

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ГЛАВНОГО КОРПУСА ТЭС НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В. БУХМИРОВ, д-р техн. наук, Д.В. РАКУТИНА, канд. техн. наук, А.Ю. ГИЛЬМУТДИНОВ, асп.

Разработана математическая модель тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт. Приведено описание результатов вычислительного эксперимента. Предложены рекомендации по совершенствованию системы тепловоздушоснабжения главного корпуса Костромской ГРЭС.

*Ключевые слова:* температурное поле, система дифференциальных уравнений, математическая модель, уровень инфильтрации, повышение энергоэффективности.

## IMPROVING HEAT AND AIR SUPPLY SYSTEM OF MAIN BUILDING AT STEAM POWER STATION ON BASIS OF MATHEMATIC SIMULATION

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, D.V. RAKUTINA, Candidate of Engineering, A.Yu. GILMUTDINOV, Post Graduate Student

The mathematical model of heat and air mode in the main building at Kostroma DPS with 300 MW power units is developed. The authors present the description of numerical experiment results. Recommendations for improving the heat and air supply system of the main building at Kostroma DPS are offered.

*Key words:* temperature field, differential equation system, mathematical model, infiltration level, increasing the energy efficiency.

Система тепловоздушоснабжения главного корпуса ТЭС представляет собой комплексный процесс аэродинамики воздушных потоков и теплообмена между тепловыделяющим оборудованием, приборами системы теплоснабжения, воздушной средой и внутренними ограждениями здания. Температурное поле внутри главного корпуса также зависит от температуры окружающей среды и от количества воздуха, забираемого из помещения на технологический процесс.

Математическое моделирование тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС основано на решении системы дифференциальных уравнений движения (Навье-Стокса) и сохранения энергии текучей среды (Фурье-Кирхгофа). Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена воздушной среды дополняется уравнением неразрывности.

Дифференциальное уравнение переноса субстанции имеет вид

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

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{W}$  – вектор скорости, м/с;  $\Gamma_{\Phi}$  – коэффициент переноса переменной  $\Phi$ ;  $S_{\Phi}$  – источник член для переменной  $\Phi$ .

Решение системы уравнений (1) с соответствующими условиями однозначности может быть выполнено на основе численных методов при помощи современных САЕ-систем (computer-aided engineering), к которым относятся такие программные продукты как Ansys, FlowVision, Star-CD, Fluent, Flow3D, Phoenix и др. Ниже предложена математическая модель тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт. Математическое моделирование выполнено в среде Phoenix.

Модель главного корпуса состоит из турбогенераторного, деаэрационного и парогенераторного отделений (рис. 1). Разделительная стенка между турбинным и парогенераторным отделениями отсутствует, однако система трубопроводов препятствует прямому перетoku воздуха в парогенераторное отделение. Для учета этого в математической модели между турбинным и парогенераторным отделениями установлены две

виртуальные перегородки с условной проницаемостью 60 и 40 % соответственно.

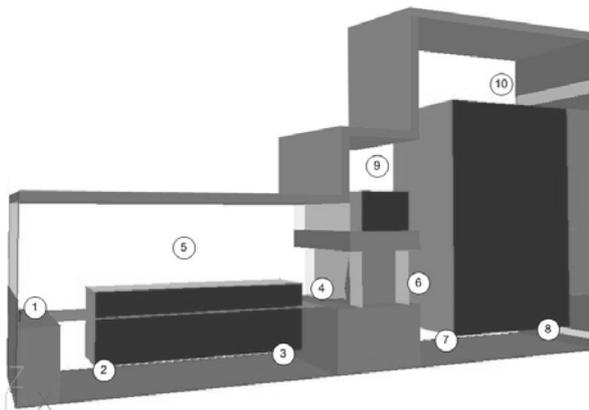


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель главного корпуса в ПК Phoenix (1–10 – точки измерения температуры)

Математическая модель разработана для условий холодного времени года. Приток воздуха в помещение осуществляется через calorifеры, встроенные в стены парогенераторного отделения и работающие «на просос», а также за счет инфильтрации через фрамуги световых проемов турбинного отделения. Удаление воздуха из помещения главного корпуса производится через воздухозаборные отверстия дутьевых вентиляторов.

