} = \frac{1}{Pr_{ox}} \left( \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \Theta_{ox}}{\partial x_{\alpha}^2} + 1 \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2), \quad v_1 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}, \quad v_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}.$$

Число Грасгофа для системы уравнений (1)-(3) задается с помощью соотношения

$$\text{Gr}_{met} = \frac{\beta_{met} g H^5 q_{met}}{\nu_{met}^2 k_{met}}. \quad (7)$$

А для системы уравнений (4)-(6) число Грасгофа определяется с учетом выражения (7) как:

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{ox} &= \frac{\beta_{ox} g H^5 q_{ox}}{\nu_{ox}^2 k_{ox}} = \\ &= \frac{\beta_{met} g H^5 q_{met}}{\nu_{met}^2 k_{met}} \frac{q_{ox}}{q_{met}} \frac{\nu_{met}^2}{\nu_{ox}^2} \frac{k_{met}}{k_{ox}} \frac{\beta_{ox}}{\beta_{met}} = \\ &= \text{Gr}_{met} \frac{q_{ox}}{q_{met}} \frac{\nu_{met}^2}{\nu_{ox}^2} \frac{k_{met}}{k_{ox}} \frac{\beta_{ox}}{\beta_{met}}. \end{aligned}$$

В свою очередь, число Прандтля в первом случае имеет вид

$$\text{Pr}_{met} = \frac{\nu_{met}}{a_{met}},$$

а во втором случае

$$\text{Pr}_{ox} = \text{Pr}_{met} \frac{\nu_{ox}}{\nu_{met}} \frac{a_{met}}{a_{ox}}.$$

А безразмерная температура для слоя металлов определяется с помощью соотношения

$$\Theta_{met} = \frac{\Delta T k_{met}}{q_{met} H^2},$$

а для оксидного слоя

$$\Theta_{ox} = \frac{\Delta T k_{ox}}{q_{ox} H^2},$$

или учитывая соотношение для  $\Theta_{met}$

$$\Theta_{ox} = \frac{\Delta T k_{met}}{q_{met} H^2} \frac{q_{met}}{q_{ox}} \frac{k_{ox}}{k_{met}} = \Theta_{met} \frac{q_{met}}{q_{ox}} \frac{k_{ox}}{k_{met}}.$$

Таким образом возможен переход к общей системе уравнений вида:

$$-\sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\alpha}^2} = \omega, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad } \omega = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_{\alpha}^2} + \text{Gr} \frac{\partial \Theta}{\partial x_1}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad } \Theta = \frac{1}{\text{Pr}} \left( \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_{\alpha}^2} + Q \right), \quad (10)$$

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2), \quad v_1 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}, \quad v_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}.$$

где числа Прандтля, Грасгофа и источник определяются с помощью соотношений:

$$\text{Pr} = \begin{cases} \text{Pr}_{met} & \text{для слоя металлов,} \\ \text{Pr}_{met} \frac{\nu_{ox}}{\nu_{met}} \frac{a_{met}}{a_{ox}} & \text{для слоя оксидов,} \end{cases}$$

$$\text{Gr} = \begin{cases} \text{Gr}_{met} & \text{для слоя металлов,} \\ \text{Gr}_{met} \frac{\nu_{met}^2}{\nu_{ox}^2} \frac{\beta_{ox}}{\beta_{met}} & \text{для слоя оксидов.} \end{cases}$$

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{для слоя металлов,} \\ \frac{1}{\frac{q_{met}}{q_{ox}} \frac{k_{ox}}{k_{met}}} & \text{для слоя оксидов.} \end{cases}$$

Безразмерная температура  $\Theta = \Theta_{met}$ .

Система уравнений (8)–(10) дополняется соответствующими граничными и начальными условиями. В качестве граничных условий для температуры

- на верхней границе задаются условия конвективного теплообмена вида

$$\frac{\partial \Theta}{\partial n} + \text{Bi} \Theta = 0;$$

- на внешних границах (боковые и нижняя стенки) задаются изотермические граничные условия: температура плавления металла и температура плавления оксида, соответственно.

В качестве граничных условий для скорости

- на боковой границе определены условия прилипания и непротекания

$$\psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0;$$

- на верхней границе были рассмотрены два типа граничных условий:

1. прилипания и непротекания;
2. проскальзывания и непротекания;

- на границе между слоями задаются условия непротекания

$$\psi = 0,$$

и непрерывности тензора касательных напряжений, которое соответствует следующему соотношению

$$\mu_{met} \omega_{met} = \mu_{ox} \omega_{ox}. \quad (11)$$

Начальные условия для скорости и температуры нулевые.

### 3 Метод решения

Для нахождения приближенного решения задачи (8)–(10) с соответствующими граничными условиями используется вариант метода фиктивных областей с продолжением по младшим коэффициентам [2]. Реализация разностной схемы расщепления [3] основана на решении сеточных эллиптических задач на каждом шаге по времени. Подобный подход хорошо зарекомендовал себя при решении задач свободной конвекции тепловыделяющей жидкости, что подтверждает совпадение полученных результатов с экспериментальным [4, 5] и численно-экспериментальным [6, 7] исследованиями для различных граничных условий и геометрий расчетной области. Результаты тестирования вычислительного алгоритма для задачи свободной конвекции тепловыделяющей жидкости опубликованы в работах [8, 9]. Кроме того, некоторые из результатов, касающиеся исследования периодической естественной конвекции в замкнутой полости прямоугольного сечения, представлены в статье [10].

## 4 Результаты численного моделирования

В рамках моделирования теплового взаимодействия тепловыделяющего стратифицированного расплава с нижней частью корпуса реактора была проведена серия расчетов для различных значений числа  $Bi$ : 100, 400, 1000, 4000 при аспектном отношении равном  $H/R = 1$ . Кроме того был выполнен расчеты для задачи с так называемым страховочным корпусом для тех же чисел Био при аспектном отношении  $H/R = 0.5$ .

Основные безразмерные параметры ( $Gr$ ,  $Ra$ ,  $Pr$ ) для металлического и оксидного слоев задавались исходя из реальных свойств материалов [1].

Предполагалось, что расплав стратифицирован в отношении 1:3, т.е. 1/4 области занимает слой металлов, а 3/4 — слой оксидов, т.е. высота слоя оксидов составляет 0.75 высоты всей расчетной области.

Ниже представлены результаты расчетов для различных чисел  $Bi$  на сгущающейся сетке  $161 \times 161$  для аспектного соотношения 1 и 0.5.

