УДК 536.25:536.423.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ С КОНДЕНСАЦИЕЙ НА РЯДЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБОК

Абрамов А.Г., Иванов Н.Г., Ковалёв Г.А., Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

Грант №11-08-00590 РФФИ.

АННОТАЦИЯ

Представляются результаты численного моделирования турбулентной конвекции паровоздушной смеси в замкнутой области при наличии пленочной конденсации пара на расположенном в центральной части бесконечном ряде охлаждаемых вертикальных трубок. Обсуждаются результаты расчетов свободной конвекции воздуха, проведенных для той же модельной конфигурации. Расчеты выполнены в трехмерной стационарной постановке по методу RANS и нацелены на изучение влияния расстояния между трубками теплообменной системы на структуру течения и характеристики теплоотдачи. Выполнен обстоятельный анализ структуры полей скорости, температуры и массовой концентрации компонентов смеси в области, а также распределений теплового потока, отводимого через поверхности трубок.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время весьма значительные усилия направляются на решение задач, связанных с обеспечением эксплуатационной безопасности энергоблоков АЭС. В новых проектах, ориентирующихся на использование реакторов типа ВВЭР, предусмотрено применение защитных систем, основанных на свободно-конвективном механизме удаления теплоты распада из объема защитной оболочки (контейнмента) при возникновении аварийных ситуаций [1]. Предполагается, что водяной пар, образующийся в ходе аварий, сопровождающихся потерей теплоносителя, будет удаляться путем конденсации на расположенных в подкупольном пространстве вертикально ориентированных теплообменниках или на стенках контейнмента. Конденсация пара происходит при этом в присутствии неконденсирующихся газов (водорода и воздуха), что существенно снижает интенсивность теплоотдачи.

Теплообменники, на поверхности которых создаются условия для конденсации, обычно представляют собой ряд разнесенных вертикальных трубок, охлаждаемых изнутри водой. На эффективность работы такой теплоотводящей системы, помимо других факторов, могут влиять ее конструктивные особенности (в частности, расстояние между трубками). Нисходящие пограничные слои у поверхностей соседствующих трубок могут взаимодействовать друг с другом и с формирующимся в замкнутом объеме контейнмента циркулирующим турбулентным потоком конвективной природы, что сказывается на структуре течения и процессах тепломассообмена.

На сегодняшний день наиболее доступным и перспективным методом исследований по проблеме является численное моделирование на основе уравнений динамики вязкой жидкости [1-3]. На кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ с начала 1990-х годов ведутся работы по развитию собственного программного комплекса, ориентированного на численное решение уравнений Навье-Стокса для областей с произвольной геометрией. Код имеет опции для решения задач свободной и смешанной конвекции парогазовой смеси с учетом поверхностной конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов. С помощью этого кода в двумерной и трехмерной постановках

© Абрамов А.Г., Иванов Н.Г., Ковалёв Г.А., Смирнов Е.М.

было выполнено численное моделирование ряда задач по рассматриваемой тематике [3, 4].

В настоящей работе представляются результаты расчетов турбулентной конвекции паровоздушной среды, совершающей циркуляционное движение в замкнутой области, и сопутствующей пленочной конденсации пара на боковых поверхностях расположенного в центральной части области бесконечного ряда охлаждаемых вертикально ориентированных трубок. Обсуждаются также результаты численного моделирования свободно-конвективного течения воздуха в подогреваемой снизу области, выполненного для той же геометрической конфигурации и при сохранении тепловых граничных условий. Основной акцент в исследованиях сделан на изучении влияния расположения трубок на структуру течения и распределение теплового потока по теплоотводящим поверхностям. Расчеты проведены в трехмерной стационарной постановке по методу RANS, отдельные геометрические и физические параметры заимствованы из экспериментальной работы [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача формулировалась для области, представлявшей собой бесконечную камеру прямоугольного сечения (высотой 4 м и шириной 0.45 м) с помещенным в ее центральной части бесконечным рядом вертикальных цилиндрических трубок (рис. 1). Трубки были расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, имели высоту 3.5 м и внешний радиус R = 0.019 м. В силу симметрии задачи в двух пространственных направлениях, расчеты выполнялись для области, содержащей четверть окружности одной из трубок. Размер расчетной области по трансверсальной координате z составлял $R + L/2$ (L – ширина межтрубного зазора).

