На правах рукописи

Максимов Вячеслав Иванович

СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ ТЭС

05.14.14 – тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты,
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2006

Работа выполнена на теплоэнергетическом факультете
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Г.В. Кузнецов

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор П.Т. Петрик

доктор технических наук, профессор Т.Н. Немова

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита диссертации состоится «28» декабря 2006 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета К 212.269.04 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 4, ауд. 406.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «27» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета А.С. Заворин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Масштабы современной энергетики таковы, что её взаимодействие с окружающей средой имеет не только локальный, но и глобальный характер. При оценке воздействия энергетики на природу, отыскании мер ограничения отрицательных последствий этого воздействия, а также для создания оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды необходим анализ различных гидродинамических процессов. Сложность гидравлических задач энергетики определяется и тем, что эти задачи лежат на границах со многими науками: динамикой конструкций, термодинамикой, механикой грунтов, метеорологией, экологией и т. д.

В тепловой и атомной энергетике существенное значение имеет прогноз гидротермического режима водоемов-охладителей ТЭС, в которых производится сброс теплой воды, прошедшей через конденсаторы турбин. Такой прогноз важен как с точки зрения оценки теплового загрязнения водной среды, так и с точки зрения распределения температуры воды, забираемой на конденсаторы. При прямоточной схеме водоснабжения превышение температуры воды на водозаборе над естественной связано в основном с попаданием части отработавшей воды в водозабор и при малом расстоянии между водосбросом и водозабором обычно слабо зависит от теплоотдачи в атмосферу. При оборотной схеме, реализуемой, на водохранилищах-охладителях, температура забираемой воды определяется теплоотдачей в атмосферу. Чаще всего встречаются промежуточные ситуации, когда вода частично охлаждается за счет теплоотдачи как в атмосферу, так и в грунт.

Вследствие неизотермичности явлений, во-первых, меняются условия массообмена в водоеме за счет появления разности плотностей, связанной с разностью температур воды; во-вторых, возникают задачи моделирования температурного режима водоемов, о назначении температуры воды и пересчете результатов измерений с модели в натуру при заданных условиях теплоотдачи во внешнюю среду.

При проектировании водоемов-охладителей ТЭС и выборе их технологических параметров возникает необходимость анализа тепловых режимов объектов, представляющих собой полость, заполненную несжимаемой жидкостью при наличии источников ввода и отвода массы, значимых градиентов температур и теплообмена по внешнему контуру полости. Анализ физической картины течения показывает, что в таких условиях должен реализовываться режим смешанной конвекции, осложненный теплоотводом с внешних границ области анализа. Во многих практически значимых случаях этот теплоотвод играет важную роль в формировании теплового режима объекта и течений среды. До настоящего времени моделирование таких течений в сопряженной постановке, учитывающей влияние внешней среды на характер течения и температурное поле объекта не проводилось.

Исследования выполнялись по проекту совместного конкурса фундаментальных научных исследований РФФИ и Администрации Томской области в 2005-2006 годах (№ 05-02-98006, конкурс р_обь_а) «Математическое

моделирование процесса теплопереноса в объектах теплоснабжения с учетом взаимодействия с окружающей средой».

Цель работы заключается в математическом моделировании смешанной конвекции жидкости в типичном водоеме-охладителе ТЭС с локальными источниками ввода и вывода массы с учетом теплоотвода в окружающую среду по всему внешнему контуру.

Научная новизна работы. Впервые получено решение задачи смешанной конвекции вязкой несжимаемой жидкости и кондуктивного теплопереноса в прямоугольной полости при наличии локальных источников ввода и вывода массы, открытой поверхности жидкости и неоднородного теплообмена на внешних границах.

Практическая значимость. Создан вычислительный комплекс для моделирования смешанной конвекции и кондуктивного теплопереноса в прямоугольной полости при наличии локальных источников ввода и вывода массы, открытой свободной поверхности жидкости и неоднородным теплообменом на внешних границах.

Полученные новые численные результаты могут быть использованы для совершенствования существующих методик расчета тепловых режимов водоемов-охладителей ТЭС.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в работе, заключается в следующем:

достоверность подтверждается результатами тестирования разработанных метода и алгоритма на решении ряда менее сложных задач и сопоставлением результатов с экспериментальными данными и численными исследованиями других авторов, опубликованных в международных журналах: *International Journal of Heat and Mass Transfer, Applied Thermal Engineering.*

Автор защищает:

1. Новую математическую модель в переменных " вихрь скорости – функция тока - температура" для описания смешанной конвекции и кондуктивного теплопереноса в прямоугольной полости.
2. Алгоритм решения задач смешанной конвекции и кондуктивного теплопереноса в прямоугольных полостях, состоящих из сред с различными теплофизическими характеристиками, при наличии источников ввода и вывода массы и сопряженного теплообмена на внешних границах.
3. Результаты численного моделирования смешанной конвекции жидкости и кондуктивного теплопереноса в прямоугольной полости при наличии источников ввода и вывода массы и сопряженного теплообмена на внешних границах.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на II Международном семинаре энергосберегающих технологий (Томск, 2001), на II Семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Томск, 2002), на пятой, шестой и восьмой Всероссийских научно-технических конференциях «Энергетика, экология,

надежность, безопасность» (Томск, 2002-2004), на девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2003), на II международной научно-технической конференции «новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (Тюмень, 2006), на XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 2006), на пятой Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2006), на 4 Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2006).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в трудах вышеперечисленных конференций, а также в журналах: «Известия Томского политехнического университета» [2,11], «Известия Вузов:Физика» [8], «Промышленная теплотехника» [10].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 146 наименований, содержит 31 рисунок – всего 110 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояние моделирования естественной, вынужденной и смешанной конвекции в замкнутых полостях или в условиях сопряжения, как в российской науке, так и за рубежом.

Установлено, что в настоящее время отсутствуют публикации по численному моделированию смешанной конвекции в ограниченных по размерам полостях в рамках сопряженных постановок. Нет публикаций результатов решений задач по сопряженному теплообмену в водоемах со свободной поверхностью.

Также отсутствуют экспериментальные данные о закономерностях сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса в режиме смешанной конвекции в прямоугольных резервуарах или водоемах.

Во **второй главе** представлены физическая, геометрическая и математическая модели смешанной конвекции в прямоугольной полости (рис.1) с локальными источниками ввода и вывода массы и теплоотводом по всем внешним границам.

При проведении численного анализа принималось, что температура вводимой жидкости существенно превышает начальную температуру среды в полости и считается известной. Массовый приход также являлся известной величиной. На внешних границах области задавались неоднородные граничные условия. Жидкость считалась вязкой, теплопроводной, режим течения ламинарным. Отток массы с верхней границы за счет испарения не учитывался.

Все границы кроме участков ввода и отвода массы считались непроницаемыми для жидкости. Теплофизические свойства жидкости и твердой фазы не зависели от температуры.