При обработке данных расчетов основное внимание уделялось долям теплового потока на боковые и верхнюю грани. Кроме того рассчитывалась доля теплового потока на границе между слоями, а также средняя температура в каждом слое. В таблицах 1-3 приводятся следующие важные безразмерные параметры, характеризующие полученное квазистационарное решение:

$\sum Nu_{met}$  — суммарное тепловыделение в металлическом слое,

$\sum Nu_{ox}$  — суммарное тепловыделение в оксидном слое,

$Nu_{sdmet}$  — доля теплового потока на правой границе металлического слоя,

$Nu_{sdox}$  — доля теплового потока на правой границе оксидного слоя,

$Nu_{up}$  — доля теплового потока на верхней границе металлического слоя,

$Nu_{dn}$  — доля теплового потока на нижней границе оксидного слоя,

$Nu_{metox}$  — безразмерный тепловой поток на границе между металлическим и оксидным слоями

Таблица 1

Распределение остаточного тепловыделения по различным каналам потерь для аспектного отношения 1 с условиями прилипания для скорости на верхней границе							
$Bi$	$\sum Nu_{met}$	$\sum Nu_{ox}$	$Nu_{sdmet}$	$Nu_{sdox}$	$Nu_{up}$	$Nu_{dn}$	$Nu_{metox}$
100	0.032	0.557	0.24	0.09	0.115	$\approx 0.14$	0.31
400	0.032	0.557	0.21	0.088	0.149	$\approx 0.14$	0.32
1000	0.032	0.557	0.21	0.09	0.160	$\approx 0.13$	0.34
4000	0.032	0.557	0.21	0.085	0.165	$\approx 0.13$	0.34

Таблица 2

Распределение остаточного тепловыделения по различным каналам потерь для аспектного отношения 1 с условиями проскальзывания для скорости на верхней границе							
$Bi$	$\sum Nu_{met}$	$\sum Nu_{ox}$	$Nu_{sdmet}$	$Nu_{sdox}$	$Nu_{up}$	$Nu_{dn}$	$Nu_{metox}$
100	0.032	0.557	0.24	0.098	0.110	$\approx 0.14$	0.32
400	0.032	0.557	0.23	0.095	0.130	$\approx 0.14$	0.33
1000	0.032	0.557	0.23	0.094	0.135	$\approx 0.13$	0.33
4000	0.032	0.557	0.23	0.094	0.143	$\approx 0.12$	0.35

Таблица 3

Распределение остаточного тепловыделения по различным каналам потерь для аспектного отношения 0.5 с условиями прилипания для скорости на верхней границе							
Bi	$\sum Nu_{met}$	$\sum Nu_{ox}$	$Nu_{sdmet}$	$Nu_{sdox}$	$Nu_{up}$	$Nu_{dn}$	$Nu_{metox}$
100	0.065	1.114	0.29	0.106	0.289	$\approx 0.46$	0.57
400	0.065	1.114	0.28	0.089	0.372	$\approx 0.44$	0.60
1000	0.065	1.114	0.28	0.087	0.380	$\approx 0.43$	0.60
4000	0.065	1.114	0.28	0.085	0.400	$\approx 0.42$	0.62

В таблицах 4-6 приводятся значения средних температур в металлическом и оксидном слоях при различных числах Био. Здесь использованы следующие обозначения:

$\Theta_{met}$  — средняя безразмерная температура в слое металлов

$T_{met}$  — средняя размерная температура в слое металлов

$\Theta_{ox}$  — средняя безразмерная температура в слое оксидов

$T_{ox}$  — средняя размерная температура в слое оксидов

Размерная температура рассчитывалась исходя из предположения, что температура плавления металла  $\approx 1800$  К, а температура солидус оксида  $\approx 2200$  К,  $\Delta T = 400$  К, а соотношение  $qH^2/k \approx 4 \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 4

Значения температуры в металлическом и оксидном слоях для различных чисел Био при аспектном отношении 1 и условии прилипания для скорости на верхней границе				
Bi	$\Theta_{met} \times 10^3$	$T_{met}, K$	$\Theta_{ox} \times 10^3$	$T_{ox}, K$
100	1.91	2564	2.55	2820
400	1.57	2428	2.43	2772
1000	1.41	2364	2.40	2760
4000	1.23	2292	2.30	2720

Таблица 5

Значения температуры в металлическом и оксидном слоях для различных чисел Био при аспектном отношении 1 и условии проскальзывания для скорости на верхней границе				
Bi	$\Theta_{met} \times 10^3$	$T_{met}, K$	$\Theta_{ox} \times 10^3$	$T_{ox}, K$
100	1.43	2372	2.63	2852
400	1.26	2304	2.53	2812
1000	1.12	2248	2.41	2764
4000	1.01	2204	2.37	2748



Таблица 6

Значения температуры в металлическом и оксидном слоях для различных чисел Био при аспектном отношении 0.5 и условии прилипания для скорости на верхней границе				
Bi	$\Theta_{met} \times 10^3$	$T_{met}, K$	$\Theta_{ox} \times 10^3$	$T_{ox}, K$
100	2.24	2696	2.57	2828
400	1.88	2552	2.51	2804
1000	1.70	2480	2.48	2792
4000	1.52	2408	2.33	2732

Рис. 1-4 демонстрируют структуру течения и температурное поле в виде эквидистантных линий тока и изотерм, соответственно. Рисунки 1,2 соответствуют случаю  $Bi = 4000$  и аспектному отношению  $H/R = 1$  с условием проскальзывания для скорости на верхней границе. На рис.3,4 показаны изотермы и линии тока для того же значения числа Био, но при аспектном отношении равном 0.5 и с условиями прилипания для скорости на верхней границе.

Ниже на рисунках 5-8 представлено характерное поведение температуры в горизонтальном сечении в металлическом слое и вблизи боковой стенки корпуса при аспектных отношениях 1 и 0.5 соответственно.

На рис.5 представлено характерное поведение температуры внутри металлического слоя. Как показывают результаты расчетов, на фоне достаточно больших осцилляций температуры наблюдается тенденция к возрастанию температуры от центра к боковой поверхности. Последнее обстоятельство может быть объяснено определяющим влиянием тяжелого и инертного слоя расплавленных оксидов на движение нижней части слоя расплавленных металлов, другими словами, нижние слои металлического расплава движутся в направлении движения жидкого слоя оксидов.

На рис.6 показано распределение температуры вблизи боковой стенки корпуса (вдоль оси  $x_2$ ) при  $H/R = 1$ . На графике наблюдается существенный перепад температуры связанный с переходом от металлического к оксидному слою.

