

УДК 536.24:697.1

Круковский П.Г., Юрченко Д.Д., Пархоменко Г.А.,
Тадля О.Ю., Полубинский А.С.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ

Часть 1. Разработка трехмерных CFD-моделей в сопряженной постановке

Розроблено тривимірні CFD-моделі теплового стану приміщення у спряженій постановці з різними системами опалення (радіаторною, теплою підлогою, теплою стіною, теплою стелею, конвектором). Показано якісну адекватність створених моделей, які будуть використані для аналізу енергоефективності розглянутих систем опалення.

Разработаны трехмерные CFD-моделі теплового режима помещения в сопряженной постановке с различными системами отопления (радиаторной, теплым полом, теплой стеной, теплым потолком, конвектором). Показана качественная адекватность построенных моделей, которые будут использоваться для анализа энергоэффективности рассмотренных систем отопления.

Three-dimensional CFD-models of an enclosure thermal mode in the interfaced statement with various heating systems (radiator, a heat floor, a warm wall, a warm ceiling, convector) are developed. Qualitative adequacy of the developed models that will use for analysis of power efficiency of the considered heating systems.

 H – высота; L – длина; T – температура; W – ширина; α – коэффициент теплоотдачи; δ – расстояние между узлами; λ – коэффициент теплопроводности.

Введение

В последние годы начали активно использоваться методы CFD-моделирования (CFD – computational fluid dynamics) для расчета теплового режима помещений. CFD-модель – описание исследуемого объекта и/или процесса, основанное на численном решении полной системы уравнений Навье-Стокса с использованием метода контрольного объема.

Используемые простые инженерные модели и методики расчета теплового режима помещений ставят целью расчет необходимой мощности системы отопления или расчет потерь тепла при заданной постоянной температуре воздуха в помещении и окружающей среде. Если к помещению выдвигаются особые требования по распределению температуры, скорости воздуха и влажности, или рассматриваются помещения большого объема или нестандартной формы (промышленные помещения с источниками тепла и влаги, музеи, культовые сооружения и т.д.), то все более широко используются CFD-модели, которые точнее существующих упрощенных инженерных методик расчета. Для та-

ких случаев CFD-модели позволяют определить не только среднеобъемные значения параметров теплового и влажностного режима, но и их детальное распределение в объеме помещения – поля температур, скоростей и влажности в воздухе и ограждающих конструкциях. В литературе имеются примеры использования CFD-моделей для анализа теплового режима помещений. Так в работе [1] проводилось моделирование распределения воздушных потоков и тепловых полей в жилом блоке, состоящем из помещений различного назначения, для чего использовалась трехмерная CFD-модель и программа PHOENICS. Моделировалась естественная конвекция, возникающая от радиаторов и охлаждаемых внешних участков стен, остекления и дверных проемов. Авторы статьи показывают, что тепловой режим в исследуемых помещениях характеризуется существенной неравномерностью распределения температур как в пределах одного помещения, так и по жилому блоку. В работе [2] для исследования системы вытесняющей вентиляции в среде «Airtrak» была создана CFD-модель учебного класса, а для проверки ее адекватности был соору-

жен макет этого класса в масштабе 1:1 в исследовательском центре фирмы «Халтон», США. В статье показаны результаты CFD-моделирования, которые достаточно точно рассчитывают температуру воздуха в наиболее важных зонах помещения. Сравнение с экспериментом показало, что наименьшая точность моделирования наблюдалась в верхней зоне помещения, что по мнению авторов связано с тем, что около потолка не была сделана достаточно подробная сетка. В целом приведенные результаты сравнения результатов, полученных с помощью CFD-модели и экспериментальных измерений, показали хорошее совпадение.

В [3] разработаны ряд CFD-моделей помещения с 4-мя схемами расположения отопительного прибора – радиатор, расположенный под окном (модель 1), возле внутренней стены, противоположной окну (модель 2), возле внутренней смежной с наружной стеной (модель 3) и отопление «теплый пол» (модель 4). В предложенных моделях задачи решались в стационарной постановке с использованием $k - \varepsilon$ модели турбулентности, однако не учитывался теплообмен излучением, что можно считать существенным недостатком этих моделей. Основной целью работы являлся анализ энергопотребления двух систем и трех схем отопления, а также условия комфортности в исследуемом помещении. Критериями комфортности согласно ISO 7730:1994 являлись:

- средняя скорость движения воздуха (должна быть не более чем 0,03 м/с);
- средняя температура воздуха в помещении (зависит от времени года, количества людей, величины воздухообмена и т.д. и должна быть не ниже 18°C);
- перепады температуры по высоте и длине помещения (не должны превышать 2 К).