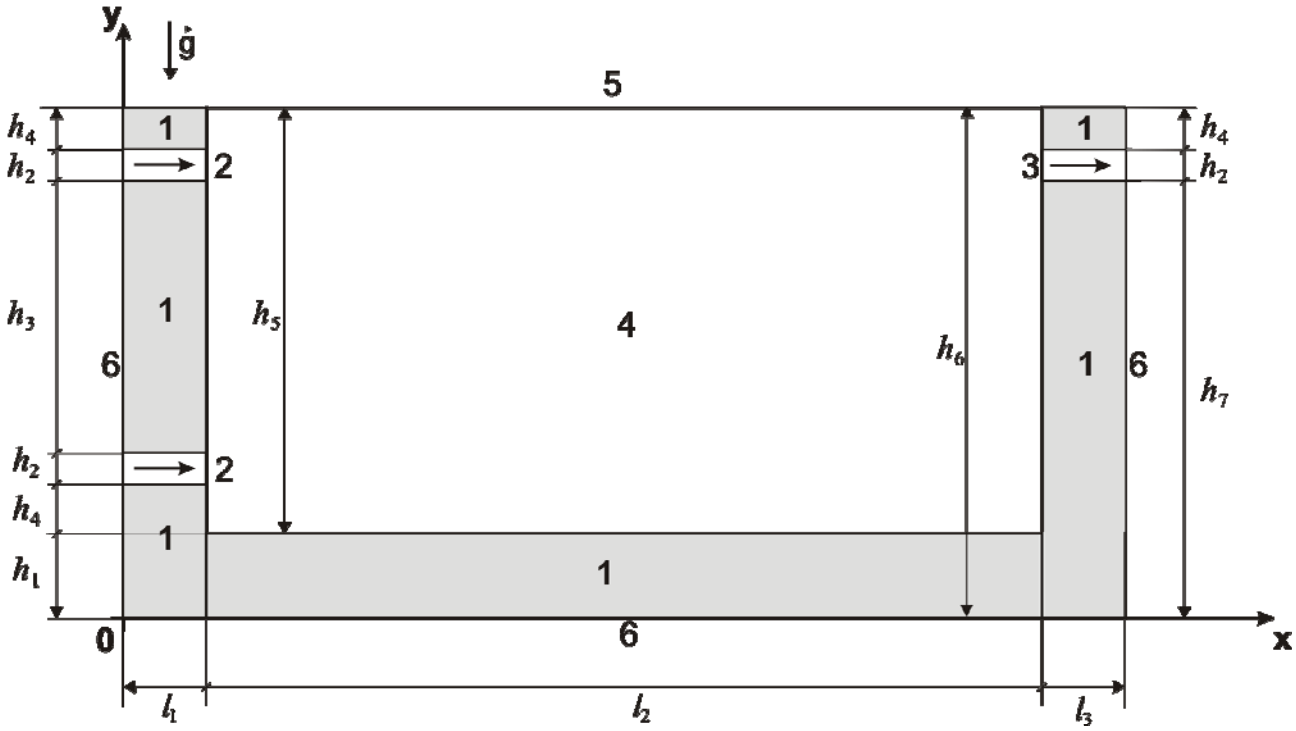


Рис. 1 Область решения задачи: 1) твердая фаза; 2, 3) участки ввода и вывода жидкости в полость; 4) жидкость; 5) свободная поверхность жидкости 6) внешние границы твердой фазы

В такой постановке процесс переноса тепла в области решения описывался системой нестационарных двумерных уравнений конвекции в приближении Буссинеска для жидкости и уравнением теплопроводности для элементов твердой стенки с нелинейными граничными условиями.

Безразмерные уравнения Навье-Стокса в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура» для рассматриваемой задачи имели вид:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U\frac{\partial \Omega}{\partial X} + V\frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2}\right) + \frac{\mathrm{Gr}}{\mathrm{Re}^2}\left(\frac{\partial \Theta}{\partial X}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U\frac{\partial \Theta}{\partial X} + V\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\mathrm{Re}\cdot \mathrm{Pr}}\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2}\right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = \Omega, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mathrm{Fo}}\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2}, \quad (4)$$

где X,Y – безразмерные декартовы координаты; τ - безразмерное время; U,V – безразмерные скорости; V_{in} – масштаб скорости (скорость потока на входе); $\Theta = (T - T_0)/(T_{in} - T_0)$ - безразмерная температура; T_0 – температура жидкости и твердого тела в начальный момент времени; T_{in} – температура входного потока; ψ - функция тока; Ψ - безразмерный аналог ψ; ω - вихрь скорости; Ω - безразмерный аналог ω; $Gr = g\beta L^3 (T_{in} - T_0)/\nu^2$ - число Грасгофа; β - температурный коэффициент объемного расширения; g – ускорение, создаваемое массовыми силами; L – длина полости (l_2 на рис. 1); ν - коэффициент кинематической вязкости; $Re = 2vL/\nu$ - число Рейнольдса; v – скорости по оси y; $Pr = \nu/a$ - число Прандтля; $Fo = at_0/L^2$ - число Фурье; a - коэффициент температуропроводности;

Начальные условия для системы уравнений (1)-(4):

$$\Psi(X,Y,0) = 0,$$
$$\Omega(X,Y,0) = 0,$$
$$\Theta(X,Y,0) = 0.$$

Граничные условия:

- на внешнем контуре рассматриваемой области (кроме свободной поверхности жидкости)

$$\begin{cases} Y = 0,\ 0 \le X \le \dfrac{l_1 + l_2 + l_3}{L}; \\ X = 0,\ 0 \le Y \le \dfrac{h_1 + h_5}{L}; \\ X = \dfrac{l_1 + l_2 + l_3}{L},\ 0 \le Y \le \dfrac{h_7 + h_2 + h_4}{L}; \end{cases}$$

задаются граничные условия первого рода $\Theta = 0$ (1 вариант) либо граничные условия второго рода $\dfrac{\partial \Theta}{\partial n} = Ki$ (2 вариант);

- на верхней границе рассматриваемой области задано условие третьего рода для уравнения энергии и условие свободной поверхности для уравнения энергии:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0,\ \tau_z = \dfrac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}, \\ \dfrac{\partial \Theta_f(X,Y)}{\partial Y} = Bi \cdot \Theta_f(X,Y) + Bi \cdot \dfrac{T_0 - T_e}{T_{in} - T_0} + K_i, \end{cases} \quad \text{при } Y = \frac{h_1 + h_5}{L},\ \frac{l_1}{L} \le X \le \frac{l_1 + l_2}{L};$$

- на внутренних границах раздела твердой и жидкой фазы, параллельных оси 0Y принято:

$$\left|\begin{array}{l}\Psi = 0,\ \dfrac{\partial\Psi}{\partial X} = 0,\\ \begin{cases}\Theta_w = \Theta_f,\\ \dfrac{\partial\Theta_w}{\partial X} = \lambda_{w,f}\dfrac{\partial\Theta_f}{\partial X},\end{cases}\end{array}\right. \text{ при } \left|\begin{array}{l}X = \dfrac{l_1}{L},\ \dfrac{h_4}{L} \le Y \le \dfrac{h_1+h_4}{L},\ \dfrac{h_2+h_2+h_2}{L} \le Y \le \dfrac{h_2}{L},\\ \dfrac{h_7+h_2}{L} \le Y \le \dfrac{h_6}{L};\end{array}\right.$$

- на внутренних границах раздела твердой и жидкой фазы, параллельных оси 0X:

$$\left|\begin{array}{l}\Psi = 0,\ \dfrac{\partial\Psi}{\partial Y} = 0,\\ \begin{cases}\Theta_w = \Theta_f,\\ \dfrac{\partial\Theta_w}{\partial Y} = \lambda_{w,f}\dfrac{\partial\Theta_f}{\partial Y},\end{cases}\end{array}\right. \text{ при } Y = \frac{h_4}{L},\ \frac{l_1}{L} \le X \le \frac{l_1+l_2}{L};$$

