

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО И ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА КИНОТЕАТРА

А.Н. Нагорная, Е.В. Денисюк

Проведено численное моделирование и исследование формирования температурных и скоростных полей в помещении кинотеатра при проектировании вентиляции. Для реализации задачи используется конечно-элементарный программный комплекс Flow Simulation, являющийся приложением к продукту SolidWorks. Произведена оценка комфортности помещения на основе интегрированных в комплекс критериев.

Ключевые слова: SolidWorks Flow Simulation; микроклимат помещений, вентиляция кинотеатра.

Принципы расчета и проектирования систем вентиляции с избыточными тепло- и теплогазовыделениями основаны на решении аналитических уравнений теплового и воздушного баланса помещений, а также на использовании компьютерных аэродинамических моделей. При этом применение CFD-программ, согласно проведенным исследованиям [1], может оказаться оптимальным решением при проектировании систем вентиляции для помещений большого объема, поскольку большие размеры помещений затрудняют выполнение необходимых натурных обследований и измерений, дополняющих аналитические расчеты. Методы математического моделирования позволяют грамотно выбрать положение инженерных систем, сравнивать проектные альтернативы и обеспечивают понимание воздействия вносимых инженерами изменений.

Из минусов данного подхода следует отметить то, что использование CFD-программ для трехмерного моделирования требует определенной квалификации и компьютерных ресурсов.

В данной работе проведено исследование тепловлажностного режима помещения кинотеатра при проектировании приточной вентиляции по вытесняющей схеме. Приточный воздух подается под кресла зрителей в объеме 40 через одно воздухораспределительное устройство. Количество воздухораспределительных устройств равно количеству посадочных мест в зале, то есть 120 штук. Температура приточного воздуха 20 °С. Удаление воздуха осуществляется из верхней зоны помещения.

В качестве расчетной области рассматривается параллелепипед, заполненный воздухом. Так как помещение кинозала находится в составе развлекательного комплекса, то есть внутри другого помещения, то принимается, что теплопередача между смежными помещениями отсутствует.

Исследуемая задача описывается системой уравнений, в состав которой входит:

– система уравнений Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

– уравнение радиационного теплообмена:

$$Q_k = \varepsilon \sigma_0 T_w^4. \quad (3)$$

Влияние гравитации моделируется с помощью члена $S_{gravity}$:

$$S_{gravity} = -\rho g_i. \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) используются следующие обозначения: ∇ – оператор Набла, Δ – оператор Лапласа, ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, p – давление, \vec{f} – векторное поле массовых сил, t – время, u – скорость текучей среды, ε – степень черноты поверхности, σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана, T_w – температура поверхности, g_i – i -я составляющая (вдоль i -й оси системы координат) вектора гравитационного ускорения.

Используемые в математической модели системы дифференциальных и/или интегральных уравнений обычно не имеют аналитического решения, поэтому они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчетной сетке. Таким образом, решение математической задачи будет тем точнее, чем лучше расчетная сетка разрешает области нелинейного поведения решения уравнений, что лучше достигается использованием более мелкой расчетной сетки в этих полях.

Для нахождения искомого численного значения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов, используемая в Flow Simulation дискретизируется как по пространству, так и по времени. Чтобы выполнить дискретизацию по пространству, вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям используемой в расчете декартовой глобальной системы координат модели. Поскольку в Flow Simulation используется метод конечных объемов, значения переменных рассчитываются и центрах

ячеек, а не в узлах расчетной сетки, то используемая в расчетной сетке описывается ее ячейками, а не узлами, как в методах конечных разностей. Соответственно, ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов. Область, в которой эта сетка строится, также имеет единообразную для всех задач форму параллелепипеда.

Минимальный размер ячейки в двумерном пространстве составляет 5 мм, в зоне пребывания людей размер ячейки уменьшен до 1 мм. Дальнейшее сгущение расчетной сетки не влияет на результаты, но существенно увеличивает время расчета.

В помещениях с массовым пребыванием людей и незначительным остеклением, таких как кинозал, основным источником теплоты является человек. Локальный нагрев в области его пребывания создает вертикальный и горизонтальный градиенты температуры (рис. 1). Течение воздуха в нижней части направлено к центру, а над центральной частью (источником теплоты) формируется интенсивное подъемное течение. В верхней части слоя радиальное движение направлено к периферии. Таким образом, происходит формирование конвективного струйного течения.

