

ГИЛЬМУТДИНОВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ  
ТЕПЛОВОЗДУХООБМЕНА ГЛАВНОГО КОРПУСА ТЭС  
С ЦЕЛЬЮ СБЕРЕЖЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

Специальность 05.14.04. – Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Иваново 2011

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Бухмиров Вячеслав Викторович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Султангузин Ильдар Айдарович

кандидат технических наук, доцент  
Горбунов Владимир Александрович

**Ведущая организация:** ОАО «Зарубежэнергопроект», г. Иваново

Защита состоится «30» июня 2011 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 в ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, аудитория Б-237.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ.  
Тел. (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01.  
E-mail: uch\_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ. Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан «30» мая 2011 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.064.01,  
доктор технических наук,  
профессор



А.В. Мошкарин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Вопросы энергосбережения приобретают особую актуальность в современных условиях. Одним из способов повышения энергоэффективности на тепловых электростанциях (ТЭС) является совершенствование режима эксплуатации системы тепловоздухообмена главного корпуса. Неправильная организация систем вентиляции и теплоснабжения главного корпуса приводит к увеличению затрат на собственные нужды и к отклонению параметров воздушной среды внутри помещения от нормативных значений.

Формирование тепловоздушного режима в главном корпусе ТЭС представляет собой комплексный процесс, на который оказывают влияние аэродинамика воздушных потоков и теплообмен между тепловыделяющим оборудованием, приборами системы теплоснабжения, воздушной средой и внутренними ограждениями производственного корпуса. Также в условиях неритмичной работы технологического оборудования и неполной его загрузки сильное влияние на температурное поле главного корпуса тепловой станции оказывает разрежение, создаваемое дутьевыми вентиляторами.

Таким образом, в настоящее время актуальной является задача совершенствования системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС в зависимости от температуры окружающей среды, от числа работающих энергоблоков и их нагрузки, а также от количества воздуха, забираемого из помещения на технологические нужды. При этом повышение энергетической эффективности ТЭС возможно за счёт выбора рационального режима работы энергетического калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем и приборов системы теплоснабжения главного корпуса с учётом требований, предъявляемых к микроклимату производственных помещений.

**Объект исследования.** Система тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС.

**Предмет исследования.** Процессы тепловоздухообмена в свободном объёме главного корпуса ТЭС.

**Целью работы** является повышение энергетической эффективности ТЭС путем исследования и совершенствования системы тепловоздухообмена главного корпуса станции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ методов исследования системы тепловоздухообмена производственного помещения с избыточными тепловыделениями.

2. Выполнить экспериментальное исследование тепловоздушного режима главного корпуса блочной ТЭС.

3. Разработать методику балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС, позволяющую определять количество дутьевого воздуха, которое можно забирать из помещения в зависимости от числа работающих блоков, их нагрузки и температуры окружающей среды при соблюдении санитарных норм в рабочих зонах.

---

При выполнении диссертации оказаны научные консультации к.т.н., доц. Ракутиной Д.В.

4. Разработать трехмерную математическую модель процессов тепловоздухообмена в главном корпусе блочной ТЭС. Адекватность математической модели проверить путем сопоставления результатов расчета с данными экспериментального исследования микроклимата в главном корпусе блочной ТЭС.

5. Получить регрессионную модель, характеризующую зависимость температуры воздуха внутри помещения от количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения, нагрузки системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха.

6. Провести исследование режимов функционирования системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС и разработать рекомендации по энергосбережению на блочных ТЭС данного типа.

**Методы исследования.** В диссертации использованы экспериментальные и расчетные методы исследования. В качестве расчетных методов применялись балансовые методы и методы математического моделирования.

**Достоверность** представленных в работе результатов и выводов, полученных проведением вычислительного эксперимента, подтверждена путем сравнения расчетных данных с результатами промышленных экспериментов.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».**

*Соответствие диссертации формуле специальности*

В соответствии с формулой специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика», объединяющей исследования по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем и поиск принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, в диссертационном исследовании разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности ТЭС за счёт выбора рационального режима работы калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем и приборов системы теплоснабжения главного корпуса с учётом требований, предъявляемых к микроклимату производственных помещений.

*Соответствие диссертации области исследования специальности*

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют пункту 1 «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках» и пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов».

В диссертации разработана методика балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС. Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС. При помощи современных САЕ-систем разработана трехмерная математическая модель системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС. Предложены новые способы сбереже-

ния энергетических ресурсов на ТЭС за счёт совершенствования системы теплового воздухообмена.

### **Научная новизна работы.**

1. Разработана новая методика балансовых расчетов теплового режима главного корпуса ТЭС, которая на основе информации о величине избыточных тепловыделений в свободном объеме главного корпуса, позволяет определять количество дутьевого воздуха, забираемого из помещения, в зависимости от числа работающих блоков и их нагрузки, температуры окружающей среды, тепловой мощности панельных калориферов "на просос" и приборов системы теплоснабжения при соблюдении санитарных норм в рабочих зонах.

2. Разработана трехмерная математическая модель системы теплового воздухообмена главного корпуса ТЭС, позволяющая исследовать взаимное влияние различных параметров теплового режима главного корпуса с целью разработки энергосберегающих мероприятий.

3. Реализован новый подход к совершенствованию систем воздухо- и теплоснабжения главного корпуса блочной ТЭС, основанный на математическом моделировании при помощи современных САЕ-систем и направленный на повышение экономичности работы станции.

4. Получена новая информация о способах повышения экономичности энергоблока за счёт выбора рациональных тепловых нагрузок энергетического калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем и приборов системы теплоснабжения главного корпуса при заданном количестве воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения.

5. Экспериментально получена новая информация о микроклимате в главном корпусе Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт в зависимости от температуры наружного воздуха, числа работающих блоков и величины забора воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения.

### **Практическая ценность работы.**

1. В результате комплексного экспериментального исследования определена величина инфильтрационного воздуха и избыточных тепловыделений в главном корпусе КГРЭС в зависимости от температуры окружающей среды.

2. Методика балансовых расчетов теплового режима главного корпуса, реализованная в виде вычислительной программы «AirKGRS», позволяет определять допустимое количество дутьевого воздуха, забираемого из помещения, в зависимости от числа работающих блоков, их нагрузки и температуры окружающей среды при соблюдении санитарных норм воздушной среды и фиксированной тепловой нагрузке приборов системы теплоснабжения.

3. Составлена инструкция по определению величины забора воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения главного корпуса Костромской ГРЭС в холодный период года.

4. Получено уравнение регрессии для прогнозирования температурного режима внутри главного корпуса ТЭС в зависимости от количества воздуха, забираемого

дутьевыми вентиляторами из котельного отделения, нагрузки системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха.

5. Предложены номограммы для выбора количества воздуха, забираемого из помещения, и нагрузки приборов системы теплоснабжения, при которых температура внутри главного корпуса будет соответствовать допустимой при заданной температуре наружного воздуха.

6. В результате теоретического и экспериментального исследования системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС разработаны рекомендации по повышению экономичности энергоблока за счёт выбора рационального режима работы энергетического калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем при соблюдении требований предъявляемых к микроклимату производственных помещений.

7. Предложены рекомендации по уменьшению тепловой нагрузки приборов системы теплоснабжения главного корпуса ТЭС за счёт снижения инфильтрации через остекление турбинного отделения с оценкой экономической эффективности данного мероприятия.

#### **Реализация результатов.**

Экспериментальная часть работы выполнялась в рамках хозяйственного договора с ОАО «Костромская ГРЭС» в 2003-2004 годах.

Результаты диссертационной работы в виде вычислительной программы «AirKGRS» и конкретных рекомендаций по совершенствованию тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС переданы ОАО «Костромская ГРЭС». Внедрение предложенных рекомендаций позволит повысить экономичность работы станции. Программа «AirKGRS» может быть использована для разработки алгоритма управления микроклиматом в главном корпусе КГРЭС с блоками 300 МВт.

Результаты экспериментального и теоретического исследования системы тепловоздухообмена главного корпуса Костромской ГРЭС опубликованы в широкой печати и могут быть использованы при проектировании и наладке тепловоздушного режима ТЭС данного типа.

#### **Личный вклад автора** в получении результатов состоит:

- в проведении промышленных испытаний и обработке результатов эксперимента;
- в разработке новой методики балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС;
- в разработке математической модели системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС;
- в разработке рекомендаций по энергосбережению и повышению экономичности ТЭС.

#### **Автор защищает:**

- методику балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС, позволяющую определять допустимое количество воздуха, забираемое на технологические нужды из помещения, при соблюдении санитарно-гигиенических требований к воздуху в рабочих зонах;

- математическую модель системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС;
- результаты исследования режимов функционирования системы тепловоздухообмена главного корпуса станции и рекомендации по совершенствованию тепловоздушного режима ТЭС.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты данной работы представлялись:

- на международных научно-практических конференциях: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2008 и 2009); «Тинчуринские чтения» (Казань, КГТУ, 2009, 2010 и 2011); «Состояние и перспективы развития электротехнологии. XV и XII Бенардосовские чтения» (Иваново, ИГЭУ, 2009); «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов» (Москва, МИСиС, 2010);
- на всероссийских научно-практических конференциях: «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» (Оренбург, ОГУ, 2007); «Теория и технология металлургического производства» (Магнитогорск, МГТУ, 2008);
- на региональной научно-технической конференции «Теплоэнергетика» (Иваново, ИГЭУ, 2009, 2010 и 2011).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 16 публикациях, в том числе в 5 статьях и докладах, 11 тезисах докладов, из них 3 статьи в журналах по списку ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, рисунки, таблицы, список литературы из 172 наименований и приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены общая цель работы и направление исследований, перечислены решаемые задачи, отражены научная новизна и практическая ценность, пояснена структура работы.

**В первой главе** проводится аналитический обзор современного состояния вопроса экспериментального и теоретического исследования системы тепловоздухообмена производственных зданий с избыточными тепловыделениями.

В инженерных расчетах тепловоздухообмена промышленных зданий, как правило, используют балансовые методы, базирующиеся на уравнениях материального и теплового балансов воздуха. Помещение рассматривают как конечную совокупность характерных объемов и поверхностей, участвующих в тепломассообмене. Для всех характерных объемов и поверхностей составляют уравнения сохранения энергии (теплоты) и массы, которые в совокупности образуют основную систему уравнений для расчета. При этом для адаптации математической модели используют закономерности тепломассообмена, струйных течений, а также экспериментально выявленные схемы циркуляции воздуха в помещении.

Самым распространенным подходом к изучению процессов теплообмена в промышленных зданиях можно назвать экспериментальные методы. Экспериментальное исследование теплового режима проводят на приближенных физических моделях или на реальных объектах. Приближенное физическое моделирование основано на методах теории подобия и теории тепловых струй. В результате определяют основные закономерности и характеристики теплового режима здания.

В настоящее время в дополнение к экспериментальным методам исследования всё чаще используют современные математические модели, основанные на решении системы дифференциальных уравнений конвективного тепло- и массопереноса. При этом эмпирические данные используют лишь для настройки и проверки адекватности модели. В результате моделирования получают поля скоростей, температур и концентраций во всем объеме помещения, которые используют для решения различных задач, связанных с рациональной организацией воздухообмена. Проведение вычислительных экспериментов позволяет получать достаточно точную и обширную информацию о процессах разной физической природы и существенно сократить сроки и затраты на разработку рациональных режимов.

Для программной реализации математических моделей теплообмена промышленных зданий с тепловыделениями целесообразно использовать современные САЕ-системы (computer-aided engineering), к которым относятся такие программные продукты как Ansys, FlowVision, Star-CD, Fluent, Flow3D, Phoenix и др. Программно-вычислительный комплекс Phoenix, по нашему мнению, наиболее подходит для моделирования теплового режима главного корпуса ТЭС.

Начиная с 70-х годов прошлого века, учеными разных школ выполнен ряд работ посвященных изучению теплового режима главных корпусов ТЭС. Все исследования базируются на экспериментальных данных и балансовых расчетах.

Исследованию теплового режима в главных корпусах тепловых электростанций посвящены работы Корбута В.П., Багаутдинова З.С., Шилькрота Е.О., Романовой Т.М., Ушакова Г.А., Мошкарина А.В. и др. Из обзора этих работ следует, что для улучшения микроклимата в главных корпусах тепловых электрических станций необходимо: приблизить воздухозаборные устройства к поверхности теплоотдающего оборудования; уменьшить площадь остекления главных корпусов и повысить герметичность наружной оболочки здания; повысить качество тепловой изоляции с целью снижения тепловых потерь от оборудования; строить отдельные ячейки для котлов с целью уменьшения горизонтальных перетоков воздуха; создавать системы автоматического регулирования тепловым режимом в промышленных зданиях с избыточными тепловыделениями; применять местное душирование.

Одним из направлений совершенствования теплового режима на ТЭС является определение допустимого количества воздуха, которое можно забирать из котельного отделения на ведение технологического процесса. Однако существующая методика расчета не учитывает изменение климатических условий окружающей



среды, неритмичность работы технологического оборудования и совместное действие механической и естественной вентиляции. При этом большинство исходных данных задается приближенно или принимается по проекту.

Таким образом, совершенствование системы тепловоздухообмена главного корпуса блочной ТЭС представляет практический и научный интерес.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментального исследования тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт.

Главный корпус КГРЭС – трехпролетное здание с размещением в пролетах турбогенераторного, деаэрационного и парогенераторного отделений (рис. 1). Разделительная стенка между отделениями отсутствует. В главном корпусе установлено восемь энергоблоков мощностью по 300 МВт.

Для частичного подогрева приточного воздуха в котельном отделении установлены калориферы в стеновых панелях ряда Г (отметка 1,8 м). Калориферы работают на самотяге («на просос») за счет естественного напора и разряжения, создаваемого дутьевыми вентиляторами. В главном корпусе также имеется шесть ворот, оборудованных воздушно – тепловыми завесами. В блочных щитах управления (БЩУ) и кабинах мостовых кранов установлены автономные кондиционеры.

Приток воздуха в помещение главного корпуса в теплое время года осуществляется через фрамуги световых проемов по ряду А (отметка 10,5 м) и по ряду Б (отметка 30,0 м) и через калориферы, встроенные в стены ряда Г (отметка 1,8 м), а в холодное время года через калориферы ряда Г работающие «на просос» и за счет инфильтрации.

Удаление воздуха из помещения главного корпуса производится дутьевыми вентиляторами и за счёт присосов через неплотности обмуровки парогенератора. Летом воздух удаляется также через аэрационный фонарь парогенераторного отделения и через неорганизованные неплотности стеновых ограждений (эксфильтрация), при этом забор воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения составляет 100% их производительности.

На рис. 1 показана схема воздухообмена в главном корпусе Костромской ГРЭС с указанием направления воздушных потоков.

Таким образом, для организации оптимального микроклимата в главном корпусе Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт используется аэрация с установкой калориферов "на просос" по ряду Г и частичным или полным забором воздуха на горение из котельного отделения. Заметим, что аэрация в чистом виде в свободном объеме главного корпуса КГРЭС отсутствует, так как на естественный воздухообмен влияет разрежение, создаваемое дутьевыми вентиляторами. В этом случае эффективность воздухообмена определяется режимом работы технологического оборудования и геометрическими размерами приточных проемов и фонарей, а также климатическими условиями окружающей среды.

Основная задача экспериментального исследования системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС - определение параметров микроклимата в зависимости