- участок ввода жидкости:

$$\left|\begin{array}{l}\Theta = 1,\\ \dfrac{\partial\Psi}{\partial Y} = 1,\end{array}\right. \text{ при } X = \frac{l_1}{L}, \frac{h_1+h_4}{L} \le Y \le \frac{h_1+h_4+h_2}{L};$$

- участок оттока жидкости:

$$\left|\begin{array}{l}\dfrac{\partial\Theta(X,Y)}{\partial Y} = 0,\\ \dfrac{\partial\Psi}{\partial Y} = 1,\end{array}\right. \text{ при } X = \frac{l_1+l_2}{L}, \frac{h_7}{L} \le Y \le \frac{h_7+h_2}{L}$$

здесь $\mathrm{Ki} = \dfrac{qL}{\lambda_w(T_{in}-T_0)}$ – число Кирпичева; $\mathrm{Bi} = \dfrac{\alpha L}{\lambda}$ – число Био; $\tau_z = \dfrac{\tau_z' L}{V_{in}\mu}$ - безразмерное касательное напряжение трения; $K_i = \dfrac{WQ_iL}{\lambda(T_{in}-T_0)}$ - безразмерное число испарения; τ_z' – касательное напряжение трения на свободной поверхности (5, рис.1); μ – динамическая вязкость жидкости; α – коэффициент теплообмена между внешней средой и рассматриваемой областью решения по границе $y = h_6$; T_e – температура окружающей среды; λ_w – коэффициент теплопроводности твердой фазы; λ_f – коэффициент теплопроводности жидкой фазы; $\lambda_{w,f} = \lambda_w / \lambda_f$ – относительный коэффициент теплопроводности; q –

тепловой поток на внешних границах области решения (6, рис.1); $W = \frac{A(P_n - P'')}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} \cdot T_{pb}}}$ - массовая скорость испарения; Q_i – теплота фазового перехода; P_n – давление насыщения; P'' - парциальное давление испаряющихся компонентов; R_g – газовая постоянная; M – молекулярный вес; A – коэффициент аккомодации; T_{pb} – температура испарения.

Система уравнений (1) - (4) с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей.

Уравнения (1) – (4) решались последовательно. Каждый временной шаг начинался с вычисления поля температуры в жидкости и в элементах твердой стенки (уравнения 2,4), затем решалось уравнение Пуассона для функции тока (2). Далее определялись граничные условия для вектора вихря, и решалось уравнение движения (1).

Для численного решения уравнений (1), (3) применялась разностная схема переменных направлений. Для того чтобы схема не зависела от знака скорости аппроксимация конвективных членов рассматривалась усредненной относительно U и $|U|$ (V и $|V|$). Уравнения (2), (4) решались с использованием схемы расщепления. Для разрешения нелинейного граничного условия III рода использовался метод простой итерации.

Метод решения был протестирован на 3 модельных задачах: течение жидкости в выемке с движущейся крышкой, вынужденная конвекция в прямоугольной каверне с входным и выходным отверстием, естественная конвекция в замкнутой прямоугольной области с участком повышенной температуры на нижней стенке.

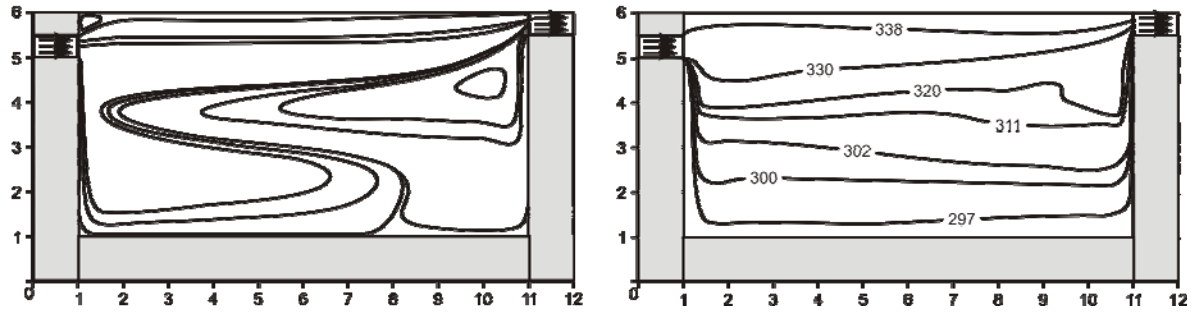
Рассмотренные модельные задачи показали, что использование предложенного численного алгоритма для моделирования процессов свободной и вынужденной конвекции дает достаточно хорошее согласование с результатами как экспериментальных работ, так и теоретических. Поэтому разработанные автором численный метод и алгоритм был применен для моделирования процесса нестационарной смешанной конвекции в технологическом водоеме. Разработанные метод и алгоритм были протестированы как на задачах естественной конвекции, так и вынужденной.

Численные анализ основных закономерностей был проведен при следующих значениях безразмерных и размерных величин: Pr=7,1, $100 \le \mathrm{Re} \le 1000$, $\mathrm{Gr} \le 10^5$, T_0=293 K, $300 \le T_{in} \le 343$ K, $273 \le T_e \le 293$ K.

Диапазоны изменения безразмерных величин и размерных характеристик выбирались исходя из следующих условий. Первое – соответствие диапазонам изменения параметров в реальных вариантах реализации таких систем «жидкость – твердое тело – газообразная внешняя среда». Второе – реальные масштабы существования как вынужденной, так и естественной конвекции без вырождения какого – либо из этих механизмов теплопереноса. Рассматривались

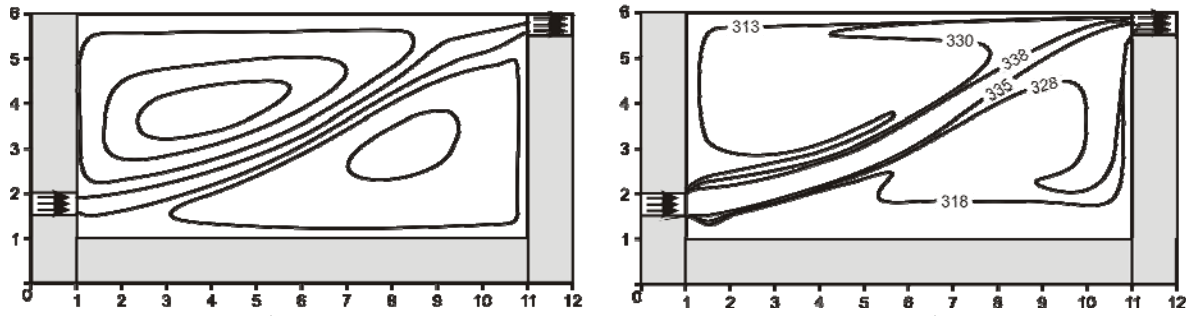
в основном не самые благоприятные для реализации «сопряженного» теплопереноса диапазоны изменения, как размерных величин, так и безразмерных комплексов.

В результате численного решения задачи получены распределения гидродинамических параметров и температур, характеризующие основные закономерности рассматриваемого процесса (рис. 2-12). Выделены основные циркуляционные течения в различных зонах области решения, обусловленные влиянием источников ввода и вывода массы и наличием неоднородного теплоотвода с внешнего контура прямоугольной полости.