В масштабах всего помещения просматривается формирование слоев воздуха с одинаковой температурой (рис. 2), что типично для данной схемы подачи воздуха.

На рис. 3 представлен график распределения температуры воздуха по высоте помещения. Тем-

пература воздуха в наивысшей точке помещения является температурой удаляемого воздуха и равна 25,1 °С.

В рамках аналитического метода проектирования, температура удаляемого воздуха определяется следующим соотношением:

$$t_y = t_b + \text{grad } t(H - H_{p.з.}) \quad (5)$$

Температура воздуха, полученная в результате расчета по формуле (5) (при справочном значении $\text{grad } t = 23 \text{ }^\circ\text{C}$) равна 25,75 °С. По полученной разнице температур можно судить о хорошей сходимости результатов для двух методов проектирования.

Расчет температурного поля показал, что средняя температура в окрестности сидящего человека составляет 22,5 °С (рис. 4).

Средняя подвижность воздуха в окрестности сидящего человека составляет 0,154 м/с (рис. 5).

Формирование потенциально опасной *примыкающей* зоны, то есть зоны, где расстояние от воздухораспределителя до точки, в которой скорость воздуха уменьшается до значения 0,3 м/с, показано на рис. 6.

Согласно [2] величина примыкающей зоны определяется следующим соотношением:

$$l_n = 0,005 \cdot q_s \cdot K_{Dr}, \quad (6)$$

где K_{Dr} – постоянная воздухораспределителя, для распределителя типа АНР, согласно данным производителя, принимается равной 5,7.

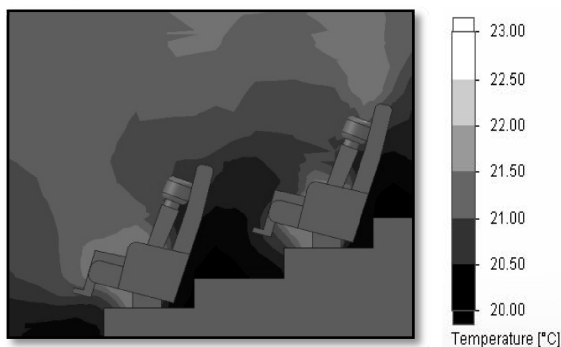


Рис. 1. Градиент температуры в зоне пребывания человека

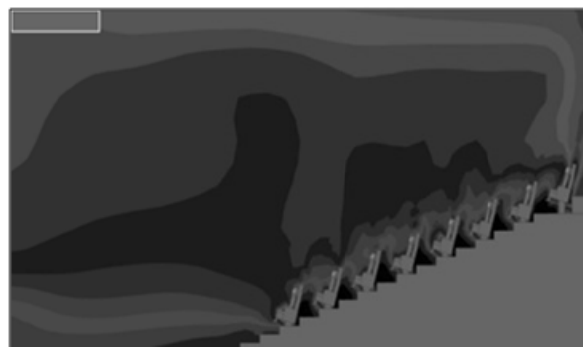


Рис. 2. Градиент температуры в объеме помещения кинотеатра

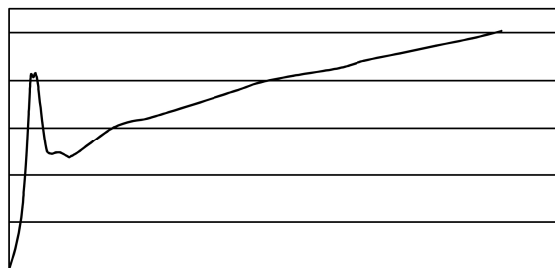


Рис. 3. Градиент температуры в объеме помещения кинотеатра

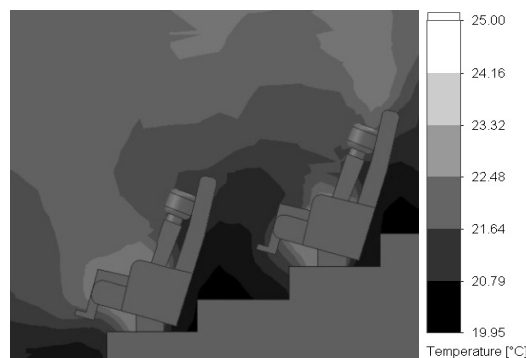


Рис. 4. Формирование поля температур в рабочей зоне

Расчет по формуле (6) показал, что длина примыкающей зоны равна 0,37 м, что соответствует длине зоны, полученной в результате моделирования.

