

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

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

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

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

Мария Владимировна Родионова

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

Математическое моделирование тепловоздушного режима в главном корпусе Ивановской ТЭЦ-2

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обеспечение качественного микроклимата главного корпуса тепловой электрической станции необходимо для эффективного ведения технологического процесса и соблюдения требований действующих нормативных документов в области промышленной санитарии. В связи с этим актуальной задачей является разработка адекватной математической модели тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС, которая позволяет анализировать распределение температуры, влажности, подвижности воздуха и концентрации примесей в объеме объекта при различных технологических режимах работы оборудования и изменении внешних климатических условий.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбран главный корпус Ивановской ТЭЦ-2. Математическое моделирование параметров микроклимата главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 выполнено в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent.

Результаты. Разработана и реализована в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent математическая модель тепловоздушного режима главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2. Выполнена настройка численной математической модели тепловоздушного режима путем верификации результатов расчета с результатами пассивного эксперимента. При помощи разработанной математической модели рассчитаны параметры микроклимата (температура, относительная влажность, подвижность воздуха, концентрация летучих газов) объекта исследования в холодный и теплый периоды года, а также выполнен анализ соответствия параметров микроклимата установленным санитарным нормам.

Выводы. Разработанная математическая модель тепловоздушного режима главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 позволяет рассчитать параметры микроклимата главного корпуса тепловой станции в любой период года с учетом особенностей технологического режима работы оборудования, выполнить анализ соответствия параметров микроклимата требованиям СанПиН и оценить эффективность внедрения мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности ТЭС.

Ключевые слова: тепловоздушный режим, параметры микроклимата, пассивный эксперимент, математическая модель тепловоздушного режима, энергосберегающие мероприятия

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

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

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

Maria Vladimirovna Rodionova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rodionova_mv@list.ru

Mathematical modeling of heat and air regime in the main building of the Ivanovo TPP-2

Abstract

Background. It is necessary to ensure a high-quality microclimate of the main building of a thermal power plant (TPP) for efficiency of technological process and compliance with the requirements of current regulatory documents in the field of industrial hygiene. In this regard, the development of an adequate mathematical model of the heat and air regime of the main building of a thermal power plant is an urgent task. Such model makes it possible to analyze the distribution of temperature, humidity, air velocity and impurity concentrations within the facility under various technological operating modes of the equipment and changing outdoor climatic conditions.

Materials and methods. The main building of Ivanovo TPP-2 has been chosen as the object of study. Mathematical modeling of microclimate parameters of the main building of Ivanovo TPP-2 has been carried out using the ANSYS Fluent software package.

Results. A mathematical model of the heat and air regime of the main building of Ivanovo TPP-2 has been developed and implemented in the ANSYS Fluent software package. The numerical mathematical model of the heat and air regime has been adjusted by verifying the calculation results with the results of the passive experiment. Using the developed mathematical model, the microclimate parameters of the research object have been calculated, including temperature, relative humidity, air velocity and concentration of volatile gaseous impurities for the cold and warm periods of the year. An analysis has been also carried out to determine whether the microclimate parameters comply with the established sanitary standards.

Conclusions. The developed mathematical model of the heat and air regime of the main building of Ivanovo TPP-2 makes it possible to calculate the microclimate parameters of the main building of a thermal power plant in any period of the year, taking into account the specific features of the technological operating mode of the equipment. The model also allows assessment of the compliance of microclimate parameters with sanitary standards requirements and evaluation of measures aimed at improving the energy efficiency of thermal power plants.

Key words: heat and air regime, microclimate parameters, passive experiment, mathematical model of heat and air regime, energy-saving measures

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.005-016

Введение. Современный этап развития электроэнергетики Российской Федерации характеризуется решением задач повышения энергетической эффективности, снижения удельных издержек производства энергии [1] и обеспечения безопасных и комфортных условий труда [2, 3]. В соответствии с [4], приоритетными направлениями развития отрасли являются модернизация

генерирующих мощностей, повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и снижение энергопотребления на собственные нужды на тепловых электрических станциях (ТЭС). В главном корпусе ТЭС параметры микроклимата отражают общий энергетический баланс объекта, уровень тепловой нагрузки, характер внутренних потоков теплоты и

массы, а также тепловое и механическое взаимодействие внутренней и внешней воздушной среды. Отклонение параметров тепловоздушного режима от нормативных значений приводит к снижению комфортности микроклимата, ухудшению условий труда персонала, увеличению тепловых потерь и росту потребления энергоресурсов на собственные нужды.

Таким образом, совершенствование микроклимата главного корпуса ТЭС является задачей не только охраны труда, но и действенным инструментом энергосбережения. По сравнению со значительным объемом финансовых средств, требуемых для модернизации основного оборудования, совершенствование параметров тепловоздушного режима главного корпуса позволяет достичь снижения затрат на собственные нужды станции при относительно умеренных капитальных затратах. Однако экспериментальное исследование микроклимата в условиях действующей станции [5, 6] имеет ряд ограничений, таких как трудоемкость выполнения измерений во всех точках внутренней среды здания, трудность анализа переходных режимов работы основного оборудования и отсутствие возможности оценки эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий. В этих условиях математическое моделирование становится, пожалуй, единственным инструментом анализа и оптимизации тепловоздушного режима объекта исследования [7]. Численное решение уравнений переноса энергии, импульса и массы позволяет получить трехмерное распределение температуры, скорости воздуха, летучих газов и ряда других параметров в объеме здания.

Использование современных программных вычислительных комплексов [8] обеспечивает пространственную детализацию параметров микроклимата и их изменение во времени, позволяет оценить влияние энергосберегающих мероприятий на технологический процесс и дает возможность проводить виртуальные эксперименты без вмешательства в работу энергетического оборудования. В связи с этим разработка и реализация математической модели тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС любой мощности является научно обоснованным и практически значимым направлением, полностью соответствующим стратегическим задачам повышения энергетической эффективности и технологической устойчивости электроэнергетики Российской Федерации [1].