Распределение температуры в горизонтальном сечении в металлическом слое при аспектном отношении 0.5 демонстрирует рисунок 7. Как и в случае аспектного отношения 1 (см. рис.5), здесь сохраняется тенденция увеличения температуры от центра к боковой поверхности, но эта тенденция менее выражена. Значения температуры при  $H/R = 0.5$  значительно выше, чем для аспектного отношения 1, причем указанные значения сильно осциллируют. Последнее обстоятельство указывает на многовихревую структуру течения в металлическом слое.

Поведение температуры вблизи стенки при аспектном отношении 0.5 показано на рисунке 8. Профиль температуры в этом случае более гладкий, чем при аспектном отношении 1 в силу того, что:

- температура в оксидном слое ниже,
  - а в металлическом слое выше,
- чем для аспектного отношения 1.

На рис.9 показано распределение чисел Нуссельта на верхней и нижней поверхностях в зависимости от числа Био для различных аспектных отношений  $H/R = 0.5, 1$  и различных условий на верхней границе. Как показывают результаты расчетов, варьирование условий для скорости на верхней границе не оказывают существенного влияния на распределение нагрузок на боковой и верхней поверхностях практически для любого режима теплосъема на верхней границе (чисел Био). В то же время необходимо отметить существенное влияние аспектного отношения на распределение чисел Нуссельта на этих поверхностях, которое возрастает с увеличением числа Био. Так, при Био равном 100 разница в значениях чисел Нуссельта на верхней границе составляет около 15%, а для случая  $Bi = 4000$  различие в значениях достигает  $\approx 30\%$ . Распределение чисел Нуссельта на нижней поверхности сохраняется примерно постоянным не зависимо от варьирования режимов теплосъема и условий для скорости на верхней границе. Различие в значениях чисел Нуссельта для аспектных отношений 1 и 0.5 составляет примерно 30% независимо от числа Био.

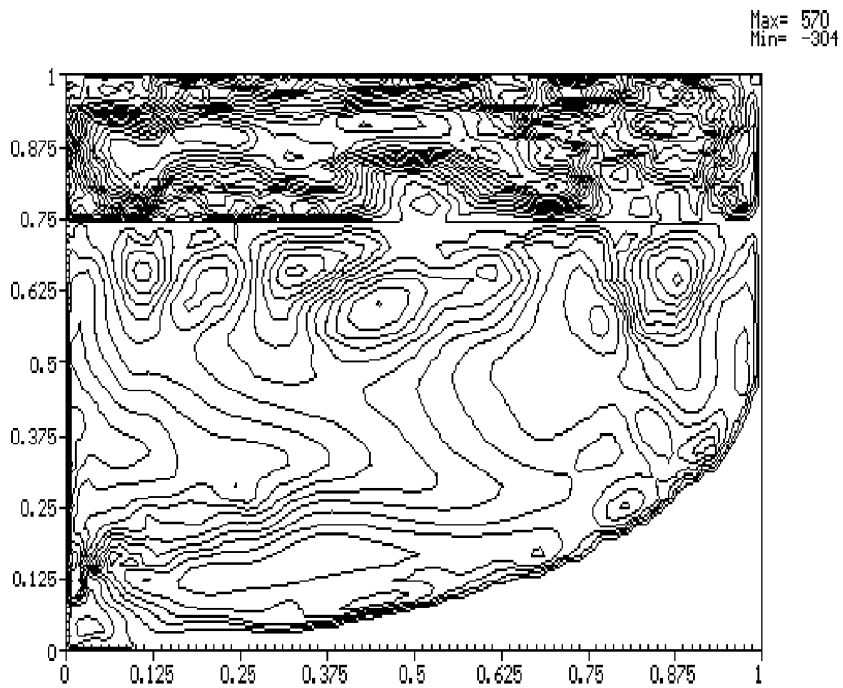
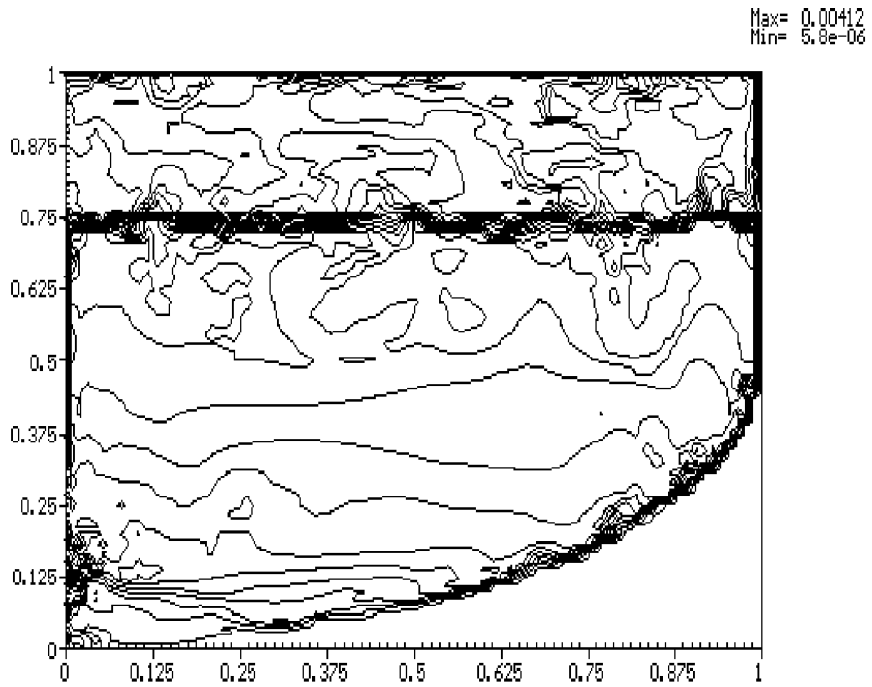


Рис.1,2: Изотермы (верх) и функции тока для аспектного отношения  $H/R = 1$  и  $Bi = 4000$ .