Как видно рассчитанные параметры микроклимата (температура, подвижность воздуха, длина примыкающей зоны) близки оптимальным условиям, принятым по [3].

Программный модуль HVACFlowSimulation обладает функциональностью, позволяющей прогнозировать параметры теплового самочувствия, степень дискомфорта людей, подвергнутых действию окружающей среды, и оценить качество воздуха посредством соответствующих критериев.

Функция средней прогнозируемой оценки PMV (Predicted Mean Vote) показывает реакцию человека на тепловой комфорт и описывается уравнением

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) L, \quad (7)$$

где M – показатель обмена веществ, характеризующий тепловыделения от людей в зависимости от их двигательной активности, $1 \text{ met} = 58,1 \text{ Вт/м}^2$; L – разница между производимым внутренним теплом человека и потерями в окружающую среду.

Распределение средней прогнозируемой оценки показано на рис. 7. Стоит заметить, что диапазон оптимальных значений находится в промежутке от $-0,5$ до $+0,5$. Видно, что значение PMV

находится в оптимальных пределах во всей зоне пребывания людей за исключением последнего ряда, где значения PMV повышены до $+0,64$. Это объясняется сосредоточением нагретых конвективных потоков вследствие их естественного движения вверх. В целом, отклонение от верхнего предела оптимальных значений на $0,14$ не является критичным фактором, так как верхний предел критерия составляет $+3$, что обуславливает сбои в работе систем кондиционирования.

На основании интегрированных критериев комфорта можно делать выводы о благоприятных и неблагоприятных зонах в масштабах пребывания одного человека. Так из рис. 7 следует, что «теплой» является зона возле головы человека – следствие влияния конвективных потоков.

Следующим исследуемым параметром является действующая температура сквозняка EDT (Effective Draft Temperature), которая является мерой различия температуры между местным и средним ее значениями с учетом движения воздуха при условии, что влажность и излучение постоянны в рассматриваемом объеме.

Согласно [4] большинство людей в сидячем положении ощущает себя комфортно, если EDT находится в интервале от $-1,7$ до $1 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 8 представлено распределение температуры сквоз-

