

15. Improving the granulating and sintering performance by pretreating specularite concentrates through mechanical activation. / Pan Jian, Zhu De-qing, Eider.dutra, Zhou Xian-lin // Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI. Rio de Janeiro. 2012. P. 1379–1388.

16. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей. В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн и др. / Под ред. акад. Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург: Межрегиональный издательский центр, 2015. – 340 с.

17. К вопросу о перспективах совершенствования тепловых схем обжиговых машин в ОАО «Лебединский ГОК» / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.А. Горбачев и др. // Сталь. 2005. №5. – С.12–14.

18. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения / В.М. Абзалов, В.В. Брагин, А.А. Вяткин, С.Н. Евстюгин, С.Н. Лелеко // Сталь. 2008. № 12. – С. 13–14.

19. Модернизация обжиговых машин ОК–520 ОАО Михайловский ГОК / В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, В.П. Бруев, В.Н. Неволин // Сталь. 2005. № 2. – С. 3–4.

20. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО “Михайловский ГОК” / В.М. Абзалов, Б.И. Борисенко, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, Н.Н. Копоть, С.И. Кретов, В.Н. Неволин // Сталь. 2006. № 6. – С. 9–10.

21. Минимизации сбросов на дымовую трубу – путь к повышению энергоэффективности обжиговых конвейерных машин / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, А.А. Солодухин, Ю.Г. Ярошенко // Сталь. 2016. № 8. – С. 81–84.

УДК 628.8

В. В. Бухмиров, М. В. Пророкова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИИ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

Аннотация

Выполнен обзор методов расчета параметров микроклимата. Приведена математическая модель процессов теплообмена при формировании микроклимата в помещении, предназначенном для длительного пребывания человека. Выполнена проверка адекватности математической модели путем сравнения результатов расчета параметров внутренней среды в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent с данными эксперимента.

Ключевые слова: параметры микроклимата, теплообмен, математическое моделирование, экспериментальное исследование микроклимата.

Abstract

A review of methods for calculating the microclimate parameters has been performed. A mathematical model of the processes of heat and mass transfer occurring in a room intended for long-term human stay is presented, while forming a microclimate. The adequacy of the mathematical model is checked by comparing the calculation results for the parameters of the internal environment in the ANSYS Fluent with the experimental data.

Key words: microclimate parameters, heat and mass transfer, mathematical modeling, experimental study of microclimate

Расчет параметров внутренней среды помещений, предназначенных для длительного пребывания человека, является актуальной задачей при оценке эффективности работы систем энергоснабжения зданий, формирующих микроклимат

(системы отопления, вентиляции и кондиционирования). В свете повсеместного осуществления деятельности по энергосбережению и повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в Российской Федерации параметры работы систем энергоснабжения корректируются за счет внедрения энергосберегающих мероприятий. Для оценки влияния процедуры энергосбережения на микроклимат зданий необходимо определить параметры внутренней среды после внедрения проектов энергосбережения.

Подходы к расчету параметров микроклимата можно условно разделить на две группы. К первой группе относят, так называемые, инженерные расчеты, которые основаны на интегральных или балансовых моделях. Балансовые модели также называют моделями с сосредоточенными параметрами или нульмерными математическими моделями. Балансовые модели рассматривают помещение как единое целое, в котором температура и влажность воздуха одинаковы во всех точках объема помещения. Все инженерные расчеты основаны на решении уравнений теплового и материального балансов для помещения в целом, а граничные условия в этом случае задают, как правило, используя уравнения стационарной теплопередачи через непроницаемые стенки.

В настоящее время в связи с интенсивным увеличением мощности вычислительных средств и совершенствованием их математического обеспечения, включая численные методы решения дифференциальных уравнений переноса теплоты, массы и импульса, стало возможным выполнять прогноз микроклимата в помещениях более детально, используя многомерные нестационарные математические модели. Эту группу расчетов традиционно называют математическим моделированием микроклимата [1].