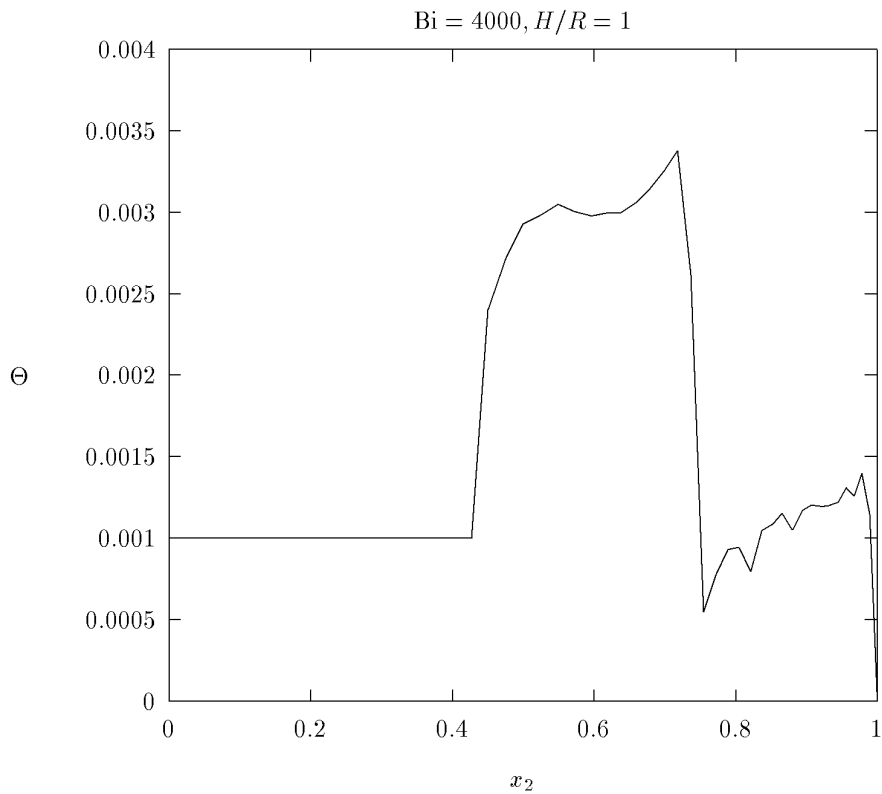
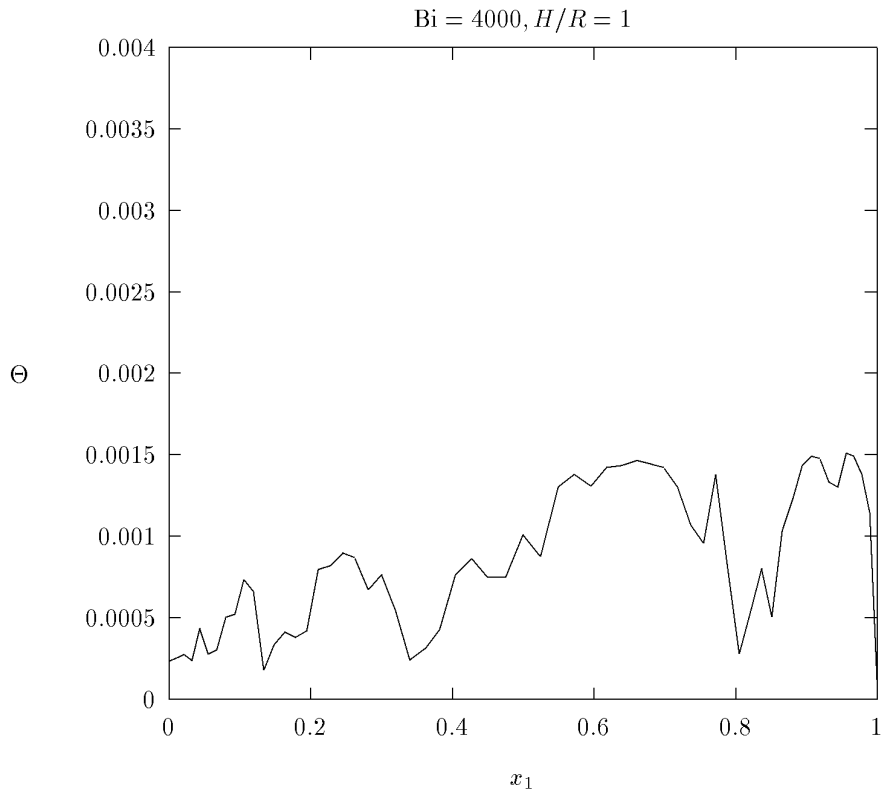


Рис.5,6: Распределение температуры в горизонтальном сечении в металлическом слое (верх) и вдоль оси  $x_2$  вблизи боковой стенки при  $H/R = 1$  и  $Bi = 4000$ .