Тепловыделения от оборудования и коэффициенты теплопередачи для наружных ограждений здания были заданы по проекту. Тепловую нагрузку приборов системы теплоснабжения главного корпуса принимали в соответствии с температурным графиком, утвержденным на станции. Расход воздуха, поступающего в главный корпус через calorifеры парогенераторного отделения, задавали по данным измерений [1].

Размеры расчетной области: длина – 93 м, ширина – 21 м, высота – 55 м. Решение находили на адаптивной сетке с ее сгущением в местах наибольших градиентов температур. Количество узлов разностной сет-

ки составило 90593. Для решения была применена LVEL-модель турбулентности, которая является разновидностью модели пути смешения Прандтля и предназначена для расчета течения жидкости в пространстве, загроможденном различными препятствиями [2].

Достоверность результатов расчета на математической модели проверена путем сопоставления с данными экспериментального исследования микроклимата в главном корпусе Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт [1]. Для сравнения использованы средние значения температуры, измеренные в разных точках главного корпуса. Сопоставление результатов вычислительного эксперимента и опытных данных показало, что максимальная относительная погрешность расчета температуры не превышает 10 % (рис. 2).

Результаты расчетов на математической модели представлены в виде регрессионной зависимости температуры воздуха внутри помещения  $T_{вн}$  от количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения  $G_{дв}^{пом}$ , нагрузки системы теплоснабжения  $Q_{мс}$  и температуры наружного воздуха  $T_{не}$ . Уравнения регрессии получены методом полного факторного эксперимента для десяти точек, которые характеризуют температуру в каждом условно выделен-

ном объеме помещения. Расположение точек внутри главного корпуса показано на рис. 1.

Расчетное исследование показало, что минимальная температура воздуха наблюдается в точке 1, что объясняется высокой инфильтрацией через оконные проемы турбинного отделения (рис. 3). Максимальная температура воздуха наблюдается перед воздухозаборными отверстиями дутьевых вентиляторов в точке 10. Наибольшее влияние нагрузка приборов системы теплоснабжения оказывает на температуру в турбинном отделении: при изменении  $Q_{мс}$  от 100 до 50 % температура в точках 1÷5 (турбинное отделение) уменьшается на  $\sim 3\div 4$  °С, а в точках 6÷10 (котельное отделение) меняется незначительно ( $\sim 1$  °С).

В холодный период года фрамуги оконных проемов турбогенераторного отделения закрыты, и поэтому воздух поступает за счет инфильтрации, которая зависит от проницаемости  $\bar{f}$ . Проницаемость оконных проемов, или удельная негерметичность  $\bar{f}$ , равна отношению суммарной площади неплотностей оконных проемов к суммарной площади поверхности.