В [3] приведены поля и профили температур и скоростей по высоте в среднем продольном сечении помещения, которые показали, что минимальные перепады температур по высоте помещения имеют место при использовании теплого пола в качестве системы обогрева. В то же время максимальная температура воздуха в помещении достигается с радиаторной системой обогрева, когда радиатор расположен не под окном, а возле внутренней, смежной с наружной, стеной (рис. 1, модель 3). Т.о. такая схема радиа-

торного отопления оказалась наиболее энергоэффективной системой отопления (модель 3), в то время как наилучшее соответствие условиям комфортности по всем приведенным выше критериям соответствует система отопления «теплый пол» (модель 4). При этом под энергоэффективностью системы отопления подразумевается соотношение между потребляемой системой отопления энергией на обогрев воздуха и средней температурой воздуха в помещении (рис. 1).

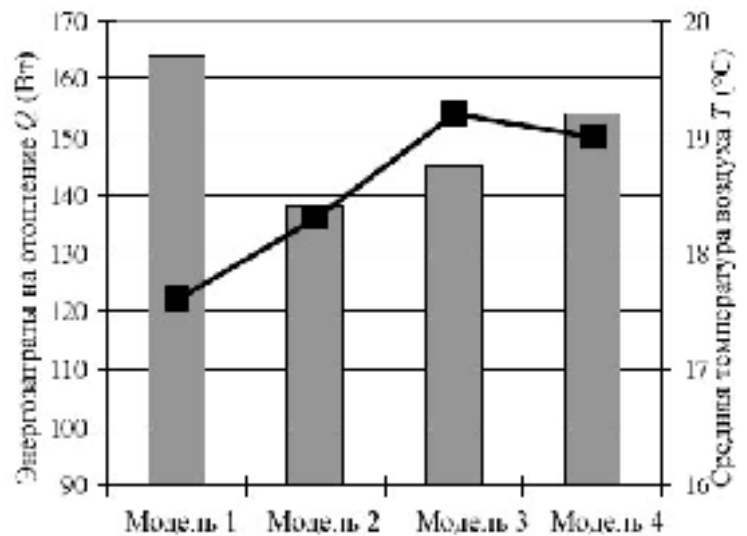


Рис. 1. Значения выделяемой в помещении мощности и средней температуры воздуха в комнате для различных схем (моделей) отопления.

На сайте ADAPCO GROUP [4] приводится трехмерная CFD-модель, которая используется для изучения комфортных условий при работе систем отопления и кондиционирования в жилом 2-х этажном доме нестандартной конфигурации (рис. 2, а). По данной модели проведены расчеты с целью минимизации затрат энергии систем отопления и кондиционирования для верхнего и нижнего этажей, а также оптимального размещения элементов систем кондиционирования и отопления (радиаторов). При этом авторы отмечают, что зимой зона под потолком первого этажа оказывается перегретой (рис. 2, б), а в летний период зона под балконом не проветривается. Для получения адекватных результатов использовался нестационарный расчет с малым шагом по времени, параметрами релаксации 0,8 и двойной точностью расчетов.