Объект исследования. Объектом исследования является главный корпус (котлотурбинный цех) Ивановской ТЭЦ-2 (ИвТЭЦ-2), предметом исследования – тепловоздушный режим, который однозначно определяет микроклимат в производственном помещении. Отметим, что под газообразной средой «воздух» понимают многокомпонентную смесь газов,

состоящую из азота (N_2), кислорода (O_2), водяного пара (H_2O), углекислого газа (CO_2) и водорода (H_2), которая приближенно моделирует реальный состав воздуха внутри помещения тепловой станции. Котлотурбинный цех ИвТЭЦ-2 представляет собой здание длиной 191 м, шириной 71 м и переменной высотой до 40 м, в котором установлено основное и вспомогательное энергетическое оборудование. Главный корпус состоит из двух основных отделений – котельного отделения (КО) и турбинного отделения (ТО). В котельном отделении установлены шесть котлоагрегатов ТП-170 и два котлоагрегата БКЗ-220. В турбинном отделении расположены пять турбоагрегатов – №1,2,4 марки ПТ-25-90/10М, №3 марки ПТР-65 и №5 марки ПТ-60-90/13. Между КО и ТО установлена разделительная стена с проемами для прохода персонала станции и обмена воздухом. По периметру отделений находятся окна и ворота, а в верхней части кровли – аэрационные фонари для естественной вытяжки/поступления воздуха. Указанные элементы конструкции главного корпуса станции имеют определяющее значение для организации воздухообмена в котельном и турбинном отделениях главного корпуса электрической станции.

Методы исследования. Математическая формулировка задачи. Математическое моделирование тепловоздушного режима в главном корпусе ТЭС основано на численном решении системы дифференциальных уравнений переноса импульса Навье–Стокса, переноса энергии текучей среды Фурье–Кирхгофа, переноса энергии излучением, переноса массы всех компонентов газовой смеси, составляющих воздушную среду производственного здания.

В математической модели тепловоздушного режима TVR-TES, используя аналогию переноса теплоты, массы и импульса [9], дифференциальное уравнение переноса субстанции (импульс, теплота и масса) запишем в векторной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \rho\vec{w} \cdot \nabla\Phi = \text{div}(\rho\Gamma_\Phi \cdot \nabla\Phi) + S_\Phi, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 ; Φ – параметр субстанции (скорость, температура, масса i -го компонента смеси); $\vec{w}$ – вектор скорости, м/с ; Γ_Φ – коэффициент переноса параметра субстанции Φ , $\text{м}^2/\text{с}$; S_Φ – источниковый член для параметра субстанции Φ .

Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена воздушной среды (1) дополняется уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{w}) = 0. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение переноса лучистой энергии (яркости излучения) при допущении, что показатель преломления

среды (воздуха) равен единице, а ограждающие поверхности помещения – диффузионные серые тела, записывают в виде [8, 9]

$$\frac{dl(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (k_{\text{погл}} + k_{\text{рас}}) I(\vec{r}, \vec{s}) = k_{\text{погл}} \frac{\sigma_0 T^4}{\pi} + \frac{k_{\text{рас}}}{4\pi} \int_0^{4\pi} dl(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega, \quad (3)$$

где I – яркость излучения в данной точке ($\vec{r}$) в данном направлении ($\vec{s}$), Вт/(м²·ср); $\vec{s}$ – единичный вектор в направлении рассеяния; $\vec{s}'$ – единичный вектор в направлении падающего излучения; $k_{\text{погл}}$ – коэффициент поглощения, м⁻¹; $k_{\text{рас}}$ – коэффициент рассеяния, м⁻¹; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T – локальная температура, К; Ω – телесный угол, ср.

Для получения единственного решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) необходимо определить (задать) условия однозначности (УО) для учета особенностей технологического процесса получения тепловой и электрической энергии на ИвТЭЦ-2, которые включают в себя параметры расчетной области (геометрию пространства и время процесса), физические свойства твердых тел и газов, теплоступления (теплостоки) в расчетную область и краевые условия (КУ), состоящие из начальных (НУ) и граничных (ГУ) условий [9].

Расчетная область для определения параметров тепловоздушного режима представляет из себя трехмерную геометрическую фигуру с указанием конструкции ограждений, установленного тепловыделяющего оборудования, включая технологические трубопроводы. В математической модели рассчитывается нестационарный процесс тепломассообмена и поэтому требуется задавать время процесса тепломассообмена в нестационарных (переходных) процессах. Компьютерный геометрический двойник котлотурбинного цеха ИвТЭЦ-2 был создан ранее [10].

Микроклимат внутри тепловой станции зависит от состава работающего оборудования и его нагрузки, конструкции ограждений главного корпуса и площади воздухопроницаемых элементов ограждения, температуры и влажности окружающей среды, которые изменяются в течение года. Однако вышеперечисленные факторы являются инерционными, и поэтому внутренний тепловоздушный режим ТЭС можно считать стационарным или квазистационарным. Для расчета стационарных тепловых и гидравлических режимов текучих сред эффективно используют метод установления, суть которого заключается в решении нестационарных дифференциальных уравнений тепломассообмена до получения стационарного тепловоздушного режима. При этом время является специфическим итерационным параметром [11]. В

связи с этим временная граница расчетной области жестко не задана, а определяется по окончании переходного (итерационного) процесса и характеризуется наступлением стационарного (квазистационарного) тепловоздушного режима в главном корпусе станции. Однако в этом случае пусть и формально все равно требуется задавать начальные условия для параметров микроклимата. В разработанной математической модели TVR-TES в качестве начальных условий были заданы температура и относительная влажность в расчетной области, равные температуре и относительной влажности окружающей среды, нулевые значения концентрации водорода и скорости воздушной среды (спокойная среда).

Следующим этапом реализации условий однозначности является задание физических свойств твердых и текучих тел, участвующих в тепло- и массообмене (плотности, удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности). Размеры и состав материалов ограждений ИвТЭЦ-2 были взяты из проектной документации станции.

Для воздушной среды дополнительно были заданы кинематический или динамический коэффициенты вязкости, критерий Прандтля и коэффициент диффузии компонентов газовой смеси. Для расчета радиационного теплообмена были заданы степени черноты твердых поверхностей, которые в рамках «серой» модели излучения равны поглощательным способностям твердых тел [12].