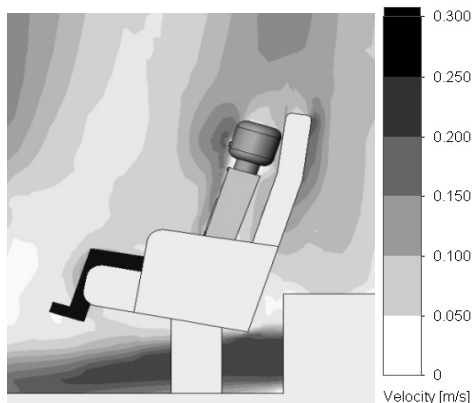


Рис. 5. Формирование поля скоростей в рабочей зоне

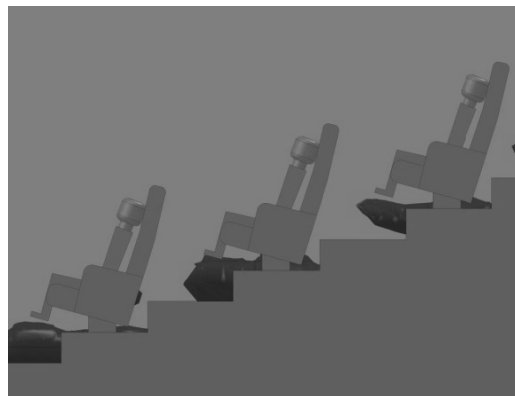


Рис. 6. Расчет примыкающей зоны

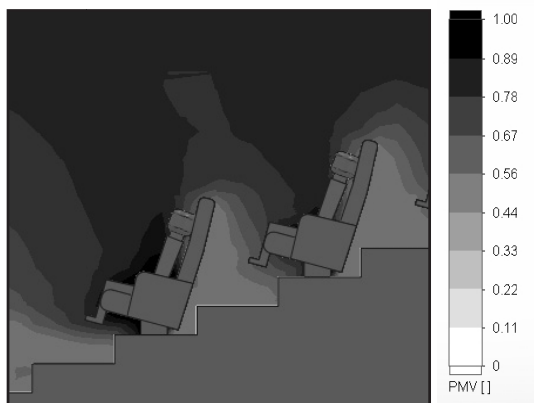


Рис. 7. Распределение средней прогнозируемой оценки (PMV)

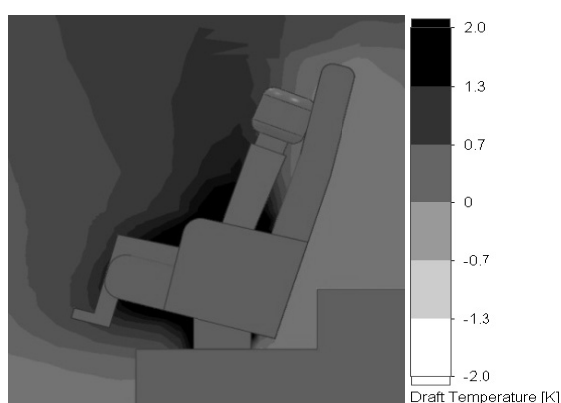


Рис. 8. Распределение температуры сквозняка (EDT)

няка в исследуемом помещении. Локальные значения этой функции находятся в допустимых пределах, за исключением зоны ног, где значение действующей температуры сквозняка равно – 2,1 °С, что свидетельствует о слегка повышенной подвижности воздуха с температурой ниже средней температуры воздуха в помещении.

В данной работе было проведено численное исследование формирования температурных и скоростных полей в помещении кинотеатра посредством использования конечно-элементарного программного комплекса Flow Simulation. Анализ полученных результатов был проведен на основе базовых термодинамических параметров и интегрированных в программный комплекс критериев комфорта.

На основании решения данной задачи сделаны следующие выводы:

– для посетителей рассматриваемое помещение кинотеатра комфортно, так как параметры микроклимата в нем близки к оптимальным;

– в качестве зоны пониженного комфорта стоит отметить последний ряд, где наблюдается увеличение температуры воздуха в зоне пребывания людей, что объясняется сосредоточением нагретых конвективных течений вследствие их естественного движения вверх.

Кроме того, выполненная работа доказала достойную функциональность CFD-пакетов применительно к задачам этого и смежных классов. В случае с помещениями больших объемов, применение данных программных комплексов просто необходимо, так как дает возможность получить практически любую информацию о формировании микроклимата в помещении, оценивать технические решения при проектировании инженерных систем и находить оптимальные варианты.

Литература

1. *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике* / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

2. *Схистад, Х. Вытесняющая вентиляция в непроизводственных зданиях* / Х. Схистад. – М.: АВОК-Пресс, 2006. – 99 с.

3. *ГОСТ 30494-96. Параметры микроклимата в помещениях*. – М.: Издательство стандартов, 1999.

4. *Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи* / А.А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.

Нагорная Анастасия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. Тел.: 8(351)2679144; nagornaya74@mail.ru.

Денисюк Евгений Владимирович, аспирант кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. Тел.: 8(351)2679144; wiide@mail.ru.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Construction Engineering and Architecture"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 61–64**

CFD-MODELING OF MOVIE THEATRE THERMAL AND AIR CONDITION

A.N. Nagornaya, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, nagornaya74@mail.ru,

E.V. Denisjuk, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, wiide@mail.ru

Numerical modeling and research of temperature and high-speed areas formation in a movie theatre are conducted. To implement this objective finite-element software package Flow Simulation is used, which is software application to SolidWorks. The assessment of comfort of the room on the basis of system integrated criteria is performed.

Keywords: SolidWorks Flow Simulation; microclimate of the rooms, ventilation of the movie cinema.

Поступила в редакцию 16 сентября 2013 г.