

УДК 697.9:621.311.22

Вячеслав Викторович Бухмиров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: bao6095@mail.ru

Евгений Николаевич Бушуев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Илья Игоревич Светушков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: ilia.svet@gmail.com

Елена Николаевна Темлянцева

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Денис Александрович Долинин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: murcielago82@mail.ru

Геометрическая модель главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПМК Ansys

Авторское резюме

Состояние вопроса. Моделированию тепловоздушного режима в главном корпусе ТЭС в научно-технической литературе уделяется недостаточно внимания. Для его моделирования необходимо на первом этапе разработать геометрическую модель котлотурбинного цеха. Математическая модель тепловоздушного режима в главном корпусе станции позволит разработать энергосберегающие мероприятия и улучшить микроклимат в ее помещении.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием методов математического моделирования, основанных на применении графического редактора DesignModeler в ПМК ANSYS.

Результаты. Построена геометрическая модель котлотурбинного цеха Ивановской ТЭЦ-2, которая позволяет разработать математическую модель теплообмена в воздушном пространстве главного корпуса станции.

Выводы. Трехмерная геометрическая модель Ивановской ТЭЦ-2 является первым этапом создания комплексной математической модели тепловоздушного режима главного корпуса в целях оценки мероприятий, снижающих потребление тепловой и электрической энергии на собственные нужды станции.

Ключевые слова: котлотурбинный цех, тепловоздушный режим, математическая модель микроклимата, условия однозначности для решения дифференциальных уравнений теплообмена, геометрическая модель объекта

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: bao6095@mail.ru

Evgeniy Nikolayevich Bushuev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Ilya Igorevich Svetushkov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate student of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ilia.svet@gmail.com

Elena Nikolaevna Temlyantseva

Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Denis Alexandrovich Dolinin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murcielago82@mail.ru

Development of geometric model of the main building of Ivanovo CHPP-2 in Ansys PVK

Abstract

Background. Modeling of the heat-air regime in the main body of the TPP in the scientific and technical literature is given insufficient attention. To simulate the heat-air regime in the main building of a thermal power plant, it is necessary to develop a geometric model of the boiler-turbine shop. A mathematical model of the heat-air regime in the main building of the TPP will allow us to develop energy-saving measures and improve the microclimate in the premises of the plant.

Materials and methods. The study has been carried out using mathematical modeling methods based on the DesignModeler graphic editor in ANSYS software.

Results. A geometric model of the boiler-turbine shop of Ivanovo combined heat and power plant-2 (CHPP-2) has been developed. It allows us to develop a mathematical model of heat and mass transfer in the air space of the main building of the plant.

Conclusions. The three-dimensional geometric model of Ivanovo CHPP-2 is the first stage of the development of an integrated mathematical model of the heat-air regime of the main building. Its aim is to evaluate measures that reduce consumption of thermal and electrical energy for the in-house needs.

Key words: boiler-turbine shop, heat-air regime, mathematical model of microclimate, single-valued condition to solve differential equations of heat and mass transfer, geometric model of the object

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.015-021

Введение. В настоящее время при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений значительное внимание уделяют повышению их энергоэффективности [1, 2]. Однако при этом необходимо строго соблюдать и требования нормативных документов, регламентирующих допустимые параметры микроклимата.

В Российской Федерации тепловая и электрическая энергия вырабатывается в основном на ТЭС. Главные ее структурные составляющие – котельный цех и турбинный цех – характеризуются значительной площадью и высотой, а также большим количеством установленного основного и вспомогательного оборудования. К основному оборудованию относят котлы, турбины, электрогенераторы и трансформаторы. Вспомогательное оборудование включает в себя насосы, подогреватели, трубопроводы, сепараторы и ряд других устройств, необходимых для производства тепловой и электрической энергии. Территориально котельный и турбинный цехи примыкают друг к другу, образуя единое пространство – котлотурбинный цех или главный корпус ТЭС, в котором и расположено основное и вспомогательное оборудование.