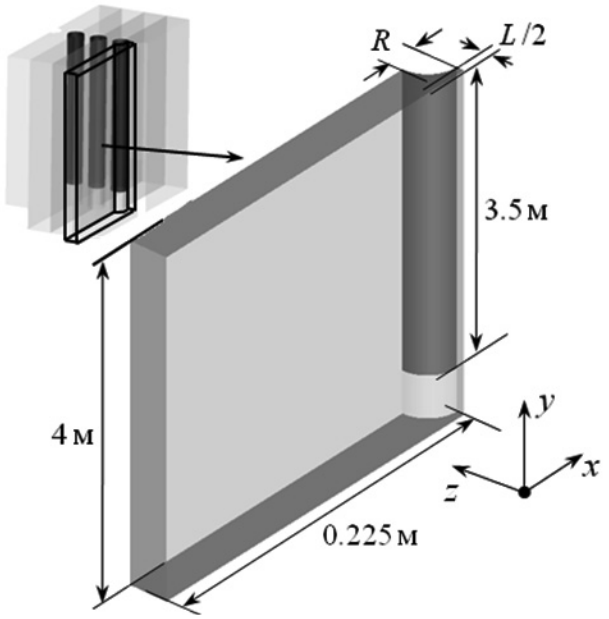

Рис.1 Геометрия расчетной области.

В расчетах были задействованы пять геометрий областей с разными значениями L, составлявшими $0.5R$, $1R$, $2R$, $4R$ и $6R$. Рассматривались две постановки задачи. В первой изучалась свободная конвекция воздуха (в отсутствии пара) в подогреваемой снизу замкнутой области. Нижняя граница считалась твердой стенкой с заданной на ней постоянной температурой T = 383.7 K. Во второй, основной расчетной постановке по проблеме численно моделировалась конвекция паровоздушной среды при наличии конденсации водяного пара на охлаждаемой внешней поверхности трубок. В этом случае на нижней границе области задавался однородный массовый поток горячего пара (T = 383.7 K), значение которого вычислялось исходя из условия одинаковости интегрального потока пара для всех пяти геометрий, равного $1.37 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Для обеих постановок на внешней поверхности трубки задавалось одинаковое значение температуры T = 349.6 K, полученное путем пространственного осреднения данных [5]. Верхняя и боковая вертикальная стенки полагалась теплоизолированными. На трех остальных вертикальных границах задавалось условие симметрии.

Начальный уровень давления в камере во всех расчетах составлял 1.5 атм. Вычисления начинались с состояния покоящейся среды при однородных полях температуры (368 K) и массовой концентрации пара (0.44, для паровоздушной смеси). Значения температуры на границах и физические свойства среды соответствовали одному из экспериментальных режимов [5].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Моделируется низкоскоростное турбулентное конвективное течение двухкомпонентной парогазовой смеси, происходящее в поле силы тяжести. Система определяющих уравнений включает в себя уравнения баланса массы, импульса и энергии для смеси в целом, а также уравнение переноса водяного пара:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{g}(\rho - \rho_h),$$

$$c_p \left[\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V} T) \right] = \frac{\partial p_a}{\partial t} - \nabla \cdot \boldsymbol{q} - (c_{p,g} \dot{\boldsymbol{m}}_g + c_{p,v} \dot{\boldsymbol{m}}_v) \cdot \nabla T,$$

$$\frac{\partial \rho y_v}{\partial t} + \nabla (\rho \boldsymbol{V} y_v) = \nabla \cdot \dot{\boldsymbol{m}}_v, \quad y_g + y_v = 1.$$

Здесь ρ, p, $\boldsymbol{V}$ и T – плотность, давление, скорость и температура смеси, p^* – модифицированное давление (p_h – гидростатическое давление, ρ_h – среднеобъемная плотность), p_a – среднее давление по объему смеси, c_p – удельная теплоемкость смеси, $y_i = \rho_i / \rho$ – массовые концентрации компонентов (ρ_i – парциальная плотность, $i = v,g$). Нижними индексами $(\dots)_v$ и $(\dots)_g$ обозначаются соответствующие величины для пара и неконденсирующегося газа. В первой расчетной постановке под "смесью" понимается воздух ($y_v = 0$), и последнее уравнение системы не решается.