а) б)

Рис. 2 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. Область ввода и вывода массы расположены в верхней части полости (Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000). По осям координат отложены размеры в м



а) б)

Рис. 3 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. Вдув массы находится в нижней части, а выдув в верхней части полости (Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000). По осям координат отложены размеры в м

Исследовано влияние местоположения отверстий ввода и вывода массы жидкости при различных режимах конвекции на гидродинамику водоема (рис. 2-4). Установлено, что перепад температуры по высоте уменьшается при смещении входного отверстия в нижнюю часть почти в два раза для рассматриваемых выше вариантов (рис. 4). Интересным для практики является то что, несмотря на существенное отличие температурных полей в двух наиболее типичных рассмотренных вариантах имеет место достаточно интенсивный массообмен между различными зонами рассматриваемого водоема. В одном случае при расположении входного отверстия внизу (рис. 3) этот эффект достигается за счет разной высоты входного и выходного отверстий. Но интерес представляет и второй вариант схемы расположения

отверстий (рис. 2). В этой схеме массобмен реализуется за счет естественной конвекции жидкости, обусловленной значительным перепадом температур по высоте. При этом температуры воды на участках вывода для этих двух случаев отличаются незначительно (единицы градусов), а механизмы теплопереноса различны.

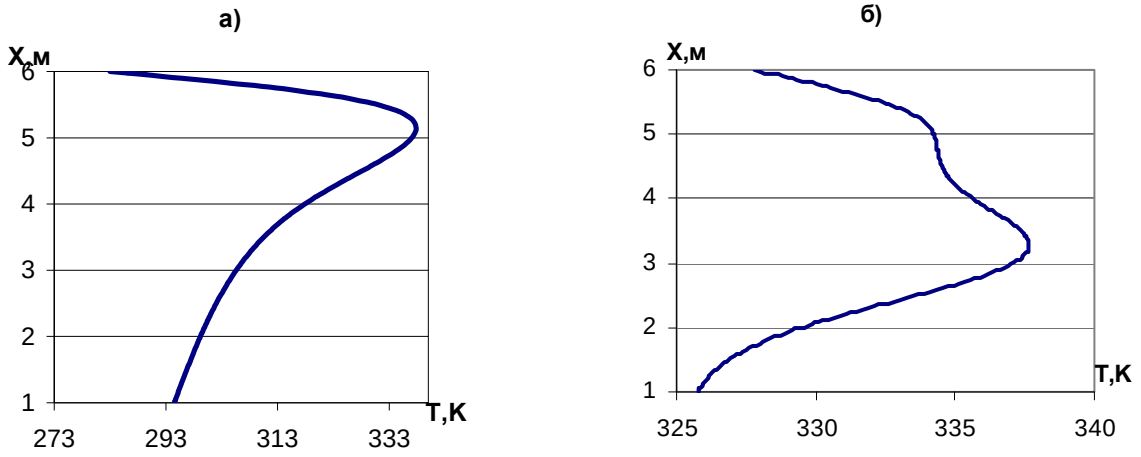
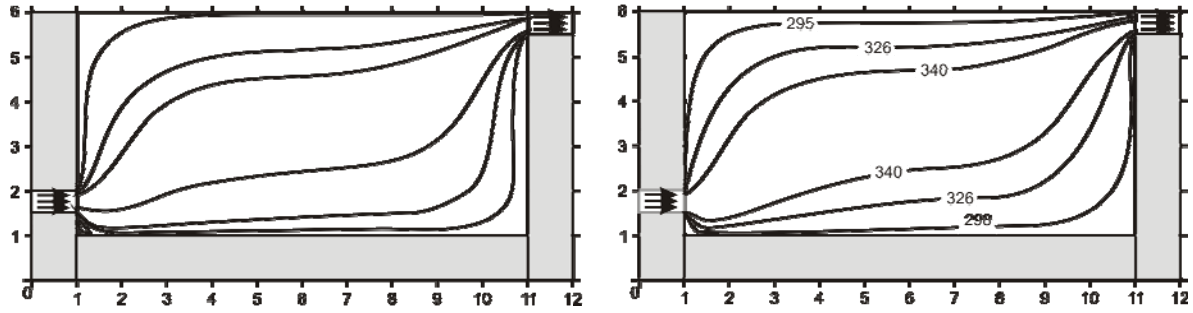


Рис. 4 Профили температуры по вертикали в центральном сечении рассматриваемой области (x=6 м) в условиях смешанной конвекции. а) – при расположении области ввода жидкости в верхней части, б) – при расположении области ввода жидкости в нижней части

Проведен анализ модели вынужденной конвекции жидкости, когда вдув массы находится в нижней части, а выдув в верхней части полости (рис. 5). Видно равномерное, без образования, каких либо вихрей, течение жидкости в полости и соответственно аналогичное распределение температуры.

Сравнение результатов численного анализа для двухмерных моделей конвекции показывает, что неучет термогравитационных эффектов приводит к значительным отклонениям как локальных, так и интегральных характеристик течения. Происходит существенно более интенсивное перераспределение массы и энергии в рассматриваемой области.



а) б)

Рис. 5 а) - структура течения, б) - поле температур для модели вынужденной конвекции. Вдув массы находится в нижней части, а выдув в верхней части полости (Pr=7,1, Re=1000). По осям координат отложены размеры в м

Выявлено влияние теплообмена на внешнем контуре рассматриваемой области на смешанную конвекцию жидкости (рис.6). Характерным для

варианта задания граничных условий первого рода на внешнем контуре является большой перепад температур в жидкости (рис 6,б). В условиях же достаточно интенсивного теплоотвода с нижней горизонтальной и с вертикальных границ значительно, по сравнению с вариантом задания граничных условий первого рода на внешнем контуре, снижаются перепады температур во всех зонах области решения. Происходит выравнивание температуры в объеме (рис. 6,г).