Воздушная среда, которая перемещается в помещении ТЭС, обладает еще одним свойством, которое не является физическим в том смысле, что оно не характеризует физические свойства воздуха, а зависит от режима движения (скорости перемещения) воздуха, и поэтому это свойство флюидов называют режимным свойством. Это свойство любой текучей среды под названием турбулентность в настоящее время находят при помощи полуэмпирических (основанных на результатах эксперимента) моделей турбулентности, которых, в зависимости от особенностей течения флюида, предложено в научной литературе несколько десятков [13]. Расчетами было установлено, что для моделирования уровня турбулентности воздушных потоков в объеме котлотурбинного цеха ИвТЭЦ-2 по критерию точности описания движения воздуха в большом объеме и в области пограничного слоя вблизи твердых поверхностей и длительности вычислений следует использовать модель турбулентности SST $k-\omega$ (k – кинетическая энергия турбулентности (КЭТ); ω – удельная скорость диссипации КЭТ), предложенную Ментером в 1994 году [13] и реализованную в ПБК ANSYS Fluent [8]. Удельная скорость диссипации КЭТ связана со скоростью диссипации КЭТ (ε) выражением

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k}, \quad (4)$$

где $C_\mu = 0,09$ – эмпирический коэффициент.

Модель SST $k-\omega$ является симбиозом двух известных и апробированных моделей турбулентности: $k-\varepsilon$ (k – кинетическая энергия турбулентности (КЭТ); ε – скорость диссипации КЭТ) и собственно модели турбулентности $k-\omega$. При этом модель турбулентности $k-\varepsilon$ хорошо справляется с расчетом турбулентного переноса субстанции в области течения вдали от стенки (за пределами пограничного слоя), а модель $k-\omega$ адекватно вычисляет коэффициенты переноса субстанции в пограничном слое. Для сопряжения моделей турбулентности $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ Ментер предложил специальную функцию согласования $F_{\varepsilon-\omega}$, вид которой описан в специальной литературе [13]. Параметры турбулентности k , ε и ω с заданными эмпирическими коэффициентами находят решением дифференциального уравнения переноса (1). Рассчитав k , ε и ω , находят динамический или кинематический коэффициенты турбулентной вязкости (коэффициенты переноса импульса) по формулам [8, 13]

$$\mu_t = \rho \nu_t = \rho \frac{k}{\omega} F_{\varepsilon-\omega}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) значение удельной скорости диссипации ω из (4), получим

$$\mu_t = \rho \nu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} F_{\varepsilon-\omega}, \quad (6)$$

где $F_{\varepsilon-\omega}$ – функция согласования $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности; μ_t и ν_t – динамический и кинематический коэффициенты турбулентной вязкости; ρ – плотность флюида (воздуха).

Зная коэффициент турбулентного переноса импульса $\Gamma_{pw} = \nu_t$, коэффициент турбулентного переноса тепловой энергии (энтальпии) Γ_h рассчитывают по формуле

$$\Gamma_h = \Gamma_{pw} / Pr_t, \quad (7)$$

где Pr_t – турбулентный критерий Прандтля, значение которого находят из опыта и задают в рамках принятой модели турбулентности (в ПБК ANSYS Fluent по умолчанию турбулентный критерий Прандтля принят равным $Pr_t = 0,85$ [8]).

Аналогично находят коэффициент турбулентного переноса (турбулентной диффузии) газов, составляющих воздух главного корпуса станции (N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , H_2):

$$\Gamma_D = \Gamma_{pw} / Sc_t, \quad (8)$$

где Sc_t – турбулентный критерий Шмидта, значение, которого находят из опыта и задают в рамках принятой модели турбулентности (в ПБК

ANSYS Fluent по умолчанию турбулентный критерий Шмидта принят равным $Sc_t = 0,7$ [8]).

Заметим, что при расчете относительной влажности воздуха (W , %) в среде ANSYS Fluent необходимо перед началом расчета преобразовать граничные условия для W , %, в относительную массовую концентрацию C_{H_2O} , кг/кг, а после выполнения вычислений сделать обратный перевод C_{H_2O} , кг/кг, в W , %, используя эмпирическую формулу Магнуса–Тетенса для расчета давления насыщения водяного пара в воздухе [8].

Внутренние источники/стоки теплоты в явном виде в производственном здании станции отсутствуют. Тепловыделение технологического оборудования учитывают заданием граничных условий теплообмена I рода на твердых поверхностях. При этом температура поверхности технологического оборудования была получена опытным путем [14], а для неработающих котлов и турбоагрегатов на их поверхности было задано граничное условие II рода – условие адиабаты (отсутствие теплообмена).

Тепловые потери через элементы ограждающих конструкций котлотурбинного цеха, включая светопрозрачные ограждения, были рассчитаны по формуле стационарной теплопередачи через плоскую стенку [9]:

$$q_{\text{пот}} = \frac{T_{w,\text{вн}} - T_{w,\text{нар}}}{\sum_i \delta_i / \lambda_i} = \alpha_{\text{ос}} (T_{w,\text{нар}} - T_{\text{ос}}) - q_{\text{солн}}, \quad (9)$$

где плотность радиационного результирующего теплового потока, поступающего от Солнца, равна

$$q_{\text{солн}} = q_{\text{полгл}} - q_{\text{соб}} = \varepsilon_w q_{sr} - \varepsilon_w \sigma_0 (T_{w,\text{нар}}^4 - T_{\text{ос}}^4); \quad (10)$$

$T_{w,\text{вн}}$ и $T_{w,\text{нар}}$ – температуры внутренней и наружной поверхностей ограждений; δ_i и λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности i -го слоя многослойного ограждения; $\alpha_{\text{ос}} = 23\text{--}25$ Вт/(м²·К) – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности стенки, который принимают в указанном интервале в соответствии с нормативными документами [15, 16]; $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей станцию среды; $q_{\text{полгл}}$ и $q_{\text{соб}}$ – плотность поглощенного и собственного лучистого теплового потока наружной поверхности ограждений; ε_w – степень черноты наружной поверхности ограждений; q_{sr} – плотность потока солнечной радиации, значение которой зависит от географических координат станции и времени года (находят по стандартной программе, входящей в библиотеку ПБК ANSYS Fluent).

Для расчета поля скорости и давления в объеме котлотурбинного цеха необходимо задать граничные условия либо для скорости воздушной среды, либо для давления. Средняя скорость воздуха в проемах (ворота в котельном и турбинном отделениях, двери, форточки, тепловые завесы) была определена экспериментально

[14] и, например, в воротах котельного и турбинного отделений в летний период, когда ворота открыты, лежит в интервале $w = 2\text{--}5$ м/с. В аэрационных фонарях и неплотностях остекления измерить скорость не представлялось возможным, поэтому при реализации математической модели было назначено граничное условие по давлению, которое в ПБК ANSYS Fluent выполняется автоматически путем итерационного согласования наружного и внутреннего давлений в производственном помещении. При этом воздух может как удаляться, так и поступать в производственное помещение главного корпуса станции. Конкретно для условий работы ИвТЭЦ-2 было учтено, что 18 % площади аэрационных фонарей в течение года остаются закрытыми.