Суммарный диффузионный перенос представлен в системе тензором напряжений $\boldsymbol{\tau}$ и векторами плотности потока тепла $\boldsymbol{q}$ и массы $\dot{\boldsymbol{m}}_i$, для которых используются градиентные аппроксимации в форме законов Ньютона, Фурье и Фика.

Плотность смеси определяется уравнением состояния (M_i – молекулярные веса компонентов):

$$\rho = \left(y_g / M_g + y_v / M_v \right)^{-1} p_a / (RT).$$

Динамический коэффициент вязкости и удельная теплоемкость смеси вычисляются путем взвешивания соответствующих величин компонентов пропорционально их массовым концентрациям. Используемые в модели зависимости для коэффициентов диффузии водяного пара в воздухе и вязкости смеси взяты из [6], а зависимость вязкости от температуры для каждого из компонентов задается степенной аппроксимацией с показателем $n = 0.76$. Входящий в градиентную аппроксимацию для вектора плотности потока тепла коэффициент теплопроводности смеси λ вычисляется с использованием взвешенного значения молекулярного числа Прандтля ($\mathrm{Pr}_g = 0.71$, $\mathrm{Pr}_v = 0.9$).

Моделирование турбулентности производится на основе SST модели Ментера. Турбулентные числа Прандтля и Шмидта задавались равными 0.9.

При решении задачи с накачкой давления за счет подачи пара в замкнутый объем для определения текущего уровня давления p_a накладывается условие сохранения массы воздуха, обеспечивающее интегральный баланс массы в области. Начальная масса воздуха вычисляется при заданном начальном давлении, температуре и составе смеси, после чего на каждой итерации уровень давления корректируется, чтобы обеспечить то же значение массы воздуха при текущем распределении температуры и концентрации компонентов.

Предполагается, что поверхностная конденсация пара на охлаждаемой поверхности сопровождается образованием пленки конденсата, которая стекает вниз под действием силы тяжести. В рамках принятой модели равновесной конденсации парциальное давление пара на поверхности пленки конденсата равно давлению насыщенных паров при соответствующей температуре. В используемом в расчетах приближении бесконечно тонкой пленки температура на границе с пленкой принимается равной заданной температуре стенки, а продольная компонента скорости полагается равной нулю.

Граничное условие для массовой доли пара на поверхности пленки записывается в виде (индекс $(\dots)_\delta$ отвечает поверхности пленки, $(\dots)_s$ – значению для насыщенного пара):

$$y_{v,\delta} = y_s = \frac{\rho_s}{\rho} = \frac{p_s}{p_a} \cdot \frac{M_v}{M} = \left(1 + \frac{M_g}{M_v} \cdot \frac{p_a - p_s}{p_s} \right)^{-1}.$$

Полный массовый поток $\dot{m}_\Sigma$ уходящей в пленку влаги равен массовому потоку смеси. Граничное условие для нормальной составляющей скорости на поверхности пленки $V_{n,\delta}$ может быть получено из соотношения:

$$\dot{m}_\Sigma = \rho y_{v,\delta} V_{n,\delta} - \rho D_v (\partial y_v / \partial n)_\delta = \rho V_{n,\delta}.$$

Полный тепловой поток на стенке q_Σ обусловлен переносом тепла за счет теплопроводности и выделением тепла при конденсации пара (r – удельная теплота парообразования):

$$q_\Sigma = q_{n,\delta} + q^{cond} = -\lambda (\partial T / \partial n)_\delta + r \rho V_{n,\delta}.$$

© Абрамов А.Г., Иванов Н.Г., Ковалёв Г.А., Смирнов Е.М.