Исследование микроклимата котлотурбинного цеха ТЭС является весьма сложной

задачей и может быть осуществлено двумя известными способами. Первый способ заключается в организации мониторинга микроклимата (температура, влажность и скорость движения воздуха, концентрации химических и твердых веществ в нем, температура наружных поверхностей оборудования) в различных точках цеха, на основе которого разрабатывают мероприятия, направленные на улучшение условий труда персонала станции и на сбережение энергии. Неоспоримым преимуществом экспериментального метода является его достоверность, однако при этом отсутствует возможность выявить причинно-следственную связь между параметрами микроклимата и событиями, которые влияют на их значения [3]. Вторым способом исследования и изучения микроклимата в главном корпусе ТЭС является создание цифрового двойника станции путем построения математической (имитационной) модели тепловоздушного режима главного корпуса.

Методы исследования. Метод математического моделирования становится все более популярным в современных научных исследованиях [4, 5]. В настоящее время для реализации сложных математических моделей можно использовать апробированные программно-вычислительные комплексы

(ПБК), такие как STAR CCM+, ANSYS, ЛОГОС, Flow Simulation, Comsol Multiphysics, Phoenix и ряд других программных продуктов. Поэтому первым этапом при построении математической модели физического процесса с использованием ПБК является выбор среды моделирования, т. е. вида программно-вычислительного комплекса. Адекватная математическая модель в программно-вычислительных комплексах позволяет с высокой точностью рассчитать параметры микроклимата помещения, а также оценить эффект от внедрения энергосберегающих мероприятий еще до момента начала их практической реализации [6].

Обзор научной литературы [7, 8] показал, что наиболее универсальным и мощным средством для решения задачи моделирования микроклимата в главном корпусе ТЭС является программно-вычислительный комплекс ANSYS. Заметим, что применение ПБК предъявляет высокие требования к разработчику математической модели при создании концептуальной модели процесса, которая включает в себя физическое описание сути процесса, постановку задачи и формирование конкретных целей исследования. Самым важным результатом разработки концептуальной модели моделируемого объекта или процесса является принятие обоснованных, упрощающих задачу допущений.

Построение математической модели микроклимата в ПБК ANSYS начинают с задания условий однозначности для решения дифференциальных уравнений теплообмена (ТМО), описывающих тепловоздушный режим главного корпуса ТЭС. Как известно, условия однозначности включают в себя задание расчетной области исследования (геометрии объекта и времени процесса), физических характеристик тел, участвующих в процессах ТМО, наличия внутренних источников или стоков теплоты и массы, начального и граничных условий [9]. Моделирование микроклимата в котлотурбинном цехе ТЭЦ является нетривиальной задачей и предъявляет высокие требования как к разработчику, так и к вычислительным ресурсам. Трудоемкость моделирования обусловлена в первую очередь значительными геометрическими размерами цеха, большим количеством тепловыделяющего оборудования, а также наличием участков взаимодействия внутренних воздушных масс цеха с наружным воздухом в виде открытых дверей, ворот, фрамуг и т.д.

Математическое моделирование микроклимата (тепловоздушного режима) главного корпуса станции начинают с задания расчетной области, которая представляет собой геометрическую модель объекта. При этом детальность проработки геометрии основного и вспомогательного оборудования, установленного в котлотурбинном цехе, зависит в первую очередь от мощности используемого вычислительного устройства.

В настоящее время существуют два основных метода получения трехмерной геометрической модели помещения и находящихся внутри него объектов [10]. Первый метод основан на лазерном 3D-сканировании, а второй – на построении геометрической модели в специализированной программе, например DesignModeler, входящей в состав ПБК ANSYS. Построение при помощи 3D-сканирования обеспечивает высокую скорость и точность измерений, сокращение затрат труда и времени и позволяет получить детальную трехмерную модель объекта. Однако в котлотурбинном цехе отсутствует возможность сканирования из-за сложности рельефа (отсутствия прямой видимости). Отметим также сложность лазерного сканирования остекления цеха и высокую стоимость данного способа получения геометрической модели.

Построение геометрической модели котлотурбинного цеха в специализированном редакторе требует предварительного сбора исходных данных о геометрических размерах помещений, устройств и оборудования и их взаимном расположении. Для построения геометрической модели главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПБК ANSYS был применен графический редактор DesignModeler. Детализация построения геометрической модели зависела от мощности компьютера и от особенностей задания граничных условий в местах притока и стока воздушной среды в цехе, которые должны быть изображены с наименьшим числом упрощений.

