

можно отслеживать процесс и быстро отреагировать на какие-либо изменения системы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Комнатнов М.Е. Обзор ТЕМ-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС // Научная сессия ТУСУР – 2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 116–119.
2. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие/ А.В. Волошенко, Д.Б. Горбунов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 109 с.
3. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие/ А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский, А.А. Ключев; Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
4. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing // Proc. of IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014).

Научный руководитель: Е.В. Кравченко, к.т.н., доцент каф. АТП, ЭНИН ТПУ.

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ УМНОГО ДОМА**

Т.В. Рябова

Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

На данный момент область сложного теплообмена недостаточно хорошо изучена [1,2]. В первую очередь причиной этому являются сложные механизмы переноса энергии, а также трудности вычисления при попытке реализации данных механизмов с помощью математических моделей. В ходе данной работы [1] выполнялось численное исследование конвективно-радиационного теплопереноса в излучающей, поглощающей и изотропно рассеивающей среде в полости квадратного сечения (несопряженная постановка). Известно, что присутствие излучения ведет к увеличению температуры в рассматриваемой среде, а также влияет на режимы течения.

В данной статье [2] численно исследован режим термогравитационной конвекции в сопряженной постановке в замкнутой прямоугольной области с внутренним источником температурной неоднородности. Результаты полученные в ходе исследования характеризуют не только температурные поля стандартного объекта теплоснабжения в исследуемом режиме теплопереноса по истечении семидесяти двух часов, но и динамику процесса теплопереноса.

Основываясь на полученных в [3,4] результатах, можно сделать вывод о том, что имеется необходимость пространственного нестационарного моделирования процессов конвективно - кондуктивного теплообмена в сопряженной постановке на объектах теплоснабжения при выработке технологических режимов как при централизованном, так и местном теплоснабжении.

В [5] указывается, что оптимальное положение нагревателя имеет зависимость как от мощности нагревателя, теплофизических характеристик стенки, на которой он расположен, так и, в значительной мере, от геометрических характеристик области решения.

На внутренней поверхности стенки равномерным образом распределяется тепловой поток. Установлено влияние каждого в отдельности механизма переноса энергии на конечное формирование тепловых и гидродинамических режимов в рассматриваемой полости. Исследование с помощью математических моделей сопряженной естественной конвекции в горизонтальном кольцевом зазоре между тепловыделяющим твердым блоком и изотермическими внешними границами приведено в [6].

Получены распределения местных термогидродинамических характеристик, а также выполнен анализ степени влияния формы твердого внутреннего блока на всевозможные режимы течения и теплопереноса. Численный и экспериментальный анализ сопряженной термогравитационной конвекции в окрестности нагреваемой твердой стенки отражен в [7].

В наше время большое количество авторов занято изучением теплообмена в замкнутой области с различными перегородками, которые оказывают влияние на явление конвективного потока. В статье [8] было рассмотрено явление смешанной конвекции в воздушном охлаждении с дифференциально нагретыми вертикальными изотермическими боковыми стенками, имеющими входное и выходное отверстия при помощи метода конечных элементов с регулируемым объемом. Под исследование попали две различные конфигурации размещения входных и выходных портов на боковых стенках. Самая лучшая конфигурация выбиралась путем проведения анализа эффективности охлаждения полости, которая устанавливает, что подача воздуха через охлажденную стенку было более гораздо эффективнее в отводе тепла, а установка впускного портов в непосредственной близости от дна и выпускного отверстия недалеко от верхней части обеспечивают эффективное охлаждение. В [9] расшириют проведенные работы, рассматривая 6 различных конфигураций размещения входных и выходных отверстий дифференциально нагретого прямоугольного корпуса, в отличии от предыдущей работы, в которой ограничивались только двумя различными конфигурациями входного и выходного портов. В [10] проводятся численные исследования противодействующей смешанной конвекции в вентилируемом корпусе. Было обнаружено, что с возрастанием чисел Рейнольдса и Ричардсона конвективный теплообмен преобладал по теплопроводности проводимости, а скорость теплопередачи от нагретой стенки значительно зависела от положения входного отверстия.

Исследователи в [11] изучают смешанную конвекцию из изолированных источников тепла в прямоугольном корпусе. Далее в [12] проводят необходи-

мые вычисления по смешанной конвекции от локализованного источника тепла в полости с теплопроводящими стенками и 2 отверстиями для применения электронного охлаждающего оборудования. В [13] проводят численное исследование смешанной конвекции в частично разделенном прямоугольном корпусе. Рассматривается разделитель как дефлектор во внутренней части корпуса с двумя различными ориентациями и указывается, что среднее число Нуссельта и безразмерная температура поверхности зависимы от способа расположения и предельной высоты перегородки. Естественная конвекция в горизонтальном слое жидкости с периодической решеткой квадратного цилиндра во внутренней области была приведена в [14]. Исследователи сделали вывод, что переход потока от квазистойчивой к нестационарной конвекции зависит от двух факторов: наличия тел и соотношения размеров конвективных ячеек Рэлея-Бенара.