Расчеты проведены в трехмерной стационарной постановке с использованием исследовательского программного CFD-комплекса SINF (Supersonic to INcompressible Flows). Пространственная дискретизация уравнений осуществляется в нем по методу контрольного объема со вторым порядком точности. Для получения нестационарных решений применяется неявная схема второго порядка по физическому времени. На каждой итерации производится линеаризация системы, являющейся результатом дискретизации исходных уравнений. Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений выполняется с помощью методов, основанных на подпространствах Крылова. Для нахождения поля давления, обеспечивающего выполнение баланса массы в низкоскоростных потоках, используется подход, базирующийся на методе SIMPLEC.

Размерность расчетных сеток находилась в пределах от 440 до 920 тыс. ячеек; для нормированного расстояния до стенки в первой расчетной точке у поверхности трубки выполнялось условие $y^+ \le 1$. Для обсуждаемой задачи характерен длительный переходный процесс, во время которого происходит развитие течения, и устанавливаются некоторый уровень давления, а также значения среднеобъемных плотности, температуры и массовых долей компонентов смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура течения в задаче о свободной конвекции воздуха показана на рис. 2, где изображены картины линий тока (а) и распределение изолиний температуры (б) в поперечном вертикальном сечении расчетной области (вариант с $L = 1R$, масштаб 1:5 по оси y). В замкнутом объеме формируется циркуляционное турбулентное течение с выраженными неоднородностями в полях величин. Вблизи верхней теплоизолированной стенки имеется относительно небольшая зона локальной рециркуляции воздуха.

Распределения плотности теплового потока по поверхности трубки приведены на рис. 2в,г для вариантов с $L = 1R$ и $4R$, соответственно. Видно, что тепловой поток существенно неоднороден, и характер его распределения заметно отличается для разных расстояний между трубками.

Все дальнейшее изложение относится к задаче о течении паровоздушной смеси при наличии конденсации пара. Структура течения иллюстрируются на рис. 3 картинами линий тока (а), а также распределениями изолиний температуры (б) и массовой доли пара (в) в поперечном вертикальном сечении (вариант с $L = 1R$, масштаб 1:5 по оси y). Здесь течение также организуется в виде крупномасштабной циркуляции. Горячий насыщенный пар, поступая в объем с нижней границы, поднимается вверх преимущественно вдоль боковой стенки камеры, смешивается с более тяжелым воздухом и постепенно остывает. Затем паровоздушная смесь перетекает в горизонтальном направлении к центральной части полости и далее стекает вниз вдоль холодной поверхности трубки, на которой происходит конденсация пара. Интенсивность этого глобального движения, а также средний уровень температур выше, чем в расчетах конвекции воздуха.

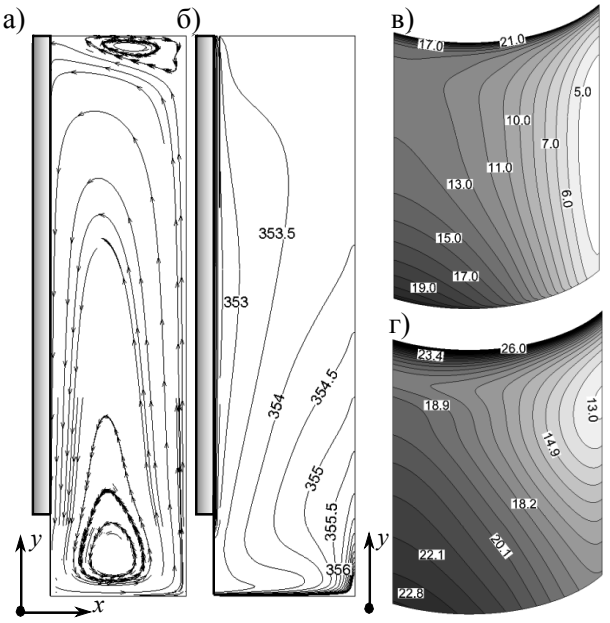

Рис.2 Свободная конвекция воздуха: структура течения (а, б) и распределения плотности теплового потока по поверхности трубки (в, г).