Результаты исследования. На начальном этапе работы были измерены лазерной рулеткой все основные геометрические размеры цеха и оборудования, расположенного внутри главного корпуса. Заметим, что основные размеры главного корпуса, а также план установки оборудования внутри цеха предоставила Ивановская ТЭЦ-2. Все геометрические построения велись в трехмерном виртуальном пространстве в масштабе 1:1 при помощи специализированного

редактора ПБК ANSYS в блоке Geometry с использованием модуля DesingModeler. Вспомогательное оборудование относительно небольших размеров, например насосы, было изображено в виде параллелепипедов. Построение трехмерного тела выполняли в два этапа. Сначала формировался эскиз тела в двух плоскостях (высота и ширина), а затем выстраивалась третья плоскость при помощи инструмента *Extrude* графического редактора путем «вытягивания» эскиза по третьей оси, тем самым задавалась его толщина (длина). Некоторые элементы, такие как колонны в котельном и турбинном отделениях, имеют одинаковые геометрические размеры, а также находятся друг от друга на одинаковом расстоянии. Поэтому был использован инструмент *Pattern* графического редактора, который позволяет построить одинаковые тела на одной плоскости с заданным шагом между ними.

На рис. 1 показана геометрическая модель деаэратора, которая построена при помощи опции *Subtract* (вычитание) графического редактора в целях соединения двух отдельных тел – бака деаэратора и деаэрационной колонки.

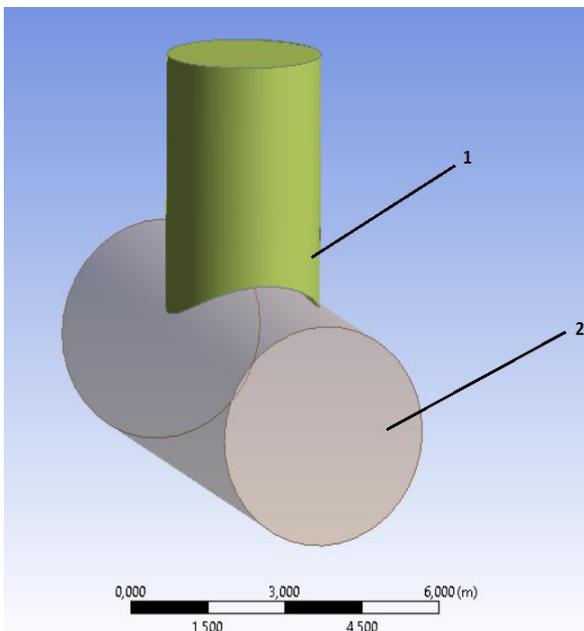


Рис. 1. Геометрическая модель деаэратора: 1 – колонка деаэратора; 2 – бак деаэратора

Таким же методом вычитания были исключены пересечения перекрытий цеха на отметках обслуживания с основным оборудованием.

Примеры построения моделей основного оборудования котлотурбинного цеха представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 показаны геометрические модели паровой турбины и конденсатора, а на рис. 3 приведена геометрическая модель парогенератора ТП-170.

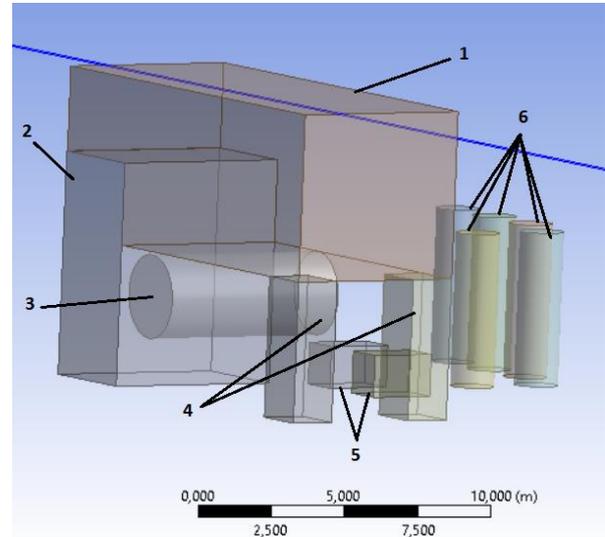


Рис. 2. Геометрическая модель турбины со вспомогательным оборудованием: 1 – наружная металлическая изоляция; 2 – кабельные каналы; 3 – конденсатор; 4 – опоры турбины; 5 – конденсатные насосы; 6 – подогреватели основного цикла