Забор воздуха на горение газообразного топлива в летний период года, который осуществляется в верхней части котельного отделения на высоте примерно 26 метров в целях максимального использования физической теплоты окислителя, наиболее существенно влияет на тепловоздушный режим главного корпуса станции. Расчет массового расхода воздуха на всасе каждого работающего котла был выполнен по методике Г.В. Ледуховского [17]. При этом коэффициент избытка воздуха был принят по режимной карте (энергетической характеристике) каждого конкретного котла при его средней тепловой нагрузке [18].

Для параметров турбулентности КЭТ (k), скорости диссипации КЭТ (ε) и удельной скорости диссипации КЭТ (ω) на границах входа и выхода воздуха в котлотурбинный цех ТЭС, так же как и для других параметров воздушного потока, необходимо задать граничные значения. Для условий большого производственного помещения при свободном течении воздуха уровень турбулентности оценивают величиной $J = 5\text{--}8$ % от средней скорости потока ($\bar{w}$) и соотношением коэффициентов турбулентной (μ_t) и молекулярной (μ) вязкости в интервале $N_\mu = \mu_t / \mu = 8\text{--}12$. Тогда граничные значения $k|_{\text{гр}}$, $\omega|_{\text{гр}}$ и $\varepsilon|_{\text{гр}}$ при допущении изотропии турбулентности несложно вычислить по формулам:

$$k|_{\text{гр}} = \frac{3}{2}(\bar{w} \cdot J / 100)^2; \quad (11)$$

$$\omega|_{\text{гр}} = \rho \frac{k}{\mu_t} = \rho \frac{k}{\mu N_\mu}; \quad (12)$$

$$\varepsilon|_{\text{гр}} = \rho \frac{C_\mu k^2}{\mu_t} = \rho \frac{C_\mu k^2}{\mu N_\mu}. \quad (13)$$

Отметим, что формулы (11) и (12) получены из формул (5) и (6) для области течения за пределами пограничного слоя, в которой $F_{\varepsilon-\omega} = 1$.

Во время проведения пассивного натурного эксперимента [14] было выявлено превышение

концентрации летучих органических соединений из-за утечек водорода от генератора №3 во время его работы. В связи с этим в математическую модель TVR-TES был введен расчет изменения концентрации водорода в турбинном цехе путем решения дифференциального уравнения переноса (1). В качестве граничного условия была задана массовая доля водорода (H_2) на источнике (поверхности турбоагрегата), рассчитанная по величине суточной потери (утечке) водорода из системы охлаждения турбогенератора, определенной опытным путем. В математической модели учтено, что, согласно закону сохранения массы, сумма массовых долей всех компонентов газовой смеси равна единице:

$$\sum_{i=1}^N C_i = 1, \quad (14)$$

где C_i – массовая концентрация i -го компонента смеси; N – количество компонентов в смеси (в нашем случае с учетом утечек водорода $N = 5$).

Численная реализация математической модели. Современные программно-вычислительные комплексы позволяют решить систему уравнений, записанных в виде (1)–(3) с соответствующими условиями однозначности, численными методами на дискретной пространственно-временной сетке. Реализация математической модели TVR-TES выполнена методом конечных элементов (конечных объемов) в трехмерной постановке при помощи алгоритма, реализованного в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent [8]. На первом этапе численного решения системы дифференциальных уравнений, моделирующих любой физический процесс (в нашем случае процесс тепло-массообмена), необходимо трехмерную расчетную область непрерывного изменения параметров процесса по пространству заменить дискретными (конечными) элементами (объемами) и квантовать время процесса дискретными отрезками времени, т.е. построить пространственно-временную сетку. Заметим, что от качества разностной конечно-элементной сетки существенно зависит сама возможность получения численного решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) и его точность. Построение разностной сетки в объеме главного корпуса ИвТЭЦ-2, который имеет весьма сложную конфигурацию, выполнено в модуле ANSYS Meshing. В результате многовариантных расчетов для объекта моделирования была построена неравномерная трехмерная сетка со сгущением вблизи твердых поверхностей сложной геометрии и в зонах больших градиентов параметров воздушной среды. Разностная сетка, которая для условий объекта моделирования позволяет получить сходящееся решение, содержит более 6 млн конечных объемов (элементов) в основном в виде тетраэдров правильной и неправильной

формы, за исключением объемов, примыкающих к твердым поверхностям. При этом максимальный линейный размер расчетной ячейки составил 4 м, а минимальный – 0,05 м. Разработать более подробную сетку не позволила мощность рабочего компьютера с процессором Intel Core i7-2600 4 ядра, оперативной памятью 24,0 ГБ; видеоадаптером NVIDIA GeForce GTX 560 и 64-разрядной операционной системой. Изменяя количество и размер ячеек, удалось достичь ортогонального качества разностной сетки $OQ = 0,757$, что соответствует требованиям ПБК ANSYS Fluent, согласно которым ортогональное качество сетки должно стремиться к единице ($OQ \rightarrow 1$).

В расчетах был принят переменный шаг по времени. В начале расчета шаг по времени был принят 0,1 с, в области основного изменения параметров – 1 с, а в области, близкой к стационарному процессу, – 3 с.

При реализации математической модели в программно-вычислительном комплексе был принят переменный шаг по времени: в начальном периоде расчета – 0,1 с; в области основного изменения параметров – 1 с; в режиме, близком к стационарному процессу, – 3 с. Как уже было отмечено выше, время при расчете параметров стационарного или слабо изменяющегося во времени (квазистационарного) процесса играет роль итерационного параметра. При этом уменьшения безразмерной невязки (погрешности аппроксимации) дискретного аналога дифференциальных уравнений (1) и (2) добиваются методом итераций на каждом временном слое. Для улучшения сходимости итерационного процесса был использован метод нижней релаксации с коэффициентами релаксации, лежащими в интервале 0,3–1,0, для разных параметров процесса тепломассообмена в котельном и турбинном отделениях ТЭС. Для коррекции времени расчета тепловоздушного режима при помощи численной математической модели TVR-TES на каждом шаге по времени было жестко задано ограничение на максимально возможное число итераций, которое зависит от размера временного шага.