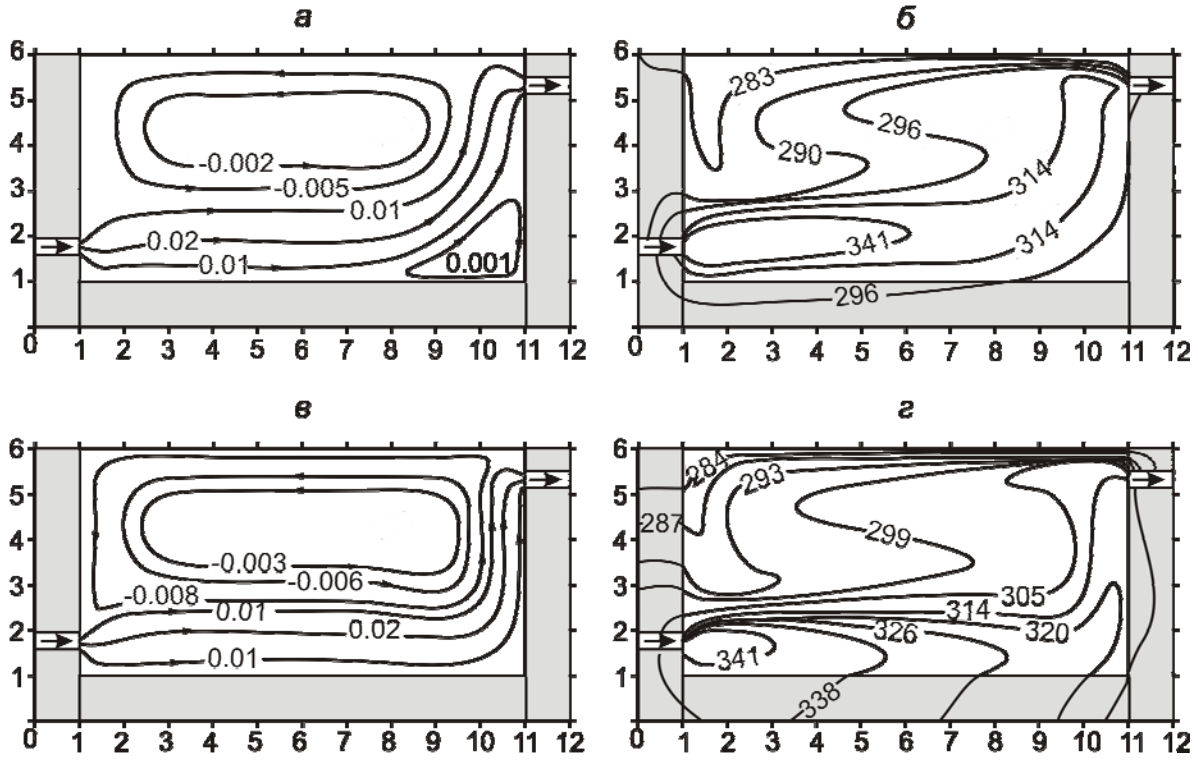
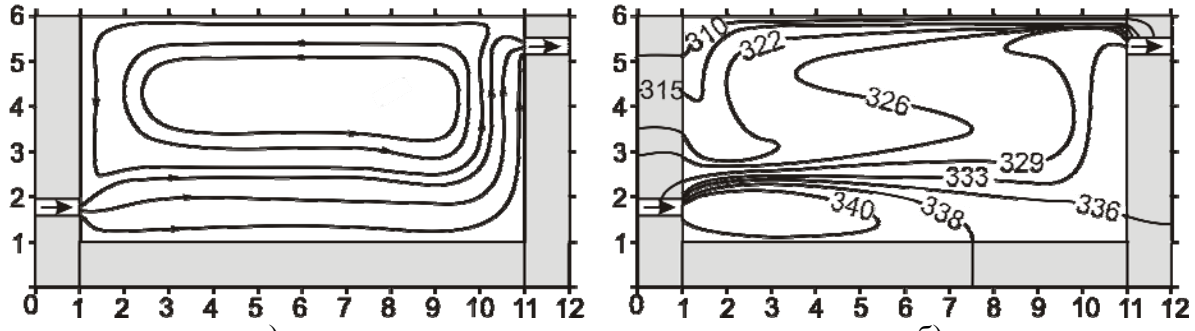


Рис. 6 Структура течения (а, в) и поле температур (б, г) для модели смешанной конвекции. На внешнем контуре, за исключением верхней свободной границы, заданы различные граничные условия: а, б) задано граничное условие первого рода T=293 K, в, г) имеет место теплоотвод q=3 Вт/м^2. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Установлены масштабы влияния различной интенсивности теплоотвода на твердых границах внешнего контура на смешанную конвекцию в водоеме (рис.7-10).

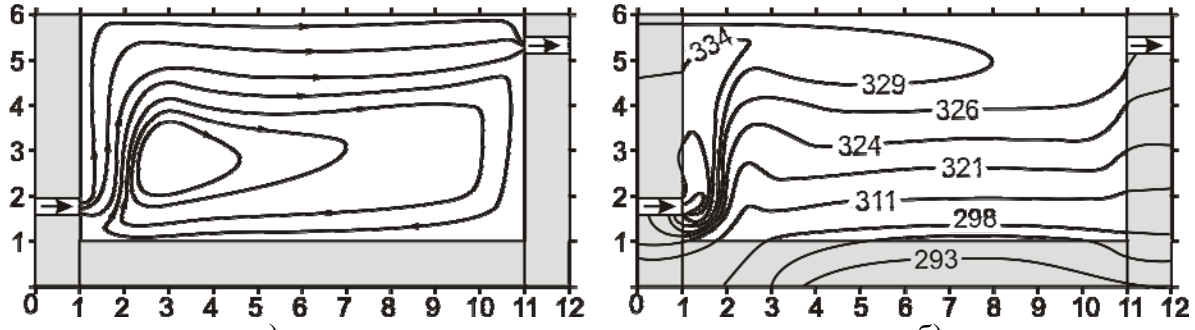
На рис. 7 показаны линии тока и поле температур для случая, когда левая, правая и нижняя границы внешнего контура теплоизолированы. Этот вариант граничных условий рассмотрен в качестве базового в связи с тем, что многие задачи естественной конвекции, в том числе достаточно сложные решены в таком приближении. В полости имеет место равномерное распределение температуры за счет того что, происходит охлаждение жидкости только на верхней границе, а теплоотвод на других границах отсутствует.



а) б)

Рис. 7 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. Внешний контур, за исключением верхней свободной границы, теплоизолирован. Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000, Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Исследована гидродинамика и теплообмен в рассматриваемой области для случая, когда на нижней границе внешнего контура присутствует теплоотвод, а левая и правая границы теплоизолированы (рис. 8). Хорошо видно образование одного обширного вихря в нижней части полости. Основным механизмом его образования являются силы вынужденной конвекции. Горячая жидкость за счет сил естественной конвекции поднимается вверх. При наличии теплоотвода с нижней границы внешнего контура, охлажденная жидкость, двигаясь вдоль дна, направляет основной поток к левой стенке и верхней границе полости. Распределение температуры в этом случае существенно неравномерное. В верхней части полости, для рассматриваемого случая, температура на 50 градусов выше, чем в нижней. Происходит это за счет того, что охлаждаемая жидкость в нижней части полости практически не смешивается с основным нагретым потоком.

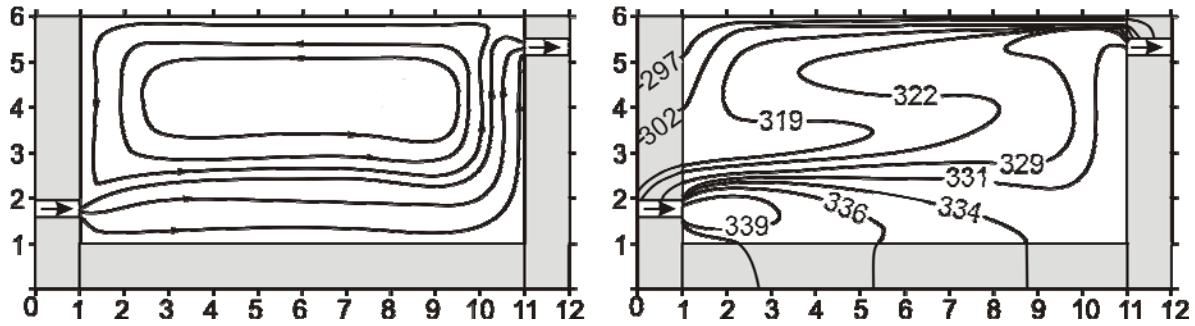


а) б)

Рис. 8 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. На нижней границе внешнего контура присутствует теплоотвод *q=3 Вт*, а левая и правая границы теплоизолированы. Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Исследована гидродинамика и теплообмен для случая, когда на левой границе внешнего контура присутствует теплоотвод, а нижняя и правая границы теплоизолированы (рис. 9). Установлено что, теплоотвод с левой границы не оказывает существенного воздействия на структуру течения, а только дополнительно охлаждает жидкость в верхнем циркуляционном вихре. Перепад температур значителен (градусов 40) за счет того, что в основном