Высокоградиентные области локализованы у поверхности конденсации и в нижней части полости. В области восходящего течения пар

достаточно быстро перемешивается с воздухом, что ухудшает эффективность теплоотдачи через поверхность трубки.

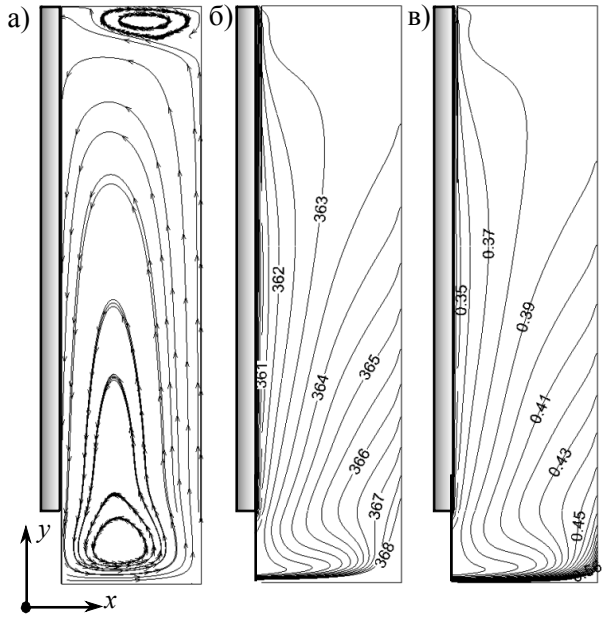

Рис.3 Конвекция паровоздушной смеси: структура течения, изолинии тепературы и массовой доли пара в поперечном вертикальном сечении.

На рис. 4 для того же варианта показаны изолинии полей вертикальной скорости (а) и массовой доли пара (б) в вертикальном сечении между трубками, проходящем через их центр (масштаб 1:50 по оси *y*, для наглядности картины отражены относительно плоскости симметрии). Видно, что формирующиеся у поверхностей трубок пограничные слои с преимущественным содержанием воздуха взаимодействуют с сопутствующим нисходящим внешним потоком глобальной циркуляции. Течение в пространстве между трубками имеет смешанно-конвективный характер. Скорость спутного потока заметно возрастает по мере развития течения, достигая для данного варианта значений в 1 м/с.

На рис. 5 приведены горизонтальные профили вертикальной скорости в межтрубном пространстве в направлении оси *z*; линейная координата изменяется от значения *R* на стенке до половинного расстояния между трубками трубками (индивидуального для каждого из вариантов). Профили построены для всех рассчитанных вариантов и двух значений вертикальной координаты *y*, отсчитываемой от нижнего края трубки: 3.0 м (а) и 0.5 м (б).

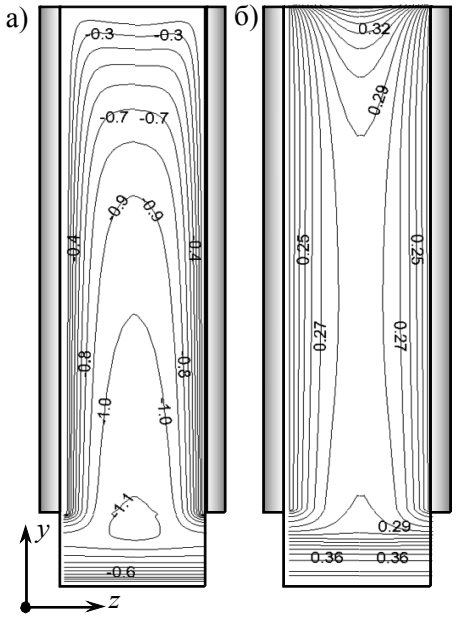

Рис.4 Конвекция паровоздушной смеси: изолинии вертикальной скорости и массовой доли пара между трубками.

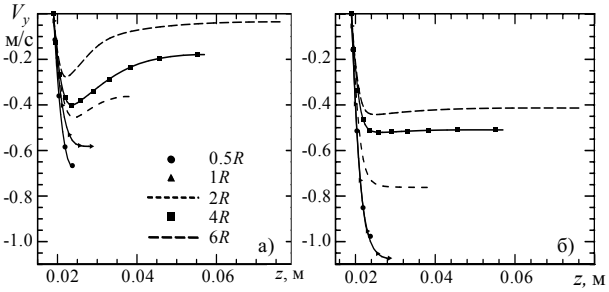

Рис.5 Конвекция паровоздушной смеси: горизонтальные профили вертикальной скорости в межтрубном пространстве.