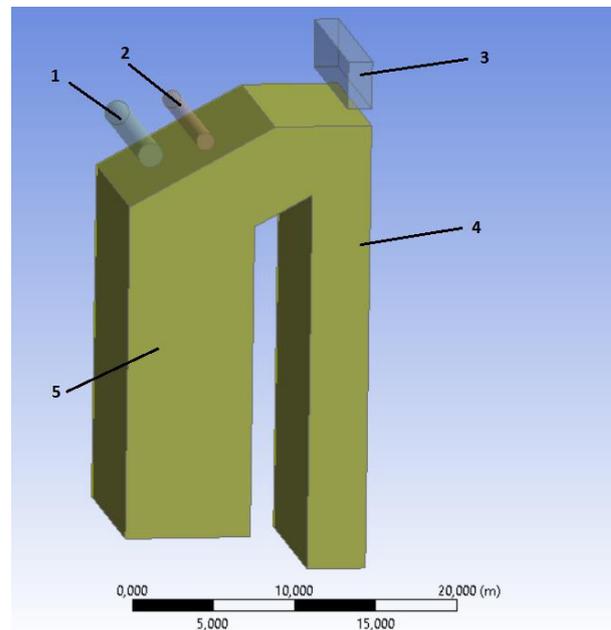


Рис. 3. Геометрическая модель парогенератора ТП-170: 1, 2 – барабаны; 3 – всасывающая шахта горячего воздуха; 4 – опускной газоход; 5 – топка

Геометрическая модель ограждающих конструкций включает в себя оконные проемы, двери и ворота. Заключительный этап построения геометрической модели станции заключается в «заполнении» производственного помещения воздухом при помощи специальной функции *Fill* (заполнение), которая входит в состав графического редактора.

Результатом этой операции является появление нового тела внутри главного корпуса станции, обрамленного ограждающими конструкциями, которые показаны на рис. 4. Разработанная геометрическая модель котлотурбинного цеха ТЭЦ состоит из 415 трехмерных тел. Дополнительно были созданы и пронумерованы внешние поверхности на границах основного и вспомогательного оборудования и на границах ограждающих конструкций (окна, двери, ворота и др.). Геометрическая модель главного корпуса станции, разработанная в ПБК ANSYS, позволяет выполнять любые поперечные и продольные разрезы цеха. Например, на рис. 5 показан фронтальный разрез главного корпуса. Геометрическая

модель является расчетной областью для моделирования сопряженного (совместного) теплообмена в объеме котлотурбинного цеха.

Выводы. Разработанная геометрическая модель главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПБК ANSYS включает в себя описание основного и вспомогательного оборудования и подробную характеристику ограждающих конструкций с учетом всех строительных и технологических проемов.

Геометрическая модель котлотурбинного цеха задает границы расчетной области для формирования тепловоздушного режима, который определяет микроклимат производственного помещения.

Математическая модель микроклимата в главном корпусе ТЭЦ-2 позволит проверить эффективность энергосберегающих мероприятий, направленных на уменьшение затрат энергии на собственные нужды станции, и выполнить требования нормативных документов по качеству воздушной среды в производственном помещении.