В качестве решателя при моделировании тепловоздушного режима объекта исследования из библиотеки ANSYS был выбран полунявный алгоритм SIMPLE, построенный по схеме смещения (метод Либмана или метод Гаусса-Зейделя), который последовательно уточняет поля скорости и давления до тех пор, пока они не станут согласованными в пределах относительной погрешности аппроксимации (невязки), равной по умолчанию 10^{-3} . Относительная невязка для решения уравнений неразрывности, переноса импульса, переноса параметров турбулентности, переноса компонентов воздушной смеси также принята равной 10^{-3} . Однако при решении уравнения конвективного и радиационного переноса энергии в ПБК ANSYS Fluent по умолчанию относительная погрешность аппроксимации

была принята на три порядка меньше и составила величину 10^{-6} .

Для решения дифференциального уравнения переноса лучистой энергии (3) в расчет была включена упрощенная форма модели дискретных ординат (ДО), которая в ПБК ANSYS Fluent носит имя «Модель радиации P1».

Физическое время расчета всех параметров тепловоздушного режима в главном корпусе ИвТЭЦ-2 при помощи разработанной численной модели TVR-TES в зависимости от набора исходных данных, которые существенно отличаются в разные периоды года, на компьютере с процессором Intel Core i7-2600 4 ядра составляет 24–36 часов. При этом расчет считался окончанным при условии, что температурное поле в течение 10 шагов по времени изменяется на величину менее 1 %. Итерационное «время» выхода на квазистационарный режим в зависимости от начальных и граничных условий в расчетах составляло от 1800 до 3600 секунд.

Результаты моделирования тепловоздушного режима ТЭС. На производственных площадках главного корпуса ТЭС присутствует обслуживающий персонал, для которого установлены различные категории труда в зависимости от тяжести и интенсивности работ [2, 3]. Оценка качества воздушной среды в главном корпусе ИвТЭЦ-2 выполнена сравнением показателей микроклимата, полученных экспериментальным и расчетным путем, с нормативными показателями [2, 3].

Наряду с основными параметрами микроклимата (температура и относительная влажность), качество микроклимата характеризуют дополнительные параметры, такие как концентрация летучих газов (углекислый газ, водород и другие) и концентрация твердых микрочастиц в воздушной среде. Математическое моделирование изменения массовой концентрации микрочастиц в воздушной среде котлотурбинного цеха ИвТЭЦ-2 не выполнялось, потому что экспериментальное обследование состава воздуха показало незначительные значения показателя $PM_{2.5}$, $мкг/м^3$, в воздухе станции, которые не превышали 10 % от предельно допустимых значений.

Адекватность разработанной численной математической модели была проверена путем сравнения результатов расчета, который проводился в течение трех лет с апреля 2023 года по апрель 2026 года, с данными экспериментального исследования микроклимата в главном корпусе Ивановской ТЭЦ-2 [14]. Для оценки результатов моделирования были использованы значения температуры, относительной влажности, концентрации углекислого газа и водорода в 30 контрольных точках на четырех отметках по высоте цеха: отметки 0.00 м, 8.00 м, 25.00 м в котельном отделении и 0.00 м, 8.00 м, 16.00 м в турбинном отделении. При проведении эксперимента 15.07.2023 (лето) работал один котел №7, который забирал 48 кг/с воздуха из

помещения котельного отделения. Зимой 13.01.2024 забор воздуха на горение в котельных агрегатах осуществляют из окружающей станцию воздушной среды.

На рис. 1 и 2 представлены расчетные и экспериментальные значения температуры и относительной влажности воздуха в холодный и теплый периоды года около котлоагрегата №6, а на рис. 3 и 4 – около турбоагрегата №3.

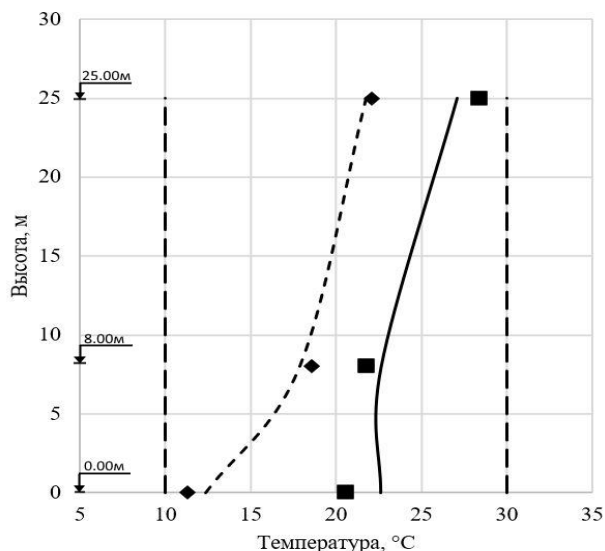


Рис. 1. Изменение температуры воздуха по высоте котельного отделения около котлоагрегата №6: ■ – опыт (15.07.2023); ◆ – опыт (13.01.2024); — – расчет (15.07.2023); - - - – расчет (13.01.2024); вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений температуры

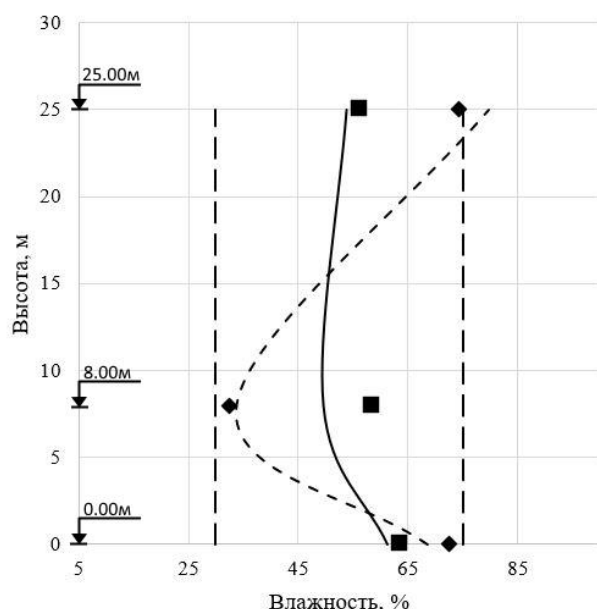


Рис. 2. Изменение относительной влажности воздуха по высоте котельного отделения около котлоагрегата №6: ■ – опыт (15.07.2023); ◆ – опыт (13.01.2024); — – расчет (15.07.2023); - - - – расчет (13.01.2024); вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений влажности

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры и относительной влажности по высоте котлотурбинного цеха в зимний и летний периоды работы позволяет сделать однозначный вывод об удовлетворительном моделировании параметров тепловоздушного режима в главном корпусе ИвТЭЦ-2 с применением разработанной математической модели TVR-TES в среде ANSYS Fluent, что свидетельствует о ее достоверности (адекватности) и возможности применения для выполнения инженерных расчетов тепловоздушного режима в производственном помещении ТЭС.