Для вариантов с далеко отстоящими трубками в верхней части камеры пристенная кольцевая струя сопутствует с менее скоростным внешним потоком. При стекании потока вниз профиль перестраивается таким образом, что вертикальная скорость монотонно возрастает от нуля на стенке до некоторого значения

на удалении от нее. В результате формируется почти однородный по трансверсальной координате поток, занимающий значительную часть межтрубного пространства. В расчете с наименьшим расстоянием между трубками скоростные пограничные слои, смыкаясь, взаимодействуют друг с другом, что, как показано ниже, существенно влияет на распределение теплового потока по поверхности конденсации.

Распределения плотности суммарного теплового потока по поверхности трубки приведены на рис. 6а,б (для $L = 1R$ и $4R$, соответственно). Как и в задаче о свободной конвекции воздуха здесь имеет место существенная неоднородность теплового потока. На поверхности трубок хорошо заметны светлые пятна, отвечающие относительно малым значениям отводимого потока. Эти "проблемные" области, особенно выраженные для вариантов с малым межтрубным расстоянием, расположены на части поверхности, развернутой в направлении соседней трубки, где в узком пространстве происходит взаимодействие пограничных слоев с глобальной циркуляцией. Наибольшие значения теплового потока наблюдаются в узком кольце в верхней части трубки, а также в ее нижней части на участках стенки, ориентированных в направлении, перпендикулярном оси расположения ряда трубок. Градиент теплового потока по поверхности тем сильнее, чем меньше расстояние между трубками. Следует подчеркнуть, что интегральный тепловой поток, связанный с конденсацией пара на поверхности охлаждения, более чем в 20 раз превышает величину диффузионного потока.

Кривые, отражающие изменение рассчитанной плотности теплового потока по высоте трубки, показаны на рис. 6в (данные получены в результате осреднения по периметру трубки при фиксированном значении вертикальной координаты). Тепловой поток меняется по высоте немонотонно: при движении от верхнего края трубки плотность потока сначала резко уменьшается до своего минимального значения, а затем начинает медленно возрастать, согласно с развитием турбулентных пограничных слоев у поверхности конденсации.