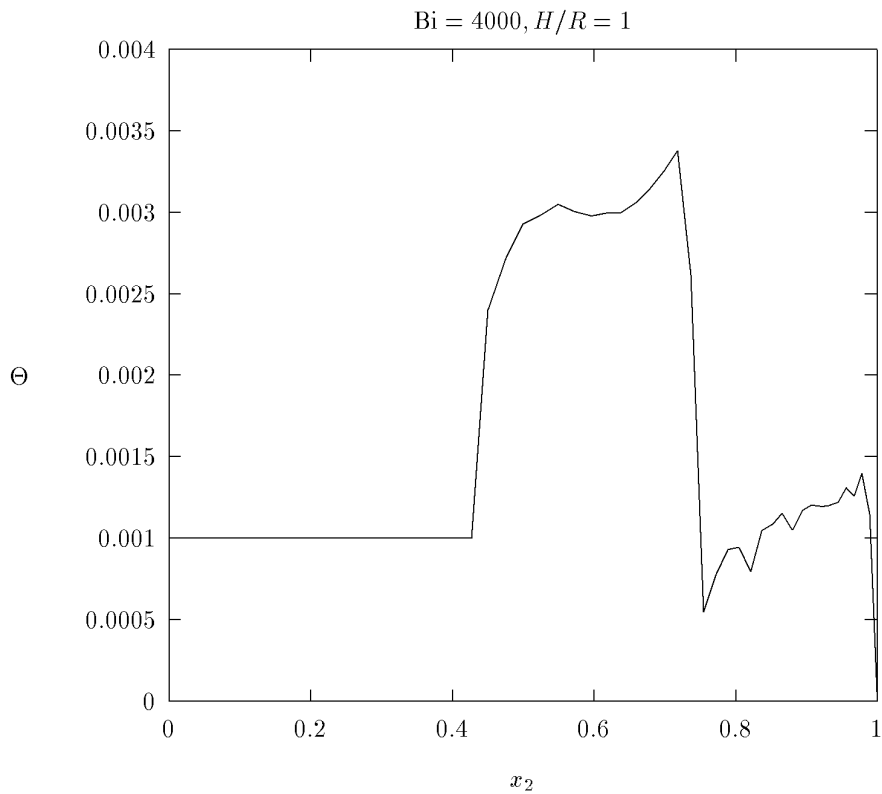
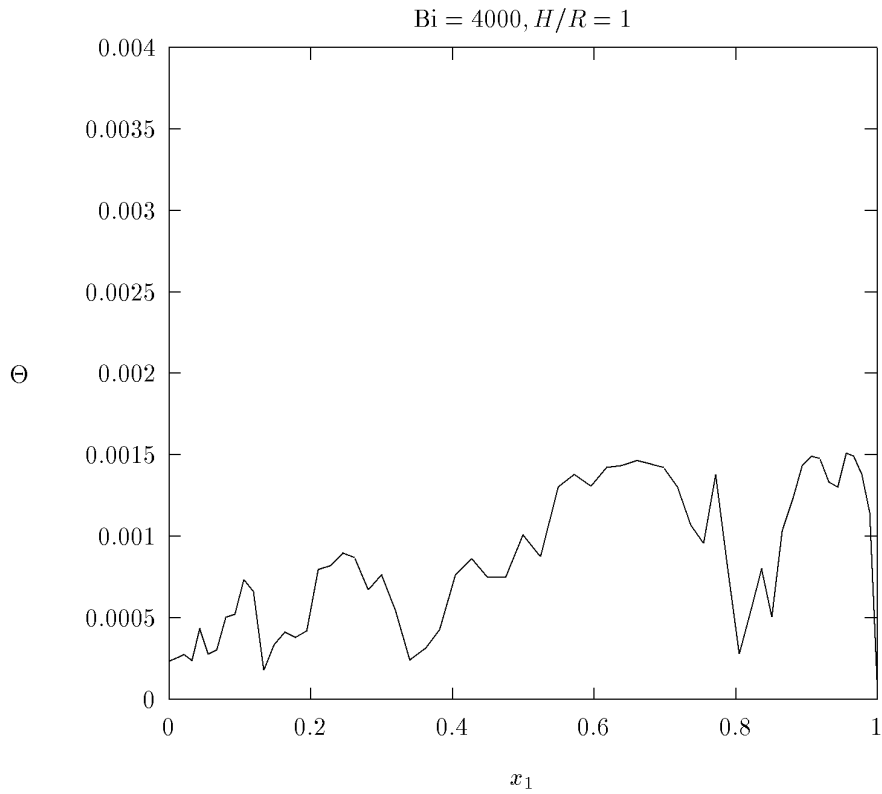


Рис.5,6: Распределение температуры в горизонтальном сечении в металлическом слое (верх) и вдоль оси  $x_2$  вблизи боковой стенки при  $H/R = 1$  и  $Bi = 4000$ .

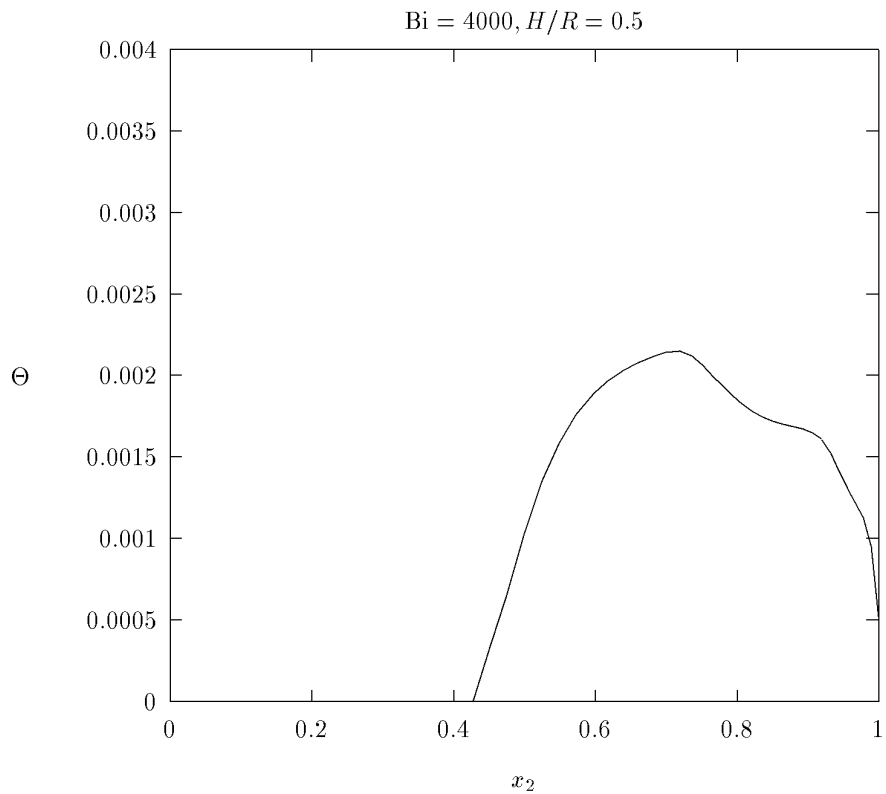
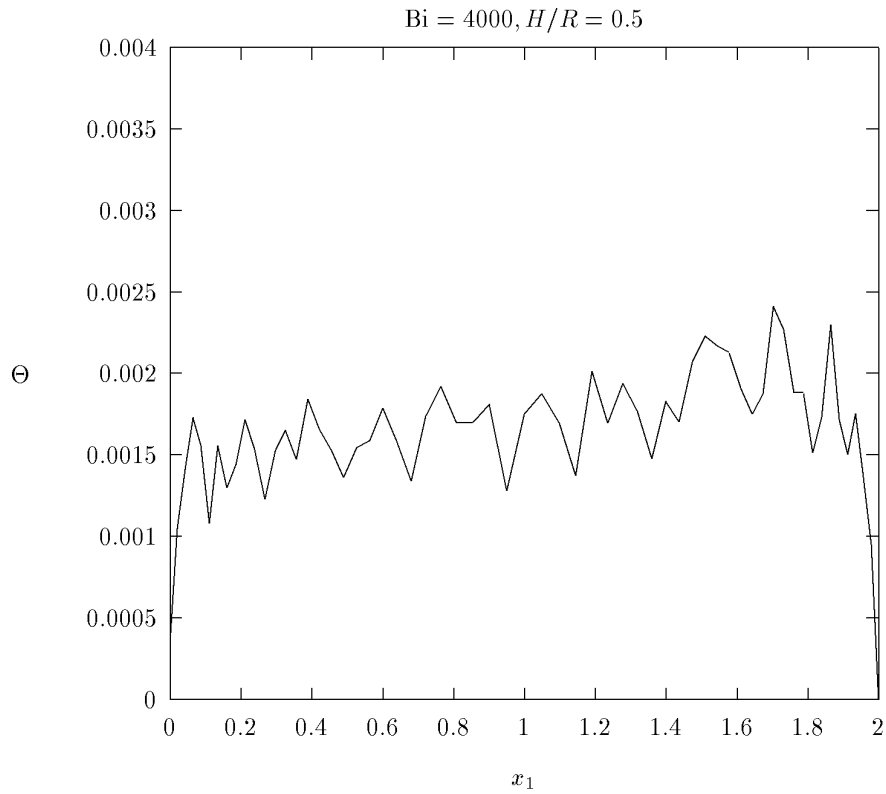


Рис.7,8: Распределение температуры в горизонтальном сечении в металлическом слое (верх) и вдоль оси  $x_2$  вблизи боковой стенки при  $H/R = 0.5$  и  $Bi = 4000$ .