Для численного решения системы переноса основных параметров субстанции (теплоты, массы и импульса) в настоящее время разработаны, так называемые, программно-вычислительные комплексы (ПВК) универсальные или адаптированные для моделирования физико-химических процессов в конкретном агрегате, например, в ядерном реакторе. В данной работе моделирование микроклимата в помещении здания непромышленного назначения было выполнено в среде ПВК ANSYS Fluent, который следует отнести к универсальным программно-вычислительным комплексам, позволяющим моделировать особенности протекания физических и химических процессов в объектах разного назначения. В связи с этим при использовании данного вычислительного комплекса очень важен этап математической формулировки задачи расчета конкретного процесса. На этапе математического описания исследуемого объекта принимают упрощающие задачу допущения, задают условия однозначности и записывают дифференциальные уравнения переноса в окончательном виде.

В помещениях непромышленного назначения микроклимат формируется вследствие конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена, а также в процессе молекулярной и конвективной диффузии загрязняющих воздух веществ. Поэтому математическая модель формирования микроклимата в помещении здания, включает в себя уравнения переноса энергии за счет радиационного и конвективного теплообмена, уравнение переноса импульса, уравнение неразрывности и уравнение переноса массы i -ого компонента смеси с учетом следующих допущений: воздушная среда в помещении представляет собой четырех компонентную смесь, состоящую из азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара; компоненты газовой смеси, как и сама смесь, подчиняются законам идеального газа; в помещении происходит термогравитационное движение воздушной среды; газовая смесь в помещении является недиатермичной средой; диффузионный перенос воздуха через твердые элементы ограждающих конструкций (стены, полотно оконного блока) отсутствует; вход воздушного потока осуществляется через оконный блок, выход – через вентиляционные каналы и дверные блоки; источники теплоты за счет внутреннего трения и адиабатического сжатия воздушной среды малы и ими можно пренебречь; рассеяние и преломление лучистой энергии можно не учитывать в силу их малости.

С учетом принятых допущений математическая модель тепломассообмена в помещении непромышленного здания принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho w + \nabla(\rho w_i w_j) = -\nabla p + \nabla \rho \nu \nabla w + \rho g; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho E + \nabla[\rho w(\rho E + p)] = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_{i=1}^n h_i J_i + \rho \nu \nabla w_i w_j) + S_h. \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho + \nabla(\rho w) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho C_i + \nabla(\rho w C_i) = -\nabla J_i + S_i. \quad (4)$$

$$\frac{dI(r, s)}{ds} + (A + \sigma_s) I(r, s) = A \frac{\sigma_0 T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') d\Omega'. \quad (5)$$

В уравнениях (1) – (5): τ – время; ρ – плотность газовой смеси; w – скорость движения воздуха; p – давление; ν – кинематический коэффициент вязкости; g – ускорение свободного падения; E – удельная внутренняя энергия газовой смеси; λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности; h_i – удельная энтальпия i -ого компонента смеси; J_i – плотность диффузионного потока i -ого компонента смеси; S_h – источниковый член уравнения, характеризующий действие источников теплоты внутри расчетной области; C_i – локальная массовая концентрация i -ого компонента смеси; S_i – источниковый член уравнения для i -ого компонента смеси; I – яркость излучения в данной точке (r) в данном направлении (s); r – радиус-вектор; s – единичный вектор в направлении рассеяния; s' – единичный вектор в направлении падающего излучения; A – коэффициент поглощения; σ_s – коэффициент рассеяния (для чистого воздуха $\sigma_s = 0$); σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; T – локальная температура; Ω – телесный угол.

Более детальная характеристика компонентов математической модели приведена в [1, 2, 3].

Теплофизические и радиационные свойства тел, участвующих в процессе теплообмена приняты по справочным данным [4], а излучательные свойства воздушной смеси рассчитывают, задавая объемные доли отдельных ее компонентов. Источниками тепловой энергии, влаги и углекислого газа в помещениях жилых, общественных и административных зданий являются находящиеся в помещении люди, отопительные приборы и бытовая техника. Известно, что в среднем человек выдыхает в секунду $1,2 \cdot 10^{-4}$ кг воздуха составом 78,5 % N_2 , 14,2 % O_2 , 3,6% H_2O , 3,7 % CO_2 и выделяет 105 Вт тепловой энергии [5].