В статье [15] приводится численное исследование стабильного смешанного конвективного теплообмена в прямоугольном вентилируемом корпусе при ламинарном режиме. Исследование проводилось для ряда соответствующих безразмерных групп, а именно, числа Рейнольдса, числа Ричардсона и соотношения размеров полости. Рассмотрение коснулось четырех конфигураций полостей. Исследование содержит постоянное значение числа Рейнольдса ( $Re$ ) в 100 и диапазона числа Ричардсона ( $Ri$ ) от 0,0 до 5,0, представляющее доминирующую вынужденную конвекцию через смешанную конвекцию до преобладания естественной конвекции. Результаты исследования говорят о том, что на структуру потока и распределение температуры значительно влияют параметры смешанной конвекции и пропорции полости. Среднее число Нуссельта на нагретой поверхности является самым высоким для самого низкого значения соотношения сторон, но средняя температура жидкости в полости и температура в центре цилиндра являются самыми низкими для самого высокого значения соотношения сторон.

В [16] проведены анализы влияния амплитуды на конвекцию, вызванную кратковременно периодическим нагревом. Указывается, что интенсивность конвекции внутри оболочки увеличивается линейно с амплитудой нагрева. В [17] проводится численное моделирование периодического колебания потока для малых количеств Прандтля в прямоугольном корпусе. При этом наблюдаются неперiodические потоки для прямоугольной полости с соотношением сторон 2,0. В статье [18] была исследована плавучая конвекция с внутренней тепловой генерацией при колебательной температуре боковой стенки полости. Выяснено, что вторичный пиковый резонанс обнаружился для более высокого внутреннего числа Рэлея.

В статье [19] проводится численное моделирование конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой области с источником тепловыделения при наличии теплопроводных стенок конечной толщины. Получены распределения как локальных характеристик (линии тока, поля температуры), так и интегральных (средние числа Нуссельта на характерных границах), описывающие основные закономерности исследуемого процесса в реальном диапазоне изменения определяющих параметров. Авторы статьи [20] подвергли изучению переходную естественную конвекцию в квадратном корпусе, частично нагретой

со стороны. В начале температура меняется со временем синусоидально, а в другом случае она менялась пульсирующим образом. Результаты указывают на то, что средние значения теплоотдачи и интенсивности потока в значительной мере отличны от значений, получаемых в стационарном режиме.

В [21] была изучена неравновесная модель периодической свободной конвекции. Результаты изучения показывают, что любое увеличение амплитуды и частоты колебательной температуры поверхности ведет к сильному уменьшению скорости передачи тепла.

Проблема – измерение значения температур в комнате в разных точках пространства, которая затрагивается в теме "Математические модели и алгоритмы в системе отопления умного дома", актуальна. В связи с этим были изучены научные статьи, где рассмотрены разные виды теплопереноса в прямоугольной камере, с разными источниками тепла. Наличие теплопроводных стенок конечной толщины, оказывают существенное влияние на режимы теплопереноса. В большинстве представленных выше работ проводится анализ достаточно простых постановок (температура источника постоянная, на внешних границах рассматриваются граничные условия первого рода), что не позволяет использовать полученные результаты при исследовании физических процессов и явлений, имеющих место в реальных промышленных установках. В то же время совместный анализ влияния локального тепловыделяющего элемента и неоднородного теплообмена с окружающей средой может позволить получить результаты, наиболее адекватные реальным рабочим режимам большинства устройств и аппаратов.

Совершенствование алгоритмов управления системы отопления «умного дома», является актуальной проблемой. Данные алгоритмы смогут помочь в решении глобальных проблем таких, как энергосбережение, экономия денежных средств.

Рассматриваемый объект является сложным, поскольку входящие в него переменные величины в данный момент времени имеют разные числовые значения в различных точках. Основные переменные процесса в объекте изменяются и во времени, и в пространстве, такие объекты относят к объектам с распределенными параметрами (ОРП). На современном этапе развития систем автоматического управления возникает проблема рассмотрения таких объектов управления для более детального понимания их функционирования и описания.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Tan Z., Howell J.R. Combined radiation and natural convection in a two-dimensional participating square medium // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 1991. V. 34. P. 785–793.
2. Chiu H.C., Jang J.H., Yan W.M. Combined mixed convection and radiation heat transfer in rectangular ducts rotating about a parallel axis // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 2007. V. 50. P. 4229–4242.