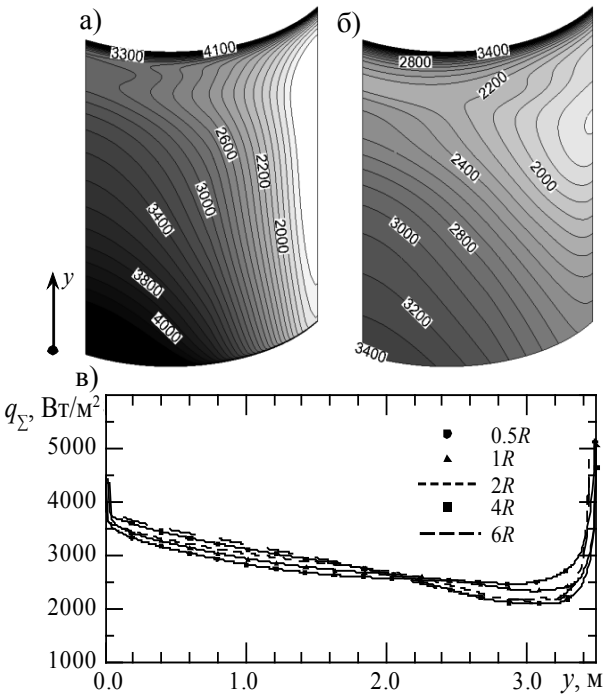

Рис.6 Конвекция паровоздушной смеси: распределения плотности теплового потока по поверхности (а, б) и высоте (в) трубок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено численное моделирование турбулентной конвекции паровоздушной смеси в замкнутой камере с помещенным в ее центральной части бесконечным рядом вертикальных цилиндрических трубок, на поверхности которых создавались условия для конденсации водяного пара. Расчеты проводились в трехмерной стационарной постановке для пяти геометрий расчетных областей с изменяющимся расстоянием между трубками. Для тех же геометрических конфигураций рассчитано свободно-конвективное течение воздуха при подогреве снизу. Показано, что в обеих постановках в условиях определяющего действия сил плавучести в камере формируется интенсивное, качественно схожее турбулентное циркуляционное течение. Установлено, что структура течения в окрестности трубок, а также степень неоднородности теплового потока на их поверхности весьма чувствительны к ширине межтрубного интервала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семашко, С. Е. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов в защитной оболочке при наличии пассивного конденсатора в системе пассивного отвода тепла / С. Е. Семашко, В. В. Безлепкин, М. А. Затевахин, О. И. Симакова, И. М. Ивков // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108, №5. – С.308-312. Semashko, S. E., Bezlepkin V. V., Zatevakhin M. A., Simakova O. I., Ivkov I. M. (2010) *Raschetno-eksperimentalnoe modelirovanie processov v zaschitnoy obolochke pri nalichii passivnogo kondensatora v sisteme passivnogo otvoda tepla* [Numerical and experimental studies of processes in the containment in the presence of passive condenser in the passive heat-removal system], *Atomnaya energia*, Vol.108(5), pp.308-312.
2. De la Rosa, J. C. Review on condensation on the containment structures / J. C. De la Rosa, A. Escriva, L. E. Herranz, T. Cicero, J. L. Munoz-Cobo // Progress in Nuclear Energy. – 2009. – V. 51. – P. 32-66.
3. Абрамов, А. Г. Численное моделирование турбулентной свободой конвекции паровоздушной среды в замкнутой полости при наличии пленочной конденсации на центральной вертикальной трубке / А. Г. Абрамов, Е. М. Смирнов // Труды V Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – Т.3. – С.33-36. Abramov, A. G. and Smirnov E. M. (2010) *Chislennoe modelirovanie turbulentnoj svobodnoj konvekcii parovozdushnoj sredy v zamknutoj polosti pri nalichii plenochnoj kondensacii na centralnoj vertikalnoj trubke* [Numerical simulation of turbulent free convection of steam-air mixture in confined enclosure at film condensation on a central vertical tube], Proc. V Russian National Heat Mass Transfer Conference, Moscow, Publishing House MPEI, Vol.3, pp.33-36.
4. Смирнов, Е. М. Численное моделирование тепломассообмена при пленочной конденсации водяного пара на вертикальной трубке в условиях циркулирующего турбулентного движения паровоздушной среды / Е. М. Смирнов, А. Г. Абрамов, П. Е. Смирнов // Научные исследования и инновационная деятельность: материалы научно-практ. конф. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – С.70-76. Smirnov, E. M. (2009) *Chislennoe modelirovanie teplomassoobmena pri plenochnoj kondensacii vodjanogo para na vertikalnoj trubke v uslovijah cirkulirujushhego turbulentnogo dvizhenija parovozdushnoj sredy* [Numerical simulation of heat and mass transfer at film condensation of water vapour on a vertical tube in conditions of circulating turbulent motion of steam-air mixture] / E. M. Smirnov, A. G. Abramov, P. E. Smirnov // Proc. Scientific and Practical Conference "Scientific research and innovation activities", St.Petersburg, Publishing House Polytechnic. Univ., pp. 70-76.
5. Dehby, A. A. Condensation experiments in steam-air steam-helium mixture under turbulent natural convection / A. A. Dehbi, M. W. Golay, M. S. Kazimi // National Conference of Heat Transfer, AIChE Symp. – 1991. – No 87(283). – P. 19-28.
6. Lienhard, J. H. IV A heat transfer text book / J. H. IV Lienhard, J. H. V Lienhard; 3rd edition. – Phlogiston Press Cambridge, Massachusetts, U.S.A. – 2006. – 750 p.

© Абрамов А.Г., Иванов Н.Г., Ковалёв Г.А., Смирнов Е.М.