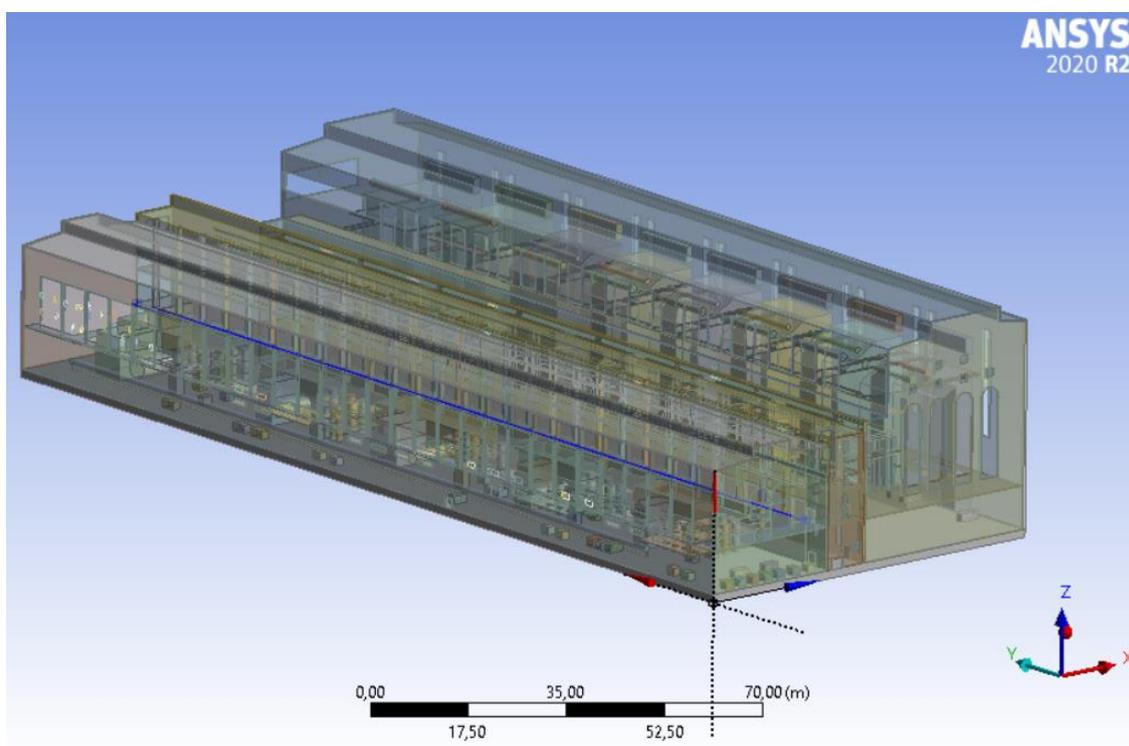


Рис. 4. Геометрическая модель котлотурбинного цеха

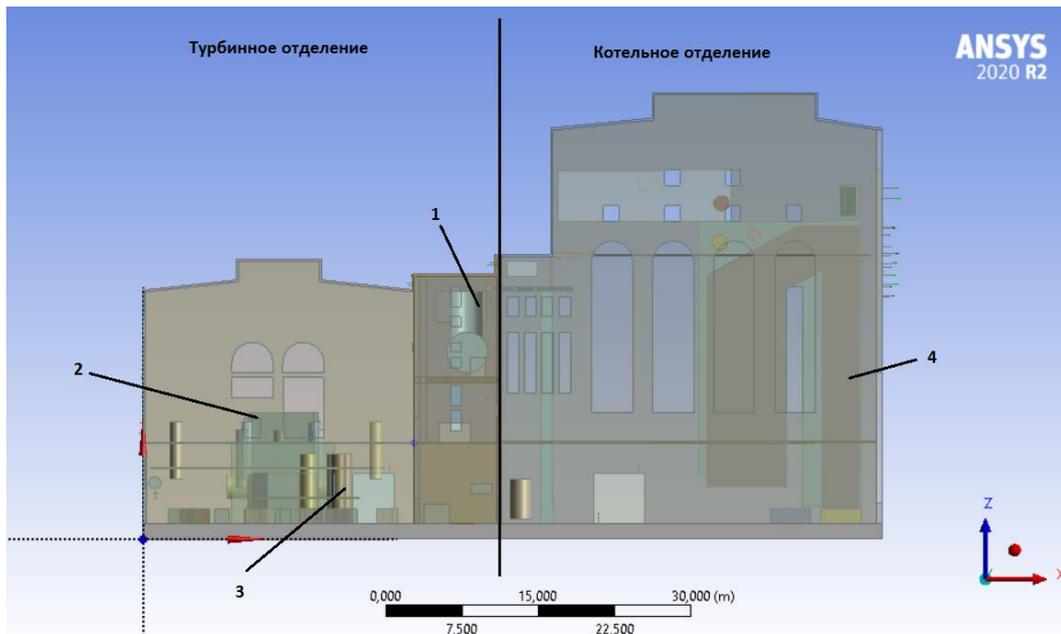


Рис. 5. Фронтальный разрез главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПК ANSYS: 1 – деаэраторы; 2 – паровые турбины; 3 – подогреватели основанного цикла; 4 – паровые котлы