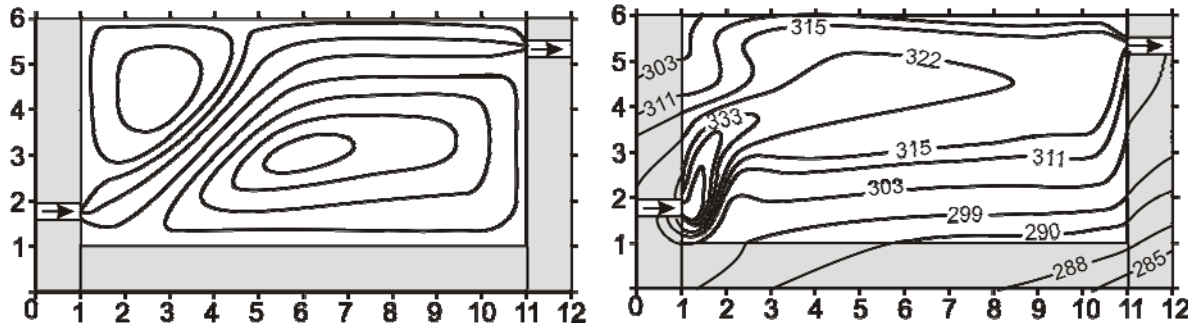
тепло отводится от жидкости, циркулирующей в верхнем вихре. Падение температуры основного потока происходит только за счет контакта с вихрем, который охлаждается за счет теплоотвода с верхней и левой внешней границы полости. Область относительно низкой температуры находится в верхнем левом углу полости, так как в этой области наиболее интенсивен теплоотвод во внешнюю среду.



а) б)

Рис. 9 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. На левой границе внешнего контура присутствует теплоотвод *q=3 Вт*, а нижняя и правая границы теплоизолированы. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Исследована гидродинамика и теплообмен для случая, когда на правой границе внешнего контура есть теплоотвод, а нижняя и левая границы теплоизолированы (рис. 10). Видно образование двух вихрей в рассматриваемой полости. Вихрь в нижней области масштабнее вихря в верхней области, так как размер верхнего вихря ограничивается поднимающимся потоком горячей жидкости. Температурное поле достаточно равномерно, так как основной поток проходит практически по диагонали полости. Перепад температуры составляет не более 35 градусов, так как образуются два вихря, в которых достаточно интенсивно происходит теплообмен с основным потоком.



а) б)

Рис. 10 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции. На правой границе внешнего контура присутствует теплоотвод *q=3 Вт*, а нижняя и левая границы теплоизолированы. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Распределения гидродинамических параметров и температур при различной интенсивности теплоотвода на внешнем контуре рассматриваемой полости показывают что, изменение интенсивности теплоотвода на границах области решения приводит к масштабным изменениям структуры течения и температурных полей жидкости. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том что, регулируя интенсивность теплообмена на границах прямоугольной области можно управлять тепловым режимом жидкости при реализации смешанной конвекции в условиях ввода и отвода массы в области ограниченных размеров.

Изучено влияние внешних условий на свободной поверхности на гидродинамику и тепловой режим промышленного водоема. Типичные результаты решения сформулированной задачи при различных скоростях и направлениях движения внешней среды над свободной поверхностью жидкости показаны на рис. 11.

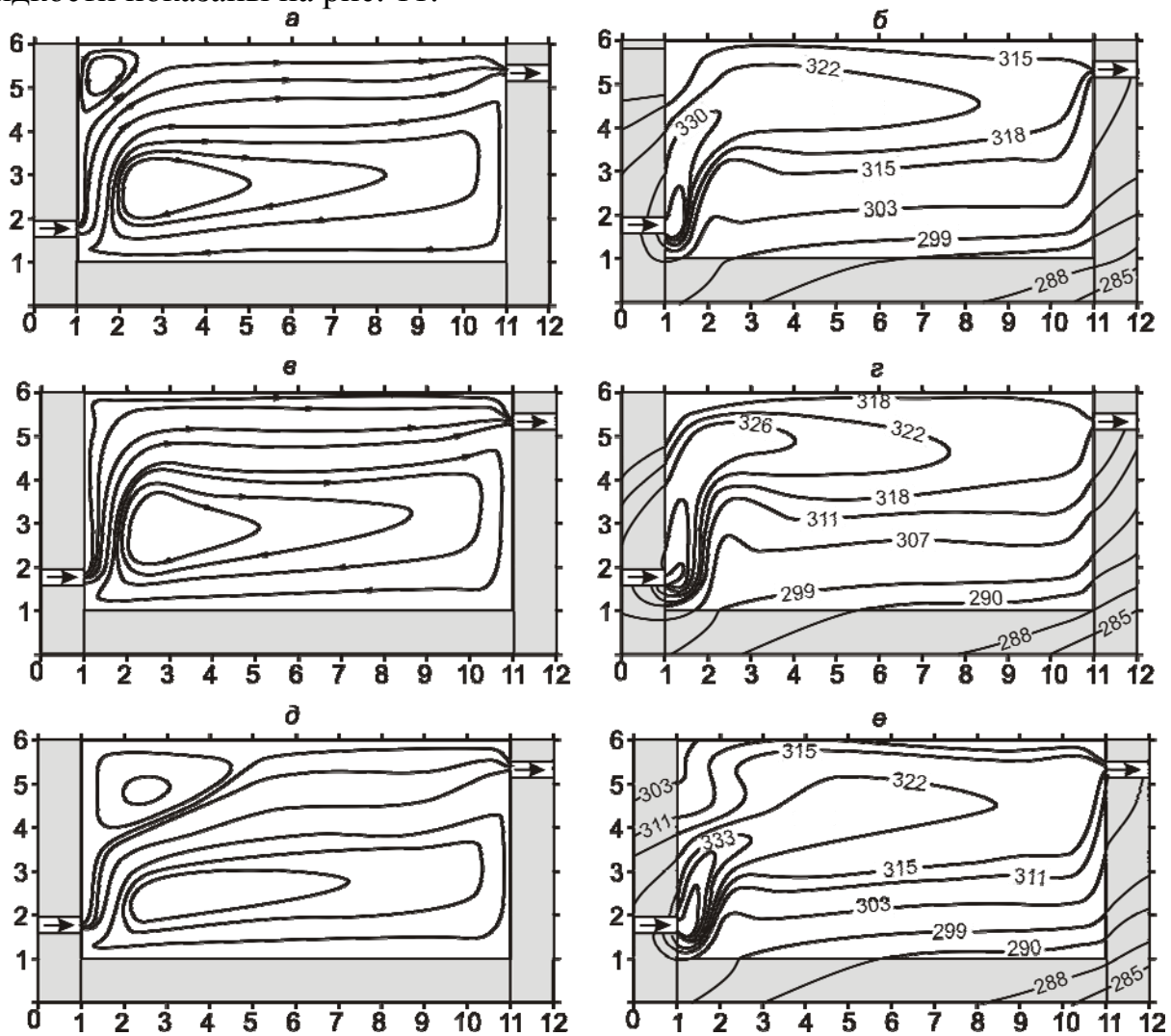
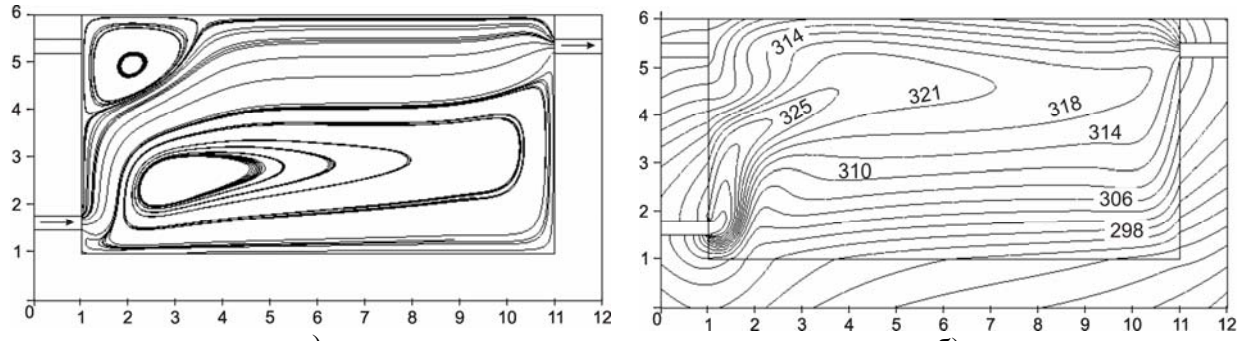