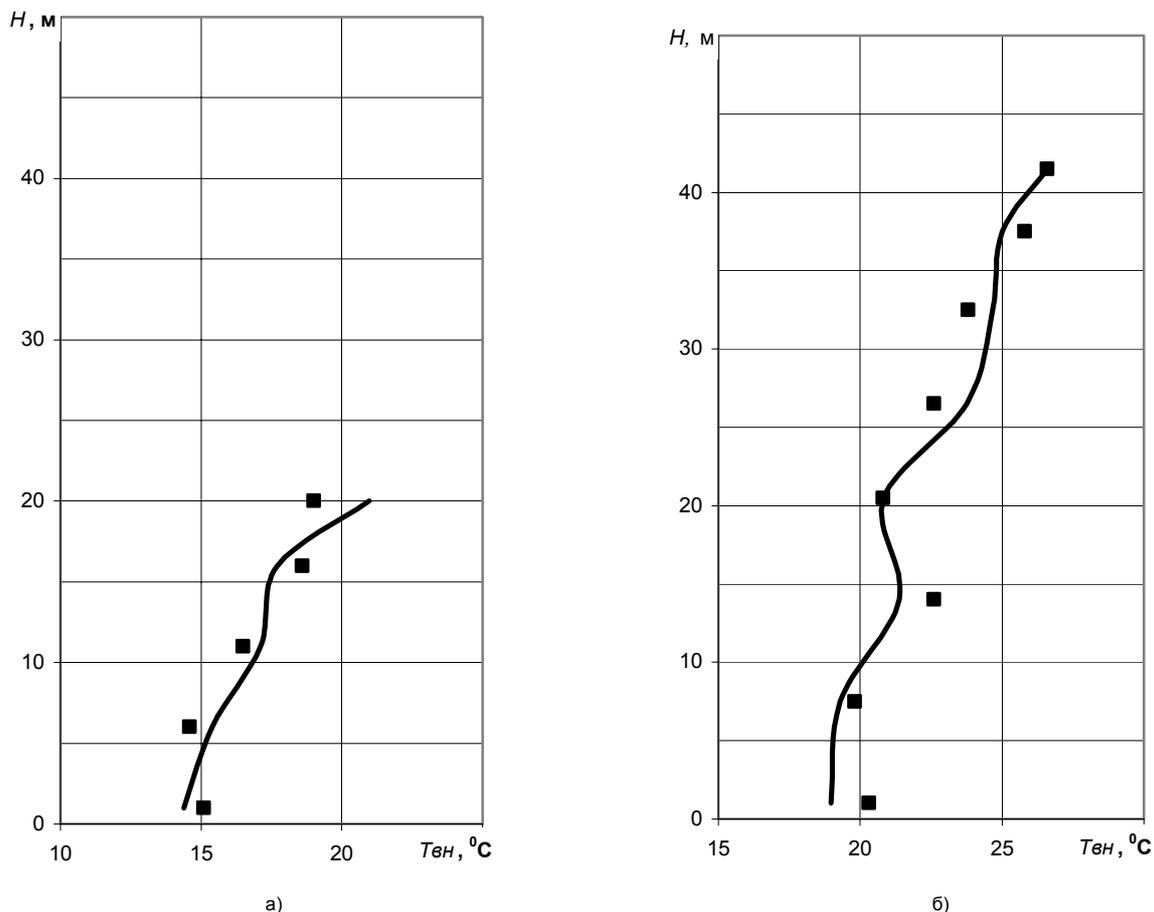
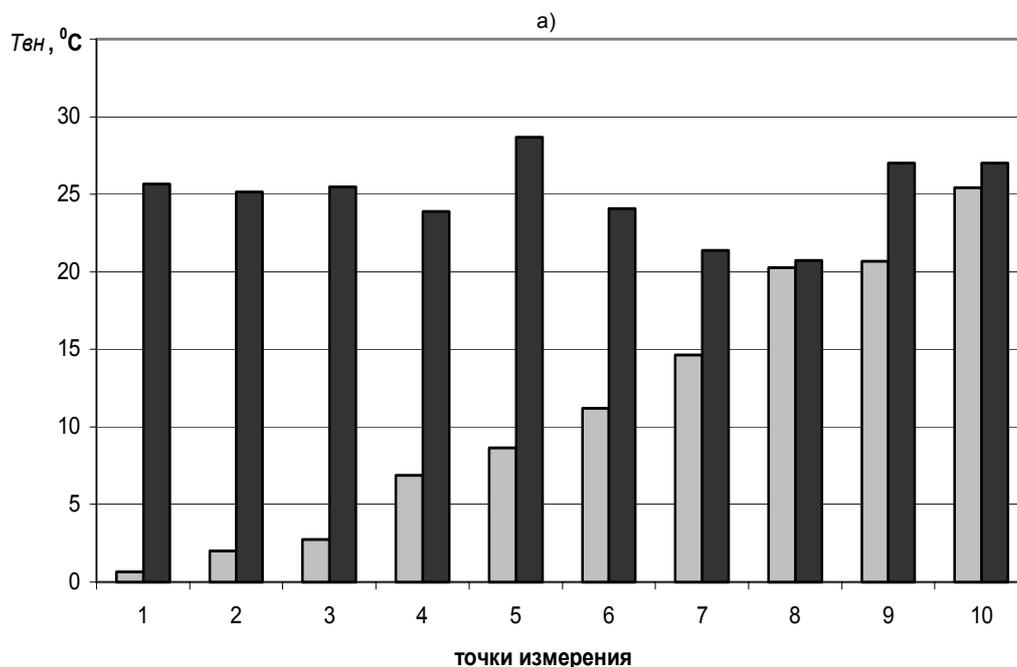
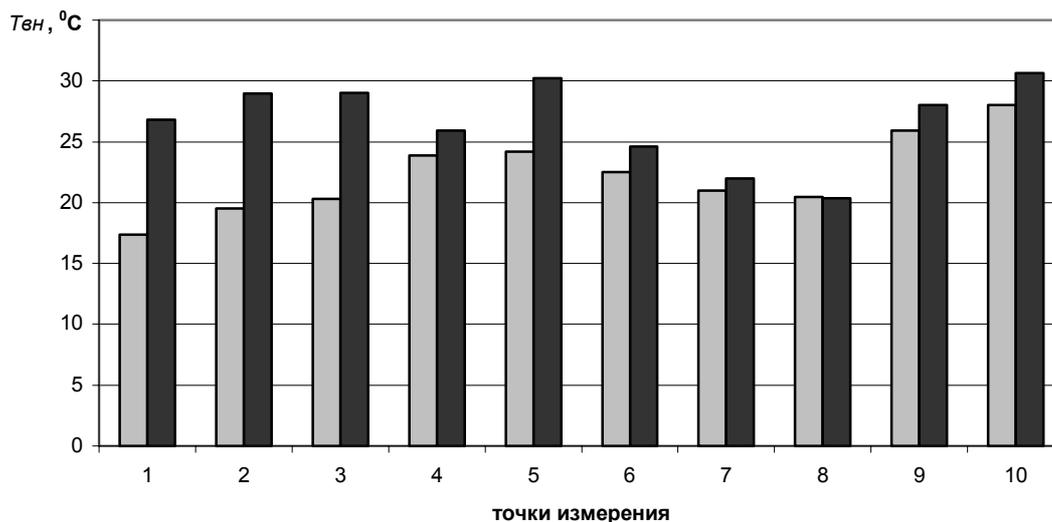