Список литературы

1. **Лысев В.И., Шилин А.С.** Направление повышения энергоэффективности зданий и сооружений // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. – 2017. – № 2/3. – С. 18–25.
2. **Соколов М.** Энергоемкость экономики России и основные направления по ее сокращению // Энергетическая политика. – 2023. – № 7(186). – С. 46–67.
3. **Гетия С.И., Кочетов О.С., Стареева М.О.** Расчет оптимальных параметров микроклимата рабочей зоны // Вестник МГУПИ. – 2013. – № 5. – С. 84–92.
4. **Панаиотти Е.А., Суржиков Д.В.** Комплексная оценка условий труда и риска для здоровья работающих в основных цехах тепловых электростанций // Сибирский научный медицинский журнал. – 2007. – № 1(120). – С. 56–62.
5. **Табунщиков Ю.А.** Математическое моделирование – универсальный инструмент управления теплоэнергопотреблением здания // Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК. – 2018. – № 6. – С. 26–30.
6. **Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Гильмутдинов А.Ю.** Совершенствование системы тепловоздухоснабжения главного корпуса ТЭС на основе математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 4–7.
7. **Пророкова М.В.** Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Иваново, 2017. – 202 с.

8. **Денисхина Д.М.** Оценка теплового комфорта в помещениях на основе анализа результатов математического моделирования // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 3. – С. 184–192.

9. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен: учебник в 2 т. Т. 1. – Иваново, 2023. – 364 с.

10. **Горбунов В.А.** Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: учеб. пособие. – Иваново, 2008. – 216 с.

References

1. Lysev, V.I., Shilin, A.S. Napravleniya povysheniya energoeffektivnosti zdaniy i sooruzheniy [Prospects to improve energy efficiency of buildings and structures]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie*, 2017, no. 2/3, pp. 18–25.
2. Sokolov, M. Energoemkost' ekonomiki Rossii i osnovnye napravleniya po ee sokrashcheniyu [Energy intensity of the Russian economy and main directions for its reduction]. *Energeticheskaya politika*, 2023, no. 7(186), pp. 46–67.
3. Getiya, S.I., Kochetov, O.S., Stareeva, M.O. Raschet optimal'nykh parametrov mikroklimate rabochey zony [Calculation of optimal parameters of the microclimate of the working area]. *Vestnik MGUPI*, 2013, no. 5, pp. 84–92.
4. Panaiotti, E.A., Surzhikov, D.V. Kompleksnaya otsenka usloviy truda i riska dlya zdorov'ya robotayushchikh v osnovnykh tsekhakh teplovykh elektrostantsiy [Comprehensive assessment of working conditions and health risks for workers in the main shops of thermal power plants]. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal*, 2007, no. 1(120), pp. 56–62.

5. Tabunshchikov, Yu.A. Matematicheskoe modelirovanie – universal'nyy instrument upravleniya teploenergopotrebleniem zdaniya [Mathematical modeling as a universal tool to manage heat and energy consumption of a building]. *Ventilyatsiya. Otoplenie. Konditsionirovanie: AVOK*, 2018, no. 6, pp. 26–30.

6. Bukhmirov, V.V., Rakutina, D.V., Gil'mutdinov, A.Yu. Sovershenstvovanie sistemy teplovozdukhonasnabzheniya glavnogo korpusa TES na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Improvement of heat and air supply system of the main building of the thermal power plant based on mathematical modeling]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 4–7.

7. Prorokova, M.V. *Povyshenie effektivnosti energosberegayushchikh meropriyatiy s uchetom*

komfortnosti mikroklimate. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of efficiency of energy-saving measures considering the comfort of the microclimate. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2017. 202 p.

8. Deniskhina, D.M. Otsenka teplovogo komforta v pomeshcheniyakh na osnove analiza rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya [Assessment of thermal comfort in premises based on analysis of mathematical modeling results]. *Vestnik TGASU*, 2015, no. 3, pp. 184–192.

9. Bukhmirov, V.V. *Teploobmen. V 2 t., t. 1* [Heat and mass transfer. In 2 vols., vol. 1]. Ivanovo, 2023. 364 p.

10. Gorbunov, V.A. *Modelirovanie teploobmena v konechno-elementnom pakete FEMLAB* [Heat transfer modeling in FEMLAB finite element package software]. Ivanovo, 2008. 216 p.