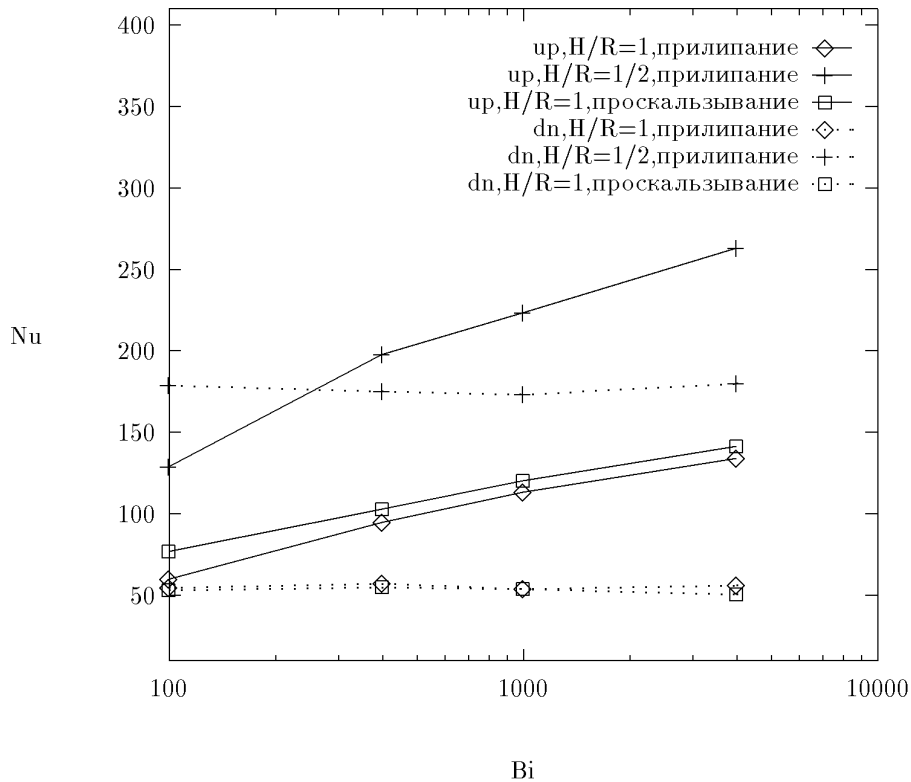


Рис.9: Распределение чисел Нуссельта на верхней и нижней поверхностях в оксидном и металлическом слоях.

Рисунок 10 демонстрирует распределение чисел Нуссельта на боковой поверхности (правой стенке области) в оксидном и металлическом слоях для различных аспектных соотношений и различных условий для скорости на верхней границе. Как видно из рисунка, влияние аспектного отношения на распределение тепловых нагрузок на боковую поверхность не является существенным. Но можно отметить изменение в значениях числа Нуссельта на боковой поверхности в металлическом слое при варьировании условий для скорости на верхней границе. Так, для случая условий прилипания (например, при наличии корки) значения  $Nu_{sd}$  примерно на 12.5% ниже, чем в случае условий проскальзывания для скорости на верхней границе. С увеличением числа Био это различие увеличивается, и в случае  $Bi = 4000$  достигает  $\approx 18\%$ . Для оксидного слоя влияние аспектного отношения и различных условий по скоростям не является существенным. При всех режимах теплосъема величины  $Nu_{sd}$  практически одинаковы и лежат в диапазоне  $35 \div 41$ .

На рис.11 представлено распределение тепловых потоков на границе между слоями отнесенное соответственно к температуре металлического и оксидного слоев для различных аспектных соотношений в случае условий прилипания и проскальзывания для скорости на верхней границе.

Рисунок 12 демонстрирует изменение безразмерной температуры в металлическом и оксидном слоях для  $H/R = 1$  и  $0.5$  и различных условий для скорости на верхней границе, а рисунок 13 демонстрирует размерную температуру для тех же случаев. В металлическом слое является существенным влияние обоих факторов как аспектного отношения так и граничных условий для скорости на верхней границе. Разница в значениях температуры в металлическом слое при различных аспектных отношениях и различных граничных условиях составляет около 12%.