3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Сопряженная задача термогравитационной конвекции в прямоугольной области с локальным источником тепла // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 1. С. 90–96.
4. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Математическое моделирование термогравитационной конвекции в сопряженной постановке в замкнутой области // 2005. стр. 104–109
5. Nouanegue H., Muftuoglu A., Bilgen E. Conjugate heat transfer by natural convection, conduction and radiation in open cavities // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 6054–6062. (10)
6. Sambamurthy N. B., Shaija A., Narasimham G. S. V. L., Krishna Murthy M. V. Laminar conjugate natural convection in horizontal annuli // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 1347–1359. (11)
7. Bilgen E. Conjugate heat transfer by conduction and natural convection on a heated vertical wall // Appl. Thermal Engng. 2009. V. 29. P. 334–339. (12)
8. Omri, A. and Nasrallah, S.B. Control Volume Finite Element Numerical Simulation of Mixed Convection In An Air-Cooled Cavity // Numerical Heat Transfer. 1999. Part A, V. 36. P. 615–637.
9. Singh, S. and Sharif, M.A.R. Mixed Convection Cooling of a Rectangular Cavity with Inlet and Exit Openings on Differentially Heated Side Walls // Numerical Heat Transfer. 2003. Part A, V. 44. P. 233–253.
10. Rahman, M.M., Alim, M.A., Mamun, M.A.H., Chowdhury, M.K. and Islam, A.K.M.S. Numerical Study of Opposing Mixed Convection in a Ventilated Enclosure // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2007. V. 2. No. 2, P. 25-36. (6).
11. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y. Mixed Convection From an Isolated Heat Source in a Rectangular Enclosure // Numerical Heat Transfer. 1990. Part A, V. 18. P. 427–461.
12. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y. Mixed Convection from a Localized Heat Source in a Cavity with Conducting Walls: A Numerical Study // Numerical Heat Transfer. 1993. Part A, V. 23. P. 463–484.
13. Hsu, T.H., Hsu, P.T. and How, S.P. Mixed Convection in a Partially Divided Rectangular Enclosure // Numerical Heat Transfer. 1997. Part A, V. 31. P. 655-683.
14. Ha, M.Y., Yoon, H.S., Yoon, K.S., Balachandar, S., Kim, I., Lee, J.R. and Chun, H.H. Two-Dimensional and Unsteady Natural Convection in a Horizontal Enclosure with a Square Body // Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 41, (2002), P. 183–210. (12).
15. Md. Mustafizur Rahman, Md. Elias, Md.A. Alim. Mixed convection flow in a rectangular ventilated cavity with a heat conducting solid circular at the center // International Journal of Engineering. February 2011. V. 24. No. 1. P. 93- 105.
16. B. V. Antohe and J. L. Lage. Amplitude effect on convection induced by time-periodic horizontal heating // International Journal of Heat and Mass Transfer 39. 1996. N. 6, P. 1121–1133.

17. D. W. Crunkleton, R. Narayanan, and T. J. Anderson, Numerical simulations of periodic flow oscillations in low Prandtl number fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49. 2006. N. 1-2, P. 427–438.
18. G.B. Kim, J.M. Hyun, and H.S. Kwak, Enclosed Buoyant convection with internal heat generation under oscillating sidewall temperature, *ASME Journal of Heat Transfer* 124. 2002. N. 3, P. 577–580.
19. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Математическое моделирование сложного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области // 2009. стр. 123–133.
20. E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, and P. Vasseur, Numerical study of transient natural convection in a cavity heated periodically with different types of excitations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42. 1999. N. 21. P. 3927–3941.
21. N.H. Saeid and A.A. Mohamad, Periodic free convection from a vertical plate in a saturated porous medium, non-equilibrium model, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48. 2005. N. 18. P. 3855–3863.

Научный руководитель: С.В. Шидловский, д.т.н., профессор каф. АТП ЭНИН ТПУ.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СЖИГАНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ, ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ**

М.А. Курганкина, А.Г. Косинцев  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП

### **Введение**

В течение последнего десятилетия потребление угля в мире растет высокими темпами [1, 2]. В настоящее время доля угля в мировом производстве электроэнергии высока и составляет около 45 % [1, 2]. Устойчивый рост добычи угля в последние годы наблюдается во многих странах, например, Китай, Индия, Индонезия, Австралия, Россия. Этот рост закономерен и обусловлен активным увеличением производственных мощностей. Поэтому увеличивается спрос и на энергоносители.

Сжигание топлива – процесс не только получения энергии, но и загрязнения окружающей среды антропогенными выбросами (летучая зола, частицы негоревшего топлива, сернистый и серный ангидриды, окислы азота, фтористые соединения) [3]. На долю угля приходится более 50 % мировых выбросов оксидов серы ( $SO_x$ ) и 20 % выбросов оксидов азота ( $NO_x$ ) [4]. Следует отметить, что большая часть добываемого угля обогащается. В результате чего образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеков), масса которых на сегодняшний день оценивается десятками миллионов тонн [5]. Поэтому становится актуальной масштабная утилизация отсевов, шламов, отходов углеобогат-