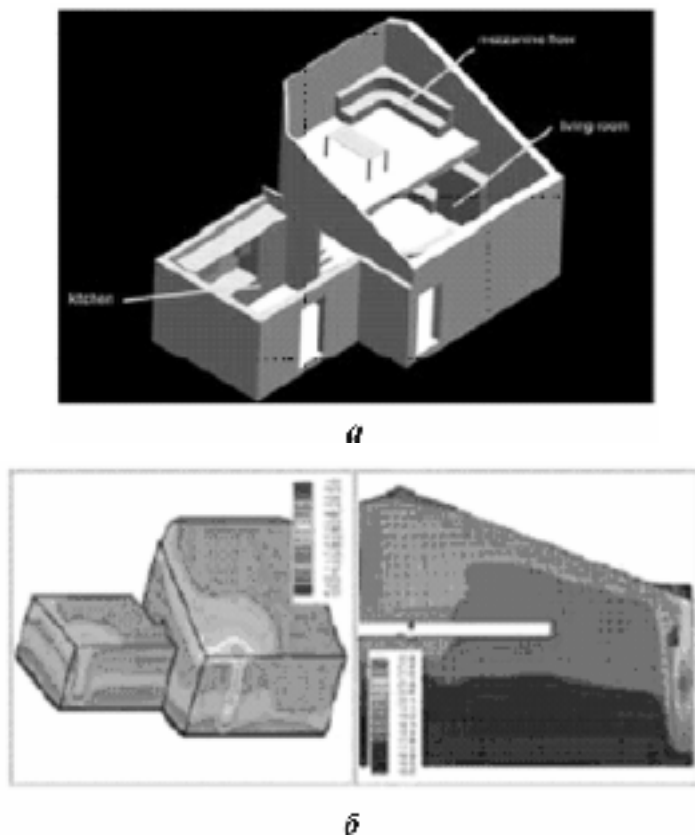


Рис. 2. Модель дома (а) и распределение температур в его объеме (б).

В [5] исследовались вопросы уменьшения энергозатрат на отопление путем использования альтернативных систем отопления – комбинации пассивного гелиоотопления, теплоаккумулирующей стены и электрического обогревателя. Задачей расчетов являлось определение при такой комбинации отопительных приборов возможности поддержания температуры воздуха в исследуемом помещении на уровне $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ при циклическом изменении температуры окружающей среды в течение нескольких дней в диапазоне от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Модель показала, что в рассматриваемых условиях кроме гелиоотопления и теплоаккумулирующей стены необходимо использовать вспомогательный электрический обогреватель.

Как видно из приведенного обзора различные авторы в своих работах в той или иной мере упрощают постановку задачи анализа теплового состояния помещений (задачи решаются в несопряженной постановке, не всегда учитывается радиационный теплообмен в помещении, используются различные модели вентиляции в помещении и т.п.). Следует

также отметить, что в рассмотренных выше моделях и других работах, имеющих в литературе, не рассматривается присутствие человека, что является недостатком этих моделей, т.к. тепловое состояние человека определяет комфортность той или иной системы отопления.

Для анализа теплового состояния помещения в наиболее полной постановке с учетом конвективного, радиационного теплообмена и естественной вентиляции с целью последующей оценки комфортности пребывания человека в помещении, нами поставлена цель работы – разработать трехмерные CFD-модели теплового режима помещения и человека в помещении в сопряженной постановке с различными системами отопления (радиатор, теплый пол, теплая стена, теплый потолок, конвектор), и путем сопоставления с литературными данными показать их качественную адекватность для сравнения различных систем отопления по критерию энергоэффективности.

Для этого была рассмотрена стационарная задача CFD-моделирования теплового режима помещения с тепловыделением человека с различными системами отопления в трехмерной сопряженной постановке. Приняты следующие размеры помещения (рис. 3): длина $L = 5,6\text{ м}$, высота $H = 2,5\text{ м}$, ширина $W = 5\text{ м}$, с вентиляцией помещения через форточку 2 и вентиляционное отверстие 6. Площадь окна составляет $4,05\text{ м}^2$. Толщина наружной стены $\delta = 0,4\text{ м}$.

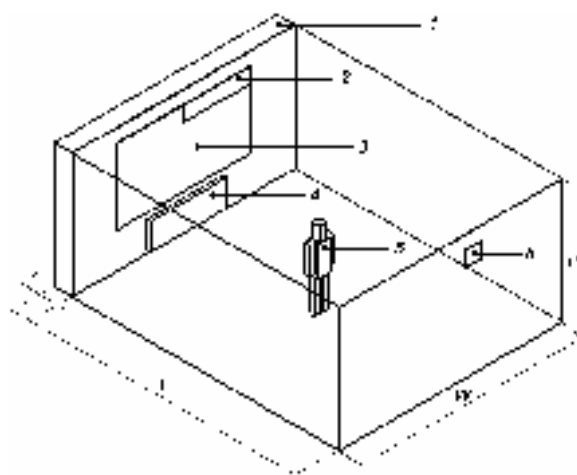


Рис. 3. Геометрия рассматриваемой комнаты. 1 – наружная стена; 2 – форточка; 3 – окно; 4 – радиатор; 5 – фигура человека; 6 – вентиляционное отверстие.