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения температуры при  $T_{не} = -16$  °С: а – турбинное отделение; б – парогенераторное отделение; ■ – экспериментальные данные; — — результаты расчета



б)

Рис. 3. Температура воздуха внутри главного корпуса ( $T_{вн}$ ) при разной проницаемости оконных проемов турбинного отделения ( $\bar{f}$ ) ( $G_{дв}^{ном} = 100\%$ , работают 4 блока из 8): а –  $T_{нв} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б –  $T_{нв} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; □ –  $f = 6,65\%$ ; ■ –  $f = 3\%$

Адекватность математической модели тепло-воздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС подтверждается при  $\bar{f} = 6,65\%$ , что соответствует уровню инфильтрации  $\sim 57\%$  при номинальной нагрузке блоков. Экспериментальное исследование показало, что инфильтрация в главном корпусе составляет 40–70 % от общего воздухообмена. Таким образом, значение инфильтрации, полученное при расчете на математической модели, полностью совпадает с результатами эксперимента.

На рис. 3 показано изменение температуры в главном корпусе при уменьшении проницаемости оконных проемов турбинного отделения с 6,65 до 3 %. Анализ диаграмм показывает, что при умень-

шении проницаемости до 3 % увеличение температуры воздуха в турбинном отделении составляет от 2 до 10 °C, а в котельном отделении – от 0 до 3 °C при температуре наружного воздуха  $T_{нв} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При  $T_{нв} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура в турбинном отделении повышается на 17–25 °C, а в котельном отделении на 1–13 °C. Таким образом, для обеспечения допустимой температуры внутри главного корпуса тепловая нагрузка приборов системы теплоснабжения может быть значительно уменьшена за счет уменьшения инфильтрации.

На рис. 4 представлена зависимость  $G_{дв}^{ном} = f(T_{вн}, Q_{мс})$  при двух значениях проницаемости оконных проемов турбинного отделения  $\bar{f}$ .