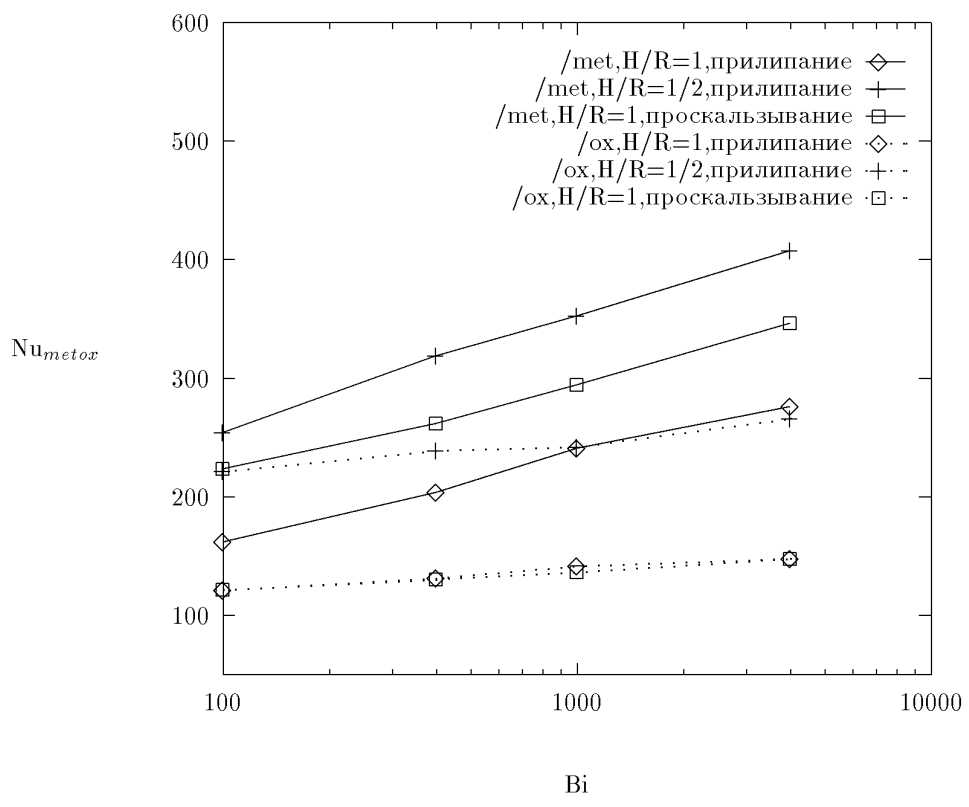
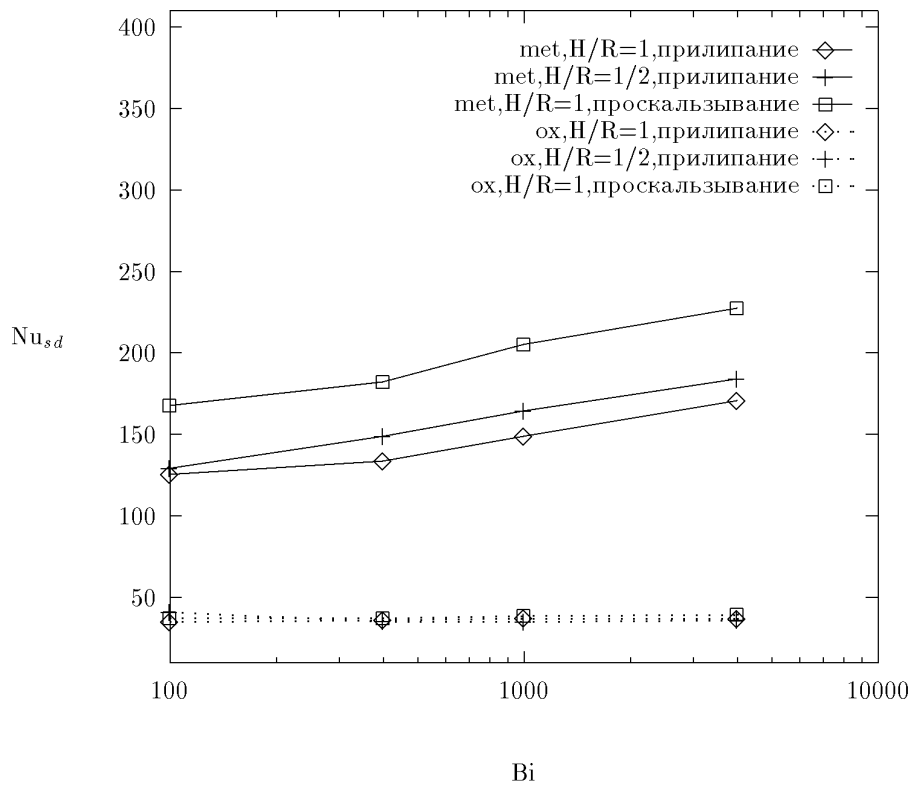


Рис.10,11: Распределение чисел Нуссельта на правой поверхности в оксидном и металлическом слоях (верх) и на границе металл/оксид.

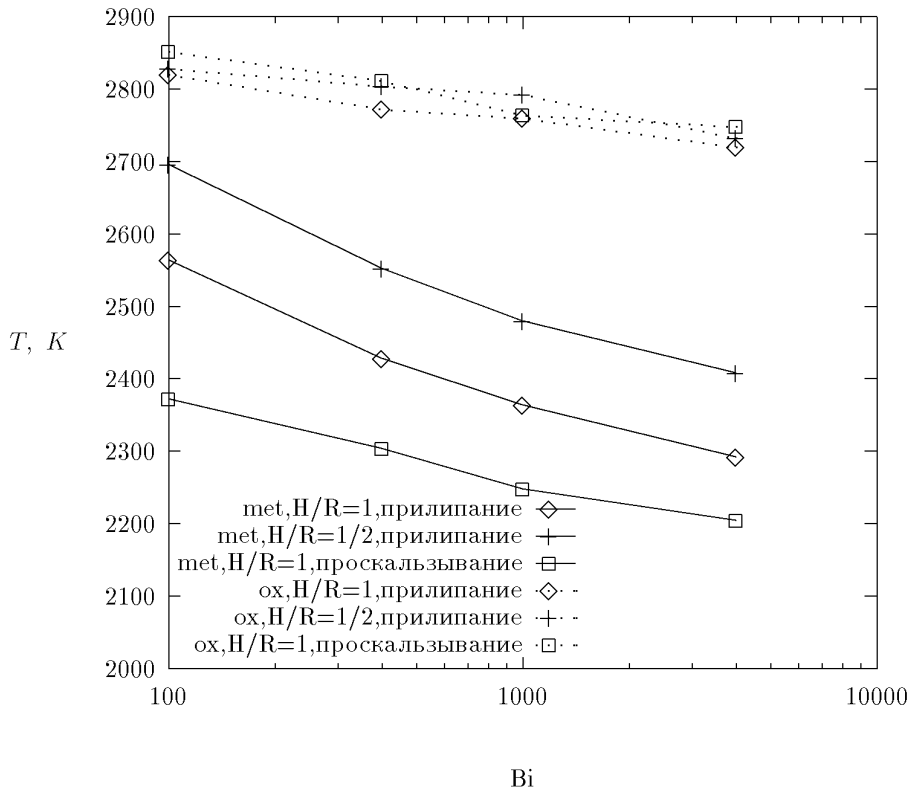
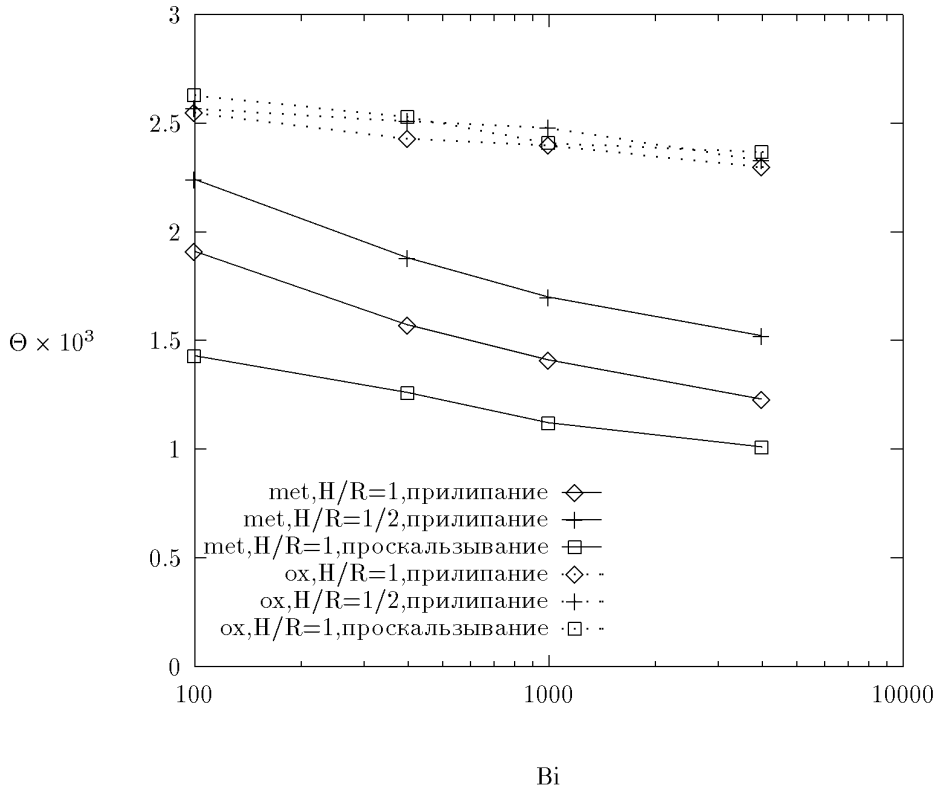