Исследовались следующие системы отопления помещения: радиатор; теплый пол; теплая стена; теплый потолок; конвектор (расположен на месте радиатора).

Теплообмен с соседними помещениями отсутствует, что отражает одинаковость тепловых режимов. На наружной стене со стороны окружающей среды задано граничное условие третьего рода ($\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $T = -15 \text{ °С}$). Предусмотрена возможность задания различной кратности воздухообмена в помещениях. Когда она больше нуля в области форточки 2 – воздух поступает в помещение с температурой $T = -15 \text{ °С}$, а в области вентиляционного отверстия уходит из помещения. Учитывается теплообмен излучением с помощью модели Discrete Beams [6]. При выборе оптимальных параметров используемой модели излучения проводилось поэтапное увеличение количества зон и лучей до величин, при которых дальнейшее увеличение приводило к изменению значений среднеобъемной и радиационной температур не более, чем на 1 %. Степень черноты всех поверхностей внутри комнаты принималась 0,8, поверхности радиатора – 0,3, что отражает наличие ряда секций радиатора, переизлучающих тепло друг на друга. При расчете для воздуха принята модель идеального несжимаемого газа с зависящими от температуры теплофизическими характеристиками. Теплопроводность наружной стены принималась равной 0,27 Вт/(м·К), окна – 1 Вт/(м·К), тела человека – 0,7 Вт/(м·К). В разработанных CFD-моделях учитывалась свободная конвекция, вызванная действием силы гравитации. Обоснован и выбран ламинарный режим течения воздуха, для которого $\text{Gr}\cdot\text{Pr} = 9,55 \cdot 10^8$ [7]. Модели содержали около 350 тыс. расчетных ячеек. Решалась система уравнений неразрывности, сохранения импульса движения, состояния идеального несжимаемого газа, энергии для воздуха, а также уравнение теплопроводности для твердого тела в сопряженной постановке.

Задачи свободной конвекции рекомендуется решать в нестационарной постановке ввиду нестационарной природы циркулирующего воздуха внутри помещения. Однако, из-за большой продолжительности нестационарного расчета CFD-

модели с учетом излучения время расчета может занимать до нескольких месяцев на компьютере среднего класса P IV 2,4 GHz, поэтому была исследована возможность получения решения задачи в стационарной постановке. Для этого был проведен расчет варианта задачи в нестационарной постановке с последующим сравнением результатов с вариантом, рассчитанным в стационарной постановке. На рис. 4 представлены профили температур по высоте помещения, полученные для этих вариантов. Видно их качественное и количественное совпадение. Более того, среднеобъемная и радиационная температуры, полученные в обоих вариантах, отличаются на 1,1 %, что на наш взгляд свидетельствует о правомерности такого подхода решения стационарной задачи свободноконвективного теплообмена в рассматриваемом помещении.

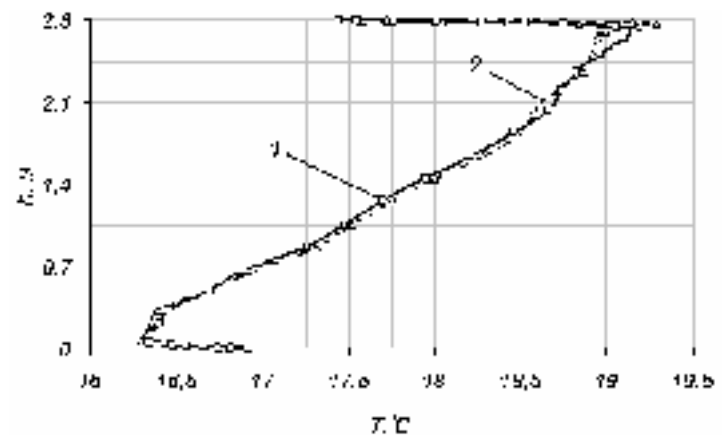


Рис. 4. Профили температуры по высоте в центре помещения при радиаторной системе отопления. Кривая 1 – нестационарная, 2 – стационарная постановка.