Проверка адекватности математической модели показала, что расхождение между результатами численного моделирования и экспериментальными данными в контрольных точках не превышает 12 %, что подтверждает корректность принятых допущений и правильность задания условий однозначности. Отметим, что аналогичные результаты были получены при сравнении данных расчета и пассивного эксперимента для всей серии опытов, выполненных в период весна 2023 года – весна 2026 года.

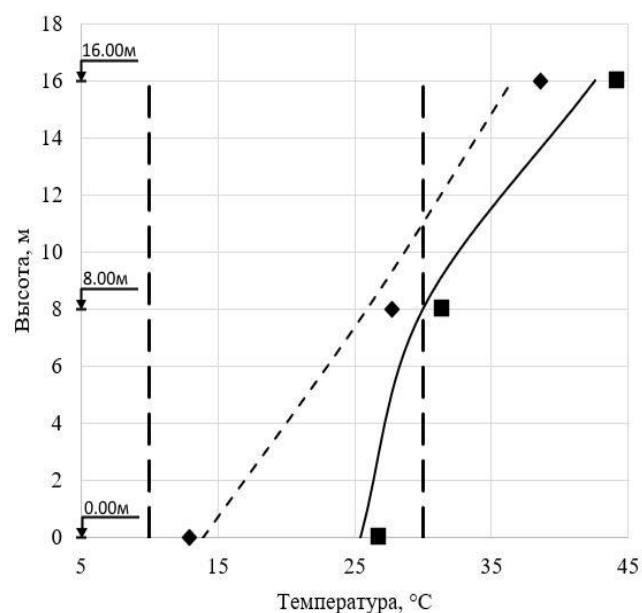


Рис. 3. Изменение температуры воздуха по высоте турбинного отделения около турбоагрегата №3: ■ – опыт (15.07.2023); ◆ – опыт (13.01.2024); — – расчет (15.07.2023); - - - – расчет (13.01.2024); вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений температуры

Наибольшее влияние на величину погрешности моделирования оказало отсутствие возможности учета влияния на микроклимат ряда локальных факторов, таких как утечки пара через трубопроводы, тепловые потери от трубопроводов малых диаметров, локальное разрушение тепловой изоляции, неплотности остекления.

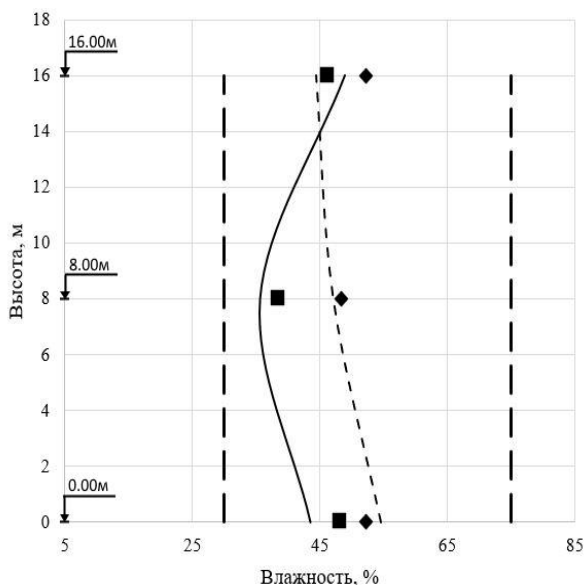


Рис. 4. Изменение относительной влажности воздуха по высоте турбинного отделения около турбоагрегата №3: ■ – опыт (15.07.2023); ◆ – опыт (13.01.2024); — – расчет (15.07.2023); - - - - расчет (13.01.2024); вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений влажности

Рис. 5 иллюстрирует изменение концентрации углекислого газа по высоте турбинного цеха. Как и в расчете вышеперечисленных параметров микроклимата (температура и относительная влажность), наблюдается удовлетворительное совпадение данных эксперимента и результатов математического моделирования. Анализ результатов измерения концентрации углекислого газа (CO_2) за трехлетний период наблюдений показал, что содержание CO_2 в котельном отделении (КО) не превышало установленные нормы для постоянного времени пребывания персонала (900 мг/м^3 [2, 3]) и изменялось в диапазоне от 217 до 687 мг/м^3 с краткосрочным всплеском до 824 мг/м^3 в верхней части КО в районе отметки 25.00 м. Концентрация CO_2 в турбинном отделении (ТО) также соответствовала допустимым нормам и находилась в диапазоне от 186 до 593 мг/м^3 .

Опытные данные, полученные 13 января 2024 г., и результаты расчета концентрации водорода на математической модели TVR-TES при работе турбогенератора №3 демонстрирует рис. 6. Сравнение опытных и расчетных значений концентрации водорода показывает, что расчет содержания летучих газов при турбулентной диффузии в объеме производственного здания ТЭС выполняется корректно в пределах инженерной погрешности. При этом отметим, что на отметке 8.00 м концентрация водорода составила более 7 мг/м^3 , что значительно (на 40 %) превышает максимально допустимое значение концентрации водорода, равное $5,000 \text{ мг/м}^3$ [2, 3]. Особо отметим, что замеченные при экспериментальном исследовании микроклимата в помещении

ИВТЭЦ-2 утечки водорода из системы охлаждения турбоагрегата №3 были ликвидированы за счет ремонта уплотнения генератора турбины. В математической модели TVR-TES результаты ремонта были учтены заданием нулевых граничных условий по источнику водорода на поверхности корпуса турбоагрегата №3.