Рис.12,13: Распределение безразмерной (верх) и размерной температуры в металлическом и оксидном слоях.



## Выводы

Предварительные расчеты для задачи конвективного теплообмена в тепловыделяющей стратифицированной жидкости, анализируемые с точки зрения проблемы удержания расплавленного топлива на дне корпуса реактора или в пределах страховочного корпуса позволяют сделать следующие выводы:

1. свободно-конвективное движение в расплаве металлического слоя в основном определяется конвективными движениями расплава оксидов в том случае, когда толщина металлического слоя меньше толщины оксидного. Это влияние проявляется в поведении температуры в металлическом слое, которая увеличивается от центра к стенкам корпуса;
2. основные теплофизические характеристики такие как  $Nu_{up}$ ,  $Nu_{sd}$ ,  $Nu_{dn}$  в значительной степени зависят как от геометрических факторов, так и от условий движения жидкости вблизи верхней границы (условий прилипания или проскальзывания для скорости);
3. показаны почти линейные зависимости  $Nu_{up}$  и  $Nu_{sd}$  от  $Bi$  в логарифмической шкале и при этом практически отсутствует влияние параметра Био на  $Nu_{dn}$ .

## Литература

- [1] SCDAP/RELAP5/MOD2 CODE, Manual, Volume 4: MATPRO-A. Library of Material Properties for Light Water Reactors Accident Analysis. NUREG/CR - 5273, EGG-255, Vol.4 R3, 1990.
- [2] Вабищевич П.Н., Метод фиктивных областей в задачах математической физики, Москва, Из-во МГУ, 1991.
- [3] Вабищевич П.Н., Макаров М.М., Чуданов В.В. и Чурбанов А.Г., Численное моделирование конвективных течений в переменных "функция тока, вихрь скорости, температура", ИММ РАН, Препринт № 28, Москва, 1993.
- [4] Kulacki F.A. and Emara A.A., Steady and transient convection in a fluid layer with uniform volumetric energy sources, *J. Fluid Mech.*, 1977, Vol.83, pt.2, pp.375-395.
- [5] Lee J.-H. and Golstein R.J., An experimental study on natural convection heat transfer in an inclined square enclosure containing internal energy sources, *ASME J. Heat Transfer*, 1988, Vol.110, pp.345-349.
- [6] Jahn M. and Reineke H.H., Free convection heat transfer with internal heat sources, calculations and measurements, *Proceedings, 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Tokyo(Japan), 1974, pp.74-78.
- [7] May H.-O., A numerical study on natural convection in an inclined square enclosure containing internal heat sources, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, Vol.34, pp.919-928.
- [8] Chudanov V.V., Churbanov A.G., Strizhov V.F. and Vabishchevich P.N., Current Status and Validation of RASPLAV Code, *Proceedings, 21st Water Reactor Safety Meeting*, Washington(USA), 1993.
- [9] Bolshov L.A., Arutyunyan R.V., Chudanov V.V., Aksenova A.E. and *et. all*, Numerical study of natural convection of a heat-generating fluid in nuclear reactor safety problems, *Proceedings, 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety*, Taipei(Taiwan), 1994.
- [10] Churbanov A.G., Vabishchevich P.N., Chudanov V.V. and Strizhov V.F., A numerical study of natural convection of a heat-generating fluid in rectangular enclosures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, № 18, pp. 2969-2984, 1994.

## Номенклатура

$\mathbf{v} = (v_1, v_2)$  — вектор скорости

$x_1$  — горизонтальная координата

$x_2$  — вертикальная координата

$\psi$  — функция тока

$\omega$  — вихрь скорости

$Nu$  — доля теплового потока

$Nu = -(grad T)$  — локальное число Нуссельта

$T$  — размерная температура

$Gr = \frac{\beta g H^5 q}{\nu^2 k}$  — число Грасгофа

$\beta$  — коэффициент объемного расширения

$g$  — ускорение свободного падения

$H$  — высота полости

$q$  — мощность однородного теплового источника

$\nu$  — кинематическую вязкость

$k$  — коэффициент теплопроводности

$H/R$  — аспектное отношение

$R$  — радиус полости

$Pr = \frac{\nu}{a}$  — число Прандтля

$\nu$  — кинематическую вязкость

$a = \frac{k}{\rho c}$  — коэффициент температуропроводности

$c$  — коэффициент теплоемкости

$\rho$  — плотность

$\Theta = \frac{\Delta T k}{q H^2}$  — безразмерная температура,

$Bi = \frac{h l}{k}$  — число Био

$h$  — коэффициент теплопередачи

## Подиндексы

$up$  — верхняя поверхность

$sd$  — боковая поверхность

$dn$  — нижняя граница

$met$  — металл

$ox$  — оксид