Рис. 11 Структура течения (а, в, д) и поле температур (б, г, е) для модели смешанной конвекции при различных скоростях движения внешней среды над поверхностью жидкости: а, б) V_f=0 м/с, в, г) V_f=2 м/с, д, е) V_f=-2 м/с. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Численный анализ показал, что скорость и направление перемещения воздушных масс над поверхностью открытого водоема могут изменить гидродинамическое и температурное поле в рассматриваемой области. Установлено, что при моделировании конвективных течений в открытых водоемах можно учитывать перемещение воздушных масс над поверхностью, так как они оказывают влияние на гидродинамическое и температурное поле в рассматриваемой области. Масштабы выделенного эффекта, связанного только с изменением величины напряжений трения на свободной поверхности жидкости, относительно невелики (5-10%). Соответственно, учет этого фактора целесообразен только при проведении высокоточного анализа гидродинамики и теплопереноса в водоеме.

Установлены масштабы влияния конвективного и конвективно-испарительного теплоотвода с открытой поверхности на гидродинамику и тепловой режим водоема в разные времена года.

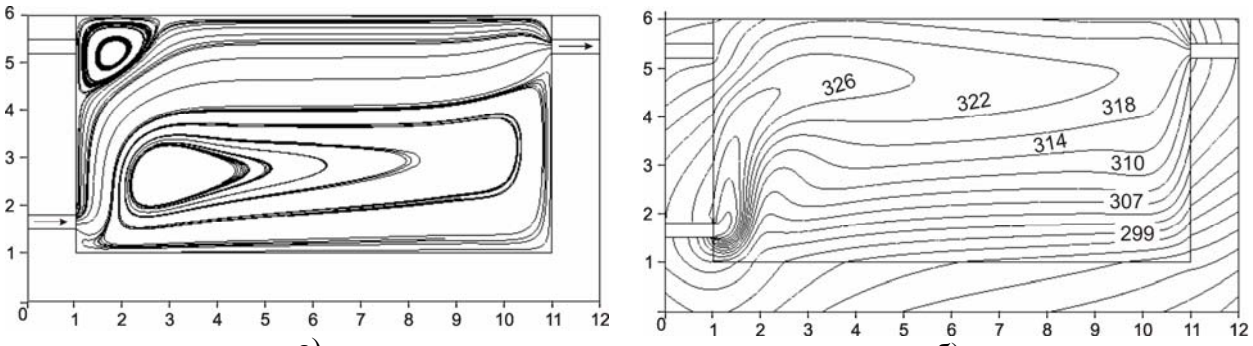
На рис. 12, 13 приведены типичные результаты решения сформулированной задачи при наличии только конвективного переноса тепла на свободной поверхности жидкости в окружающую среду в различные термические периоды. Выявлено, что различия в гидродинамике и теплопереносе для четырёх характерных сезонов несущественны. Зимой, летом, осенью и весной характерные температуры во всех точках области решения задачи отличаются незначительно. Данный результат не является очевидным, но характеризует в определённой степени роль конвективного теплообмена на свободной поверхности водоема в формировании температурных полей и распределений скоростей.



а) б)

Рис. 12 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции при наличии на свободной поверхности только конвективного теплообмена с окружающей средой в зимний период. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Установлено, что при низкой (характерной для обычных условий работы водоемов) интенсивности теплосъема с водяной поверхности температура внешней среды даже при изменении от -16 до +16 ^{0}C практически не сказывается на температурное поле водоема. Такой результат характерен только для модели, неучитывающей теплоту испарения жидкости на свободной поверхности водоема.



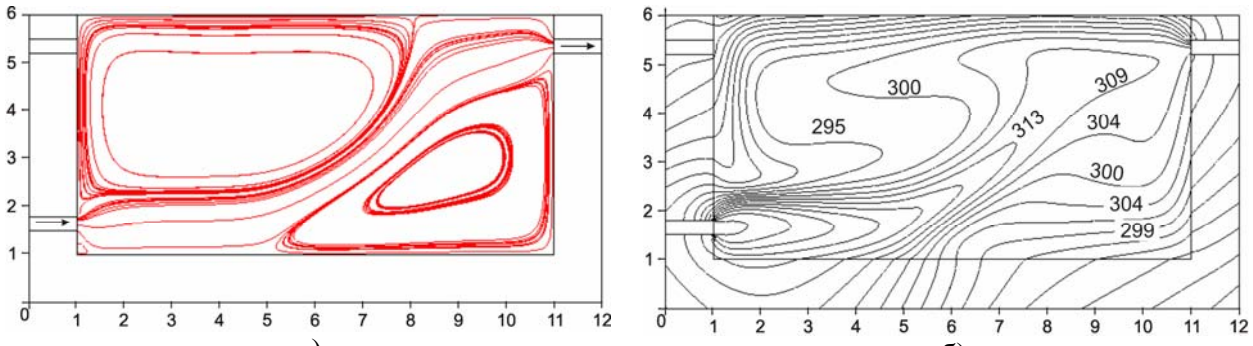
а) б)

Рис. 13 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции при наличии на свободной поверхности только конвективного теплообмена с окружающей средой в летний период. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

Исследовано влияние конвективно-испарительного теплоотвода с открытой поверхности жидкости на гидродинамику и тепловой режим водоема в разные времена года.