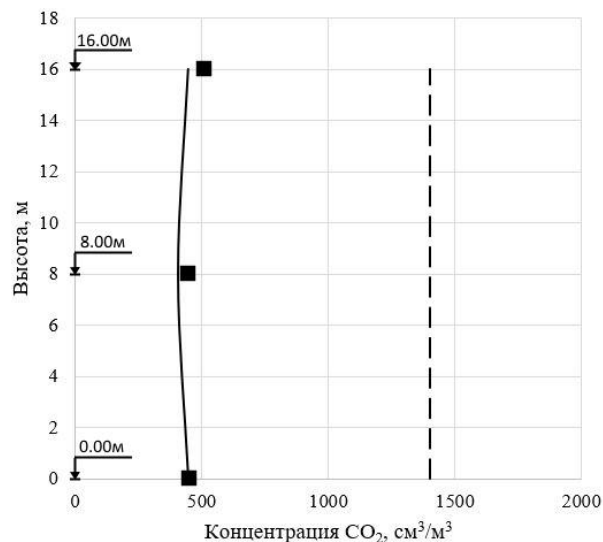


Рис. 5. Изменение концентрации углекислого газа по высоте котлотурбинного цеха около турбоагрегата №3 (13.01.2024): ■ – опыт CO_2 ; - - - - расчет CO_2 ; вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений концентрации CO_2

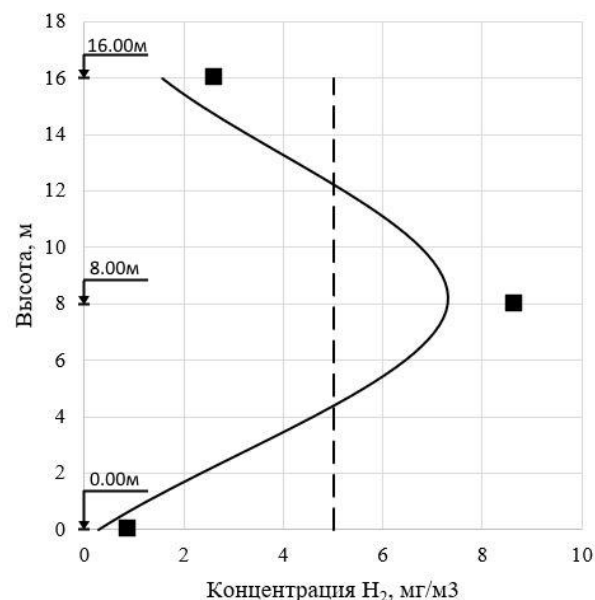


Рис. 6. Изменение концентрации водорода по высоте котлотурбинного цеха около турбоагрегата №3 (13.01.2024): ■ – опыт H_2 ; — – расчет H_2 ; вертикальные штриховые линии – граница допустимых значений концентрации H_2

Средняя скорость воздуха, рассчитанная на математической модели TVR-TES в летний

период работы тепловой станции, а также направления воздушных потоков в котельном отделении показаны на рис. 7. Средняя скорость воздушной среды в объеме котельного отделения (на расстоянии 7–10 м от поверхности котла) составляет примерно 0,4–0,6 м/с, около шахты для забора воздуха на горение – 1,2–1,5 м/с, а средняя скорость подсоса воздуха через отверстие аэрационного фонаря равна ≈ 4 м/с.

Отметим, что в летний период года приток воздуха в котельное отделение осуществляется преимущественно через аэрационные фонари (рис. 7), поскольку воздуха, поступающего в котельное отделение из турбинного отделения, явно не хватает для сжигания топлива. При этом расчетная скорость воздуха в проемах между турбинным и котельным отделениями достигает 17 м/с. Возникающий дефицит воздуха в турбинном отделении также компенсируется притоками через аэрационные фонари.

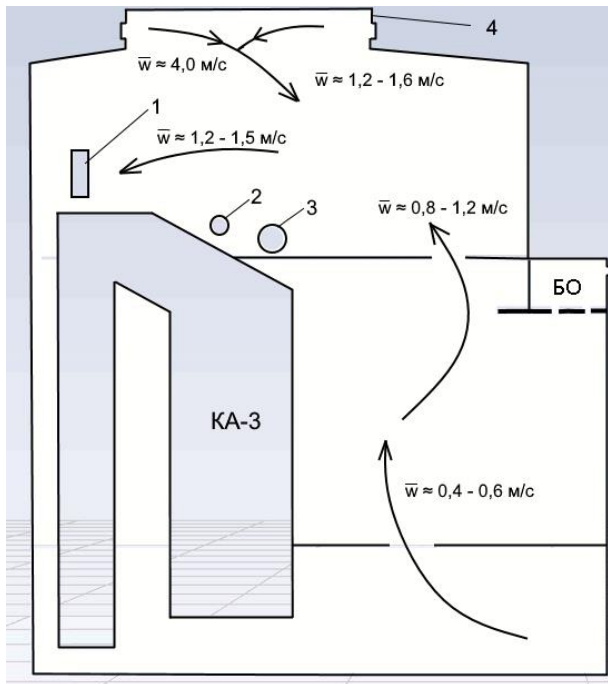


Рис. 7. Скорость движения воздуха около котлоагрегата №3 при заборе воздуха из котельного отделения: 1 – забор воздуха на горение; 2 – второй барабан котлоагрегата; 3 – первый барабан котлоагрегата; 4 – аэрационный фонарь; КА-3 – котлоагрегат №3; БО – бункерное отделение

Выводы. Разработанная трехмерная численная математическая модель стационарного тепловоздушного режима TVR-TES главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2, реализованная в программно-вычислительном комплексе ANSYS Fluent, учитывает все основные процессы тепло-массообмена в производственном помещении тепловой электрической станции: конвективный

турбулентный перенос импульса и энергии воздуха; турбулентный диффузионный перенос компонентов воздушной массы; перенос лучистой энергии в объеме главного корпуса; радиационный теплообмен твердых поверхностей технологического оборудования и внутренних ограждений производственного помещения. Условия однозначности для решения поставленной задачи учитывают приток и удаление воздуха через проемы в ограждениях, тепловые потери ограждениями здания в окружающую среду, забор воздуха на процесс горения, а также состав воздушной среды. Разработанная математическая модель TVR-TES позволяет рассчитать пространственные распределения температуры, относительной влажности, подвижности воздуха (поле скорости) и концентрации составляющих воздушную среду газов в объеме главного корпуса станции при любых режимах работы оборудования и для всех климатических условий в зоне расположения ТЭС.