Начальные условия для решения системы уравнений (1) – (5) задают по экспериментальным значениям температуры поверхностей помещения, температуры воздуха, относительной влажности и подвижности внутреннего и наружного воздуха.

Мощность источника отопления определяют экспериментально, а тепловыделение бытовой и осветительной техники задают по паспортным данным оборудования в зависимости от режима его работы. Температуру поверхности ограждающих конструкций (T_w) и источников тепловой энергии принимают по результатам эксперимента.

На границах воздухопроницаемых поверхностей (вентиляционные отверстия, окна, двери) скорость воздушного потока рассчитывают по известным из эксперимента или требуемым по санитарно-гигиеническим нормам [6] значениям воздухообмена.

Для моделирования турбулентных свойств текучей среды на основе анализа литературных источников [7], а также результатов вычислительных экспериментов была выбрана стандартная k- ϵ модель турбулентности [3, 7].

Геометрическая и сеточная модели экспериментального помещения учебной аудитории ВУЗа в ПК ANSYS Fluent приведены на рисунке 1. Особенности вычислительного процесса параметров микроклимата подробно изложены в работе [8].

На рисунке 2 приведены результаты математического моделирования и экспериментального определения температуры воздуха в четырех областях экспериментального помещения: в точке 14 (рис. 1) в центре помещения (область 1 на рис. 2), в

точке 15 (рис. 1) на расстоянии 0,5 м от левой стены (область 2 на рис. 2) и в точке 16 (рис. 1) на расстоянии 0,5 м от фронтальной стены (область 3 на рис. 2).

Анализ рисунка 2 свидетельствует об удовлетворительной корреляции результатов расчета и измерения температуры воздушной среды в объеме экспериментального помещения.

Расчет полей влагосодержания и подвижности воздуха в ПБК ANSYS Fluent показал, что отличие расчетных и экспериментальных данных составляет не более 9,5 %.

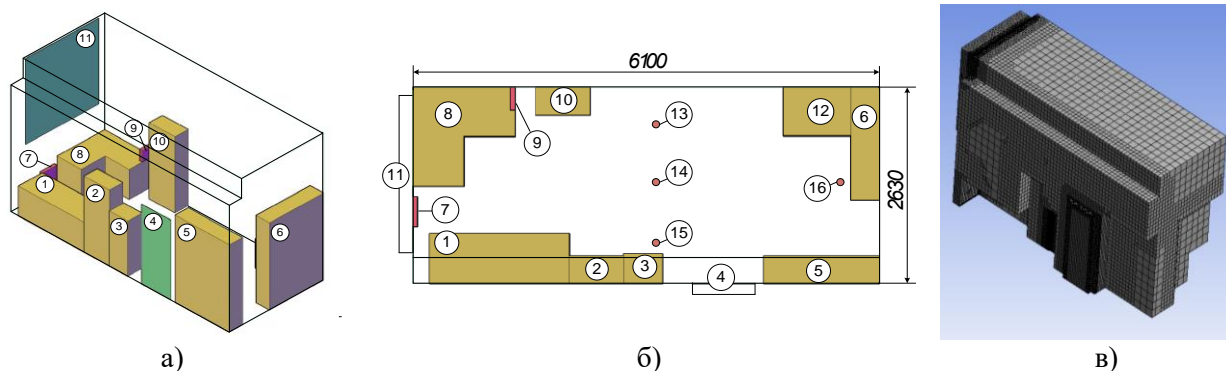


Рис. 1. Геометрическая модель (а), план (б) и расчетная сетка (в) экспериментального помещения:

- 1 – рабочий стол; 2 – шкаф; 3 – сейф; 4 – входная дверь; 5, 6 – стеллаж;
 7 – отопительный прибор (масляный радиатор); 8 – рабочий стол;
 9 – отопительный прибор (теповентилятор); 10 – шкаф;
 11 – окно; 12 – стол; 13, 14, 15 – место установки измерительных приборов