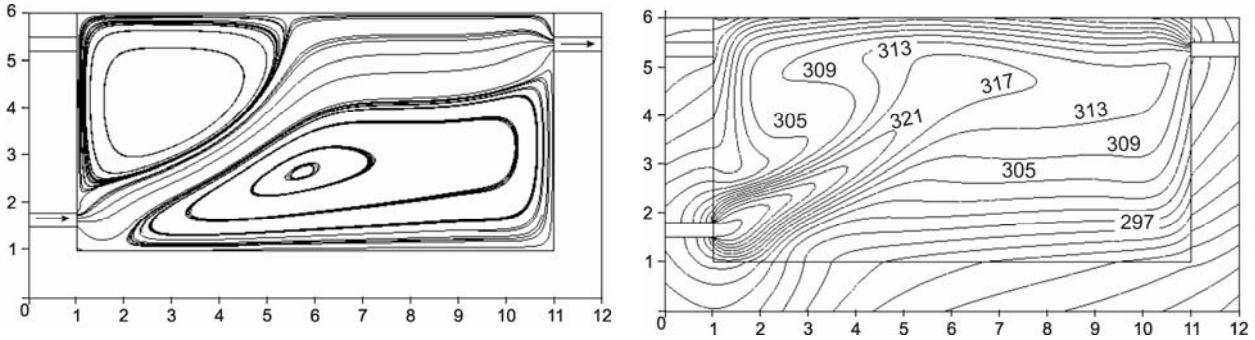
На рис. 14-15 приведены типичные результаты решения сформулированной задачи при наличии на свободной поверхности жидкости теплоотвода за счет конвекции и испарения в окружающую среду в различные термические периоды. Видно, что температурные поля на рис. 12-15, существенно отличаются. В этом случае формируется по существу совершенно другая конфигурация течения в области анализа. Соответственно меняются и температурные поля (рис.14,б, рис. 15,б).

Установлено, что при расчете тепловых режимов водоемов необходимо учитывать тепловой эффект испарения воды на свободной поверхности, который играет основную роль в формировании температурных полей водоема. Также установлено, что теплоотвод по внешнему контуру в рассмотренных режимах умеренной интенсивности составляет не менее 20% от теплоотвода за счет испарения жидкости.



а) б)

Рис. 14 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции при наличии на свободной поверхности теплообмена за счет конвекции и за счет испарения в окружающую среду в зимний период. Pr=7,1, Gr=10^5, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К



а) б)

Рис. 15 а) - структура течения, б) - поле температур для модели смешанной конвекции при наличии на свободной поверхности теплоотвода за счет конвекции и за счет испарения в окружающую среду в летний период. Pr=7,1, $Gr=10^5$, Re=1000. Размеры приведены в м, температуры – в К

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе впервые проведено математическое моделирование смешанной конвекции жидкости в типичном водоеме-охладителе ТЭС с локальными источниками ввода и вывода массы и с учетом теплоотвода в окружающую среду по всему внешнему контуру.

Численное исследование выполнено с помощью разработанного конечно-разностного алгоритма в диапазоне изменения числа Грасгофа $10^4 \le \mathrm{Gr} \le 10^7$ и чисел Рейнольдса $10 \le \mathrm{Re} \le 1000$.

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Исследовано влияние геометрического расположения отверстий ввода и вывода массы жидкости при различных режимах конвекции на гидродинамику водоема. Выявлено, что изменение геометрического расположения участка ввода жидкости кардинально меняет картину течения в полости, а перепад температуры по высоте уменьшается при смещении входного отверстия в нижнюю часть почти в два раза. Установлено, что изменяя координаты участков ввода и оттока массы можно регулировать тепловой режим жидкости в технологических полостях, что позволяет оптимизировать параметры технологических процессов ТЭС и дает предпосылки для разработки оптимальных схем водоемов-охладителей, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества используемой жидкости. Также выявлено, что неучет термогравитационных эффектов приводит к значительным отклонениям как локальных, так и интегральных характеристик течения. Установлено что, при моделировании конвективно-кондуктивного теплопереноса в прямоугольной полости, при наличии градиента температур больше десяти градусов, необходимо учитывать естественную конвекцию.

2. Установлены масштабы влияния различной интенсивности теплоотвода на твердых границах внешнего контура на смешанную конвекцию в водоеме. Установлено, что, регулируя интенсивность теплообмена на границах прямоугольной области можно управлять тепловым режимом жидкости при

реализации смешанной конвекции в условиях ввода и отвода массы в области ограниченных размеров.

3. Исследовано влияние внешних условий на свободной поверхности на гидродинамику водоема-охладителя ТЭС. Установлено, что при моделировании конвективных течений в открытых водоемах можно учитывать перемещение воздушных масс над поверхностью, так как они оказывают влияние на гидродинамическое и температурное поле в рассматриваемой области.

4. Установлены масштабы влияния конвективного и конвективно-испарительного теплоотвода с открытой поверхности на гидродинамику и тепловой режим водоема в разные времена года. Выявлено, что теплообмен за счет испарения жидкости с поверхности водоема является одним из основных механизмов теплоотвода. Также выявлено, что теплоотвод по внешнему контуру в рассмотренных режимах умеренной интенсивности составляет не менее 20% от теплоотвода за счет испарения жидкости.

5. Предложенная модель смешанной конвекции жидкости в типичном технологическом открытом водоеме с локальными источниками ввода и вывода массы и с учетом теплоотвода в окружающую среду по всему внешнему контуру может быть использована для совершенствования методов расчета тепловых режимов технологических водоемов с целью улучшения их технико-экономических характеристик и экономии энергетических ресурсов.

6. Результаты проведенных исследований позволяют оценить масштабы теплового загрязнения окружающей среды водоемом-охладителем ТЭС и могут быть использованы в разработке и создании оптимальных тепловых систем для её защиты.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Максимов В.И., Дорохов А.Р., Медведев Г.Г. Испарение влаги в отрывных течениях // II Международный семинар энергосберегающих технологий. – Томск, 2001. – С. 45-48.

2. Максимов В.И., Дорохов А.Р. Исследование тепло – и массообмена в отрывных течениях // Известия Томского политехнического университета. - 2002. - Т. 305, № 2. - С. 20-24.

3. Медведев Г.Г., Немойкин Ю.В., Максимов В.И. Математическое и экспериментальное моделирование вихревых потоков в каверне // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск, 2002. – С. 65-68.

4. Медведев Г.Г., Максимов В.И. Исследование влияния отрывных течений на интенсивность тепло и массообмена // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы шестой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск, 2003. – С. 42-46.

5. Медведев Г.Г., Немойкин Ю.В., Максимов В.И. К вопросу о влиянии вихревых течений в каверне на тепло- и массообмен // Тезисы докладов девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, 2003. – С. 15.

6. Медведев Г.Г., Немойкин Ю.В., Максимов В.И., Экспериментальное моделирование потоков в каверне // «Энергетика: экология, надежность, безопасность» Материалы седьмой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск, 2003. – С. 65-68.

7. Максимов В.И. Математическое исследование процесса конвективно-кондуктивного теплообмена в сопряженной постановке в прямоугольных технологических водоемах // II международная научно-техническая конференция «новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании». – Тюмень, 2006. – С. 133-136.

8. Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Смешанная конвекция в прямоугольной области с локальными источниками ввода и вывода массы и неоднородным теплообменом на внешних границах //Известия вузов: Физика. – 2006. –Т.49, №6. С. 85-90.

9. Maksimov V.I. Numerical simulation is convective-conductive heat transfer in the rectangular region // Modern techniques and Technologies: XII International scientific and practical conference of students, Post-graduates and young scientists. – Tomsk, 2006, P. 160-162.

10.Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Математическое моделирование смешанной конвекции в сопряженной постановке в прямоугольной области //Промышленная теплотехника. - 2006. - Т. 28, № 6. - С. 43-55.

11.Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Смешанная конвекция в прямоугольной области с локальными источниками ввода и вывода массы в условиях неоднородного теплообмена // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т. 308, № 5. - С. 114-118.

12.Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Моделирование сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса в прямоугольной области с локальными участками ввода и вывода массы // Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену. – Москва, 2006. –Т. 7. С. 248-251.