Выполненная верификация разработанной математической модели TVR-TES путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных параметров микроклимата в 30 контрольных точках на четырех высотных отметках объекта в главном корпусе ИвТЭЦ-2 в теплый и холодный периоды года, показала расхождение между результатами численного моделирования (температуры, относительной влажности, концентрации летучих газов) и натурного эксперимента, не превышающее 12 %, что подтверждает корректность принятых допущений при постановке задачи и определении условий однозначности и хорошее качество численного моделирования.

На основе вариантных расчетов при помощи численной математической модели TVR-TES можно прогнозировать качество микроклимата в главном корпусе ТЭС в целях обеспечения нормативных условий труда персонала при изменении параметров работы основного и вспомогательного оборудования, а также условий окружающей среды.

Численная математическая модель TVR-TES – цифровой двойник тепловоздушного режима ТЭС – может быть использована как инструмент для разработки энергосберегающих мероприятий, направленных на повышение эффективности использования тепловой энергии, что позволит сократить затраты на собственные нужды тепловой электрической станции.

Список литературы

1. **Об энергосбережении** и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 31.07.2025) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – Ст. 5711.

2. **СанПиН 1.2.3685-21** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021. – 452 с.

3. **ГОСТ 12.1.005-88** Межгосударственный стандарт. Система безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М., 1988. – 78 с.

4. **Энергетическая стратегия** Российской Федерации на период до 2050 года [Электронный ресурс]. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р. – М., 2025. – URL: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения 25.04.2026).

5. **Буров В.Д., Дорохов В.Е., Елизаров Д.П.** Тепловые электрические станции: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 466 с.

6. **Энергосбережение** в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2021. – 504 с.

7. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

8. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Release 2020 R1 [Электронный ресурс]. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2020. – URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата обращения: 21.04.2026).

9. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен: учебник в 2 т. Т. II / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2025. – 720 с.

10. **Геометрическая модель** главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 в ПБК Ansys / В.В. Бухмиров, Е.Н. Бушуев, И.И. Светушков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 4. – С. 15–21.

11. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика: пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

12. **Бухмиров В.В., Ракутина Д.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 120 с.

13. **Снегирев А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.

14. **Экспериментальное** исследования микроклимата на ТЭЦ / В.В. Бухмиров, И.И. Светушков, Е.Н. Бушуев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 6. – С. 13–22.

15. **СП 50.13330.2012** Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23.02.2023 [Электронный ресурс]. – М.: Минрегион России, 2012. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293799/4293799306.pdf> (дата обращения: 18.04.2026).

16. **ISO 6946:2017** Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – URL: <https://www.iso.org/standard/65708.html> (дата обращения: 22.04.2026).

17. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Энергетические характеристики оборудования ТЭС: учеб. пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 232 с.

18. **РД 34.08.552-95** Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного

общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. Утв. Минтопэнерго России 24.11.1995; ввод. в действие с 01.02.1996; ред. от 15.05.1998 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008390> (дата обращения: 21.04.2026).

References

1. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 23.11.2009 № 261-FZ (red. ot 31.07.2025) [On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law No. 261-FZ of November 23, 2009, as amended on July 31, 2025]. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii* [Legislation Bulletin of the Russian Federation], 2009, no. 48, art. 5711.

2. *SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring safety and/or harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, 2021. 452 p.

3. *GOST 12.1.005-88 Mezhdgosudarstvennyy standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochey zony* [Occupational safety standards system. General sanitary and hygienic requirements for workplace air]. Moscow, 1988. 78 p.

4. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2050 goda. Utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 12 aprelya 2025 g. № 908-r* [Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2050. Approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 908-r of April 12, 2025]. Moscow, 2025. Available at: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (accessed April 25, 2025).

5. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Elizarov, D.P. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009. 466 p.

6. Garyaev, A.B., Yakovlev, I.V., Klimenko, A.V., Danilov, O.L., Ochkov, V.F. *Energosberezhenie v teploten-ergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in heat power engineering and heat technologies]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2021. 504 p.

7. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow: Editorial URSS, 2003. 784 p.

8. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2020 R1. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2020. Available at: <https://ansyshelp.ansys.com> (accessed April 21, 2026).

9. Bukhmirov, V.V. *Teplomassoobmen v 2 t. T. II* [Heat and mass transfer in 2 vols., vol. II]. Ivanovo, 2025. 720 p.

10. Bukhmirov, V.V., Bushuev, E.N., Svetushkov, I.I., Temlyantseva, E.N., Dolinin, D.A. *Geometricheskaya model' glavnogo korpusa Ivanovskoy TETs-2 v PVK Ansys* [Geometric model of the main building of Ivanovo CHPP-2 in Ansys software]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 4, pp. 15–21.

11. Rouch, P.J. *Vychislitel'naya gidrodinamika* [Computational fluid dynamics]. Moscow: Mir, 1980. 616 p.

12. Bukhmirov, V.V., Rakutina, D.V. *Spravochnye materialy dlya resheniya zadach po kursu*

«*Teplomassoobmen*» [Reference materials for solving problems in the course “Heat and Mass Transfer”]. Ivanovo, 2017. 120 p.

13. Snegirev, A.Y. *Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovaniye turbulentnykh techeniy* [High-performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta, 2009. 143 p.

14. Bukhmirov, V.V., Svetushkov, I.I., Bushuev, E.N., Temlyantseva, E.N., Rodionova, M.V. Eksperimental'noe issledovanie mikroklimata na TETs [Experimental study of microclimate at thermal power plant]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 6, pp. 13–22. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.013-022.

15. SP 50.13330.2012 *Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-02-2003* [Thermal protection of buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003]. Moscow: Minregion Rossii, 2012. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293799/4293799306.pdf> (accessed April 18, 2026).

16. ISO 6946:2017 Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. Available at: <https://www.iso.org/standard/65708.html> (accessed April 2, 2026).

17. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of thermal power plant equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.

18. RD 34.08.552-95 *Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu otcheta elektrostantsii i aktsionernogo obshchestva energetiki i elektrifikatsii o teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya* [Guidelines for preparing a report of a power plant and a joint-stock energy and electrification company on equipment thermal efficiency]. Moscow: SPO ORGRES, 1995. Effective from February 1, 1996; amended May 15, 1998. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200008390> (accessed April 21, 2026).