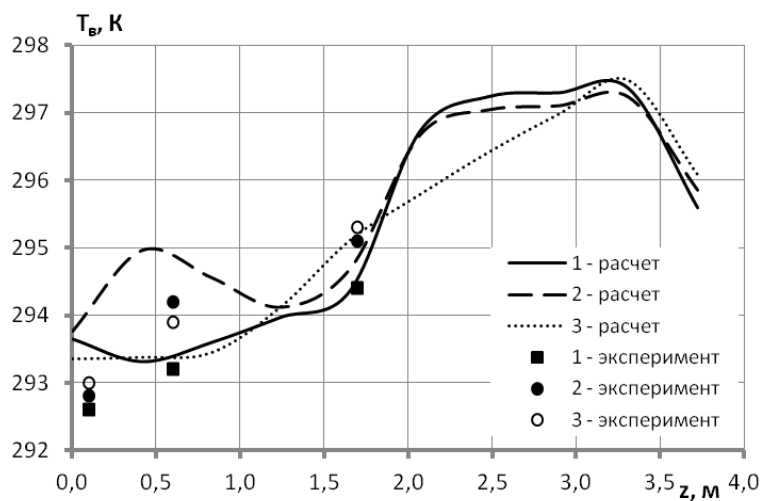


Рис. 2. Температура воздуха в экспериментальном помещении

Вывод. Разработана математическая модель процессов теплообмена, формирующих микроклимат в помещении здания непромышленного назначения, которая учитывает все основные особенности данного объекта, включая наличие в помещении людей, ослабление радиационного теплообмена воздушной средой и фактический воздухообмен. Доказана адекватность математической модели микроклимата путем сравнения результатов моделирования в ПБК ANSYS Fluent с экспериментальными данными.

Список использованных источников

1. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
2. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК–ПРЕСС, 2002. – 194 с.

3. ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. – ANSYS, Inc. November 2013. – 2692 p.
4. Бухмиров В.В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / В.В. Бухмиров [и др.]. – Иваново, ИГЭУ, 2009. – 104 с.
5. Лаптев А.П. Гигиена / А.П. Лаптев, С.А. Полиевский. – М.: Физкультура и спорт, 1990. – 368 с.
6. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. – М.: ФАУ ФЦС, 2014 – 76 с.
7. Юн А.А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе FASTEST–3D: учебное пособие / А.А. Юн, Б.А. Крылов. – М.: МАИ, 2007. – 116 с.
8. Bukhmirov V.V. Simulation of the processes of heat- and mass transfer in the rooms of public building with the natural ventilation / MATEC Web of Conferences: сборник научных трудов. – 2017. – № 92. – С. 1 – 5.

УДК 621.1:667

В. В. Бухмиров, А. К. Гаськов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ МИКРОСФЕР

Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования теплофизических свойств и энергетической эффективности тонкоплёночных энергосберегающих покрытий, состоящих из полых микросфер и связующего материала. Выполнена оценка значения коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски в зависимости от её состава и температуры, определено значение коэффициента температуропроводности. Приведены результаты экспериментального определения энергетической эффективности использования тонкоплёночных покрытий для утепления фасадов зданий и в качестве тепловой изоляции для трубопроводов с горячим теплоносителем.

Ключевые слова: тепловые потери, тепловая изоляция, энергосберегающая краска

Abstract

The results of an experimental study of the thermophysical properties and energy efficiency of thin-film energy-saving coatings consisting of hollow microspheres and a binder are presented. The value of the coefficient of thermal conductivity of the energy-saving paint is estimated depending on its composition and temperature, and the thermal diffusivity coefficient is determined. The results of the experimental determination of the energy efficiency of the use of thin-film coatings for the insulation of facades of buildings and as thermal insulation for pipelines with a hot coolant are presented.

Key words: heat loss, thermal insulation, energy-saving paint

Снижение тепловых потерь является актуальной задачей повышения энергетической эффективности промышленных теплоэнергетических систем. Для уменьшения потерь тепловой энергии используют различные теплоизоляционные материалы, которые должны обладать рядом специальных качеств, главным из которых является низкое значение коэффициента теплопроводности. Основная доля рынка (~97%) теплоизоляционных материалов приходится на неорганические материалы – утеплители из минеральной ваты и пенопласты [1]. В настоящее время в целях энергосбережения достаточно широко стали применять тонкоплёночные покрытия (энергосберегающие краски), состоящие из полых