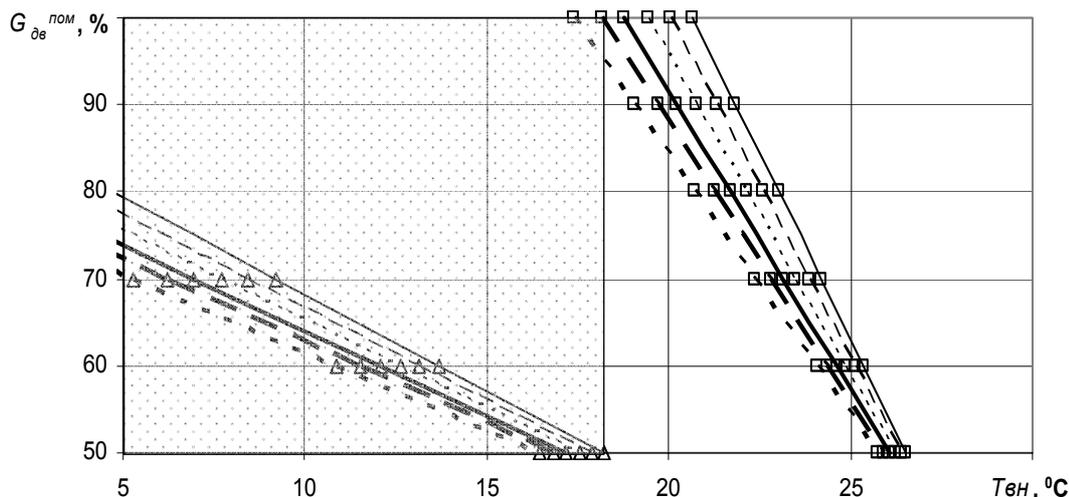


Рис. 4. Зависимость  $G_{дв}^{пом} = f(T_{вн}, Q_{тс})$  при  $T_{нв} = -30^{\circ}C$  и проницаемости оконных проемов турбинного отделения 6,65 % и 3 %:  
 —  $Q_{тс} = 100\%$ ; - - -  $Q_{тс} = 90\%$ ; - · - ·  $Q_{тс} = 80\%$ ; — · —  $Q_{тс} = 70\%$ ; — · —  $Q_{тс} = 60\%$ ; - - -  $Q_{тс} = 50\%$ ;  
 $\square - \bar{f} = 3\%$ ,  $\Delta - \bar{f} = 6,65\%$

Анализ графика показывает, что при  $T_{нв} = -30^{\circ}C$  и  $\bar{f} = 6,65\%$  количество дутьевого воздуха, которое можно забирать из помещения главного корпуса, не должно превышать 50 % при соблюдении требуемой СанПиН [3] температуры воздуха в рабочих зонах котельного, турбинного и деаэрационного отделений. Любое увеличение  $G_{дв}^{пом}$  приведет к понижению температуры в рабочих зонах ниже допустимого значения  $T_{вн} = 18^{\circ}C$  (заштрихованная область). Уменьшение проницаемости оконных проемов до 3 % позволит увеличить забор воздуха из помещения главного корпуса до 100 %, а также уменьшить нагрузку приборов системы теплоснабжения на 40 %.

### Заключение

Разработанная математическая модель тепло-воздушного режима главного корпуса ТЭС с блоками 300 МВт позволила реализовать принципиально новый подход к повышению энергоэффективности производственного помещения с тепловыделениями, основан-

ный на математическом моделировании при помощи современных САЕ-систем.

В результате проведенного исследования различных режимов функционирования системы тепло-воздухообмена главного корпуса ТЭС выявлен значительный резерв (до 40 %) уменьшения тепловой нагрузки приборов системы теплоснабжения главного корпуса за счет уплотнения оконных проемов турбинного отделения при соблюдении требуемых СанПиН температур в рабочих зонах.

### Список литературы

1. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Гильмутдинов А.Ю. Экспериментальное исследование системы аэрации главного корпуса Костромской ГРЭС // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 1. – С. 14–18.
2. Polis info system. – London: CHAM Ltd, 2004.
3. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

Бухмиров Вячеслав Викторович,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники,  
 телефон (4932) 26-97-78,  
 e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Ракутина Дарья Валерьевна,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники,  
 телефон (4932) 26-97-76.

Гильмутдинов Алексей Юрьевич,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 аспирант кафедры теоретических основ теплотехники,  
 e-mail: awr@dsn.ru