В результате проведенных расчетов с помощью описанных выше CFD-моделей для различных типов отопления были получены поля давлений, температур, скоростей, а также коэффициентов теплоотдачи на теплообменных поверхностях. Анализ рис. 5, а показывает четкое расслоение температуры по высоте помещения, что согласуется с данными, приведенными в [8], – температура по высоте помещения меняется на 2,5 °С.

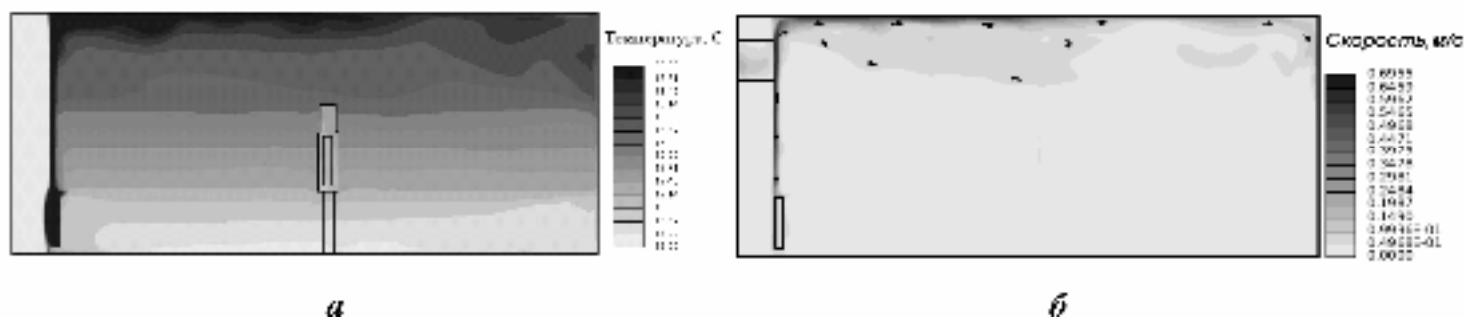


Рис. 5. Поле температур (а) и скоростей (б) в продольном сечении помещения при радиаторной системе отопления.

На рис. 5, б видна зона подъемного движения воздуха вследствие его подогрева у радиатора, максимальная скорость воздуха в области решения составляет 0,7 м/с.

На рис. 6 представлены профили температур по высоте помещения с различными системами отопления, полученные при помощи построенных CFD-моделей, а также представленные в литерату-

ре [9]. Наблюдается качественное совпадение соответствующих профилей температуры по высоте помещения, что также подтверждает адекватность построенной CFD-модели. Однако следует отметить, что в случае теплого пола в литературных данных (эксперимент) не наблюдается повышение температуры у потолка, которое вызвано излучением от пола.

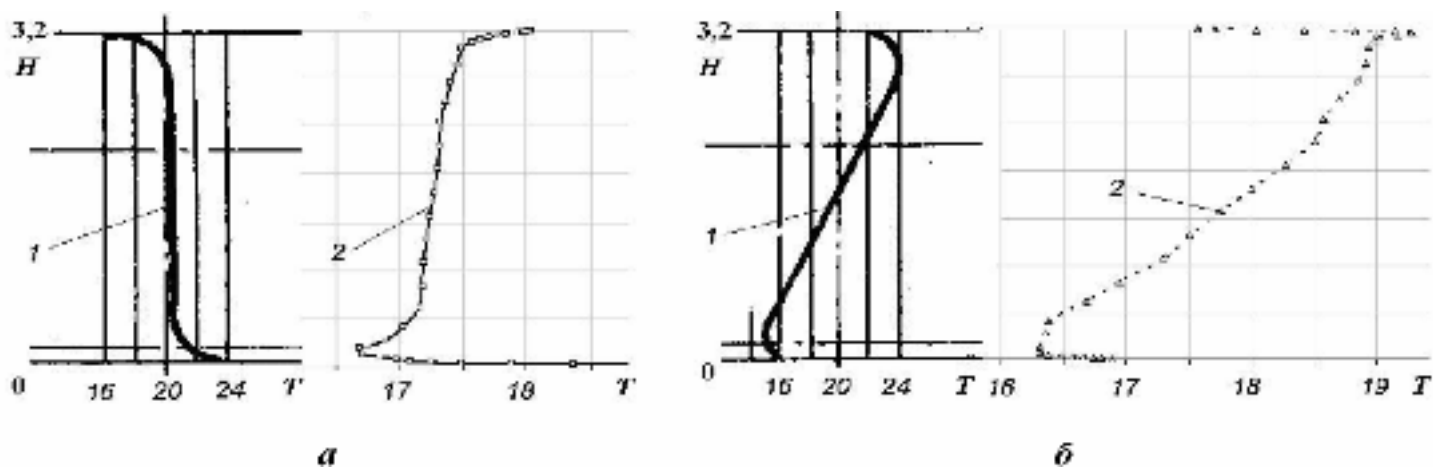


Рис. 6. Профили температур по высоте в центре помещения (а – теплый пол, б – радиатор); 1 – литературные данные, 2 – данные CFD-моделей.

Отсутствие увеличения температуры потолка в эксперименте может быть объяснено теплопотерями через потолок, в то время как в рассматриваемой модели принято допущение об отсутствии данного теплообмена.

Была также проведена проверка соотношения конвективной и радиационной составляющих тепловых потоков на греющих поверхностях различ-

ных систем отопления в разработанных CFD-моделях. Соотношение тепловых потоков для радиаторного отопления составило 68,8 % к 31,2 %, а для теплого пола, стены и потолка – 38,6 % к 61,3 %, соответственно, что согласуется с экспериментальными значениями, приведенными в [10], и что еще раз подтверждает адекватность построенных моделей.

В последующих статьях будут рассмотрены вопросы дополнительной верификации разработанных моделей по теплообмену на поверхностях помещений, а также анализа энергоэффективности и комфортности рассмотренных систем отопления.

Выводы

1. Разработаны трехмерные CFD-модели теплового режима помещения в наиболее полной постановке с учетом конвективного, радиационного теплообмена и естественной вентиляции, а также с наличием в помещении человека в сопряженной постановке с различными системами отопления (радиаторной, теплым полом, теплой стеной, теплым потолком, конвектором), которые будут использованы авторами в последующей работе для анализа энергоэффективности систем отопления и комфортности.

2. Путем сопоставления с литературными данными показана адекватность разработанных моделей теплового режима помещения с различными системами отопления. В моделях соотношение радиационного и конвективного тепловых потоков от нагревательного прибора для радиаторного отопления составило 68,8 % к 31,2 %, а для отопления от теплого пола, стены или потолка – 38,6 % к 61,3 %, соответственно, что согласуется с экспериментальными значениями, известными из литературы.

3. Сравнение профилей температур по высоте помещения с радиатором имеют одинаковый характер, а для помещения с теплым полом имеется отличие у зоны около потолка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрупов А.П., Панушкин В.Н., Жубрин С.В., Клевченков Н.И. Тепло- и воздухообмен в одноэтажном жилом доме // Труды 2 Минского Международного Форума. Т.9 Вычислительный эксперимент в задачах тепломассообмена и теплопередачи. – ч.1, Минск, 1992г. "Тепломассообмен-ММФ-92". – С. 178 –182.
2. Ливчак А. В. Вытесняющая вентиляция в школах // АВОК. – 2004. – №8. – С. 46 – 58.
3. Stanislav Gendelis, Andris Jacovics Mathematical Modeling of Living Room with Different Type of Heating, Proceeding of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT, Elounda, Greece, August 21 – 23. – 2006. – pp. 248 – 253.
4. D. Camatti Improving comfort in residential building, www.cd-adapco.com
5. Junji Onishi, Haruo Soeda, Minoru Mizuno Numerical study on low energy architecture based upon distributed heat storage system, Renewable energy. – 2001. – 22. – pp. 61 – 66.
6. E. H. Chui and G. D. Raithby Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. Numerical Heat Transfer, Part B. – 1993. – №23. – pp. 269 – 288.
7. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
8. ГОСТ 30494 – 96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
9. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений: Расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
10. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – М.: Высшая школа, 1970. – 376 с.

Получено 22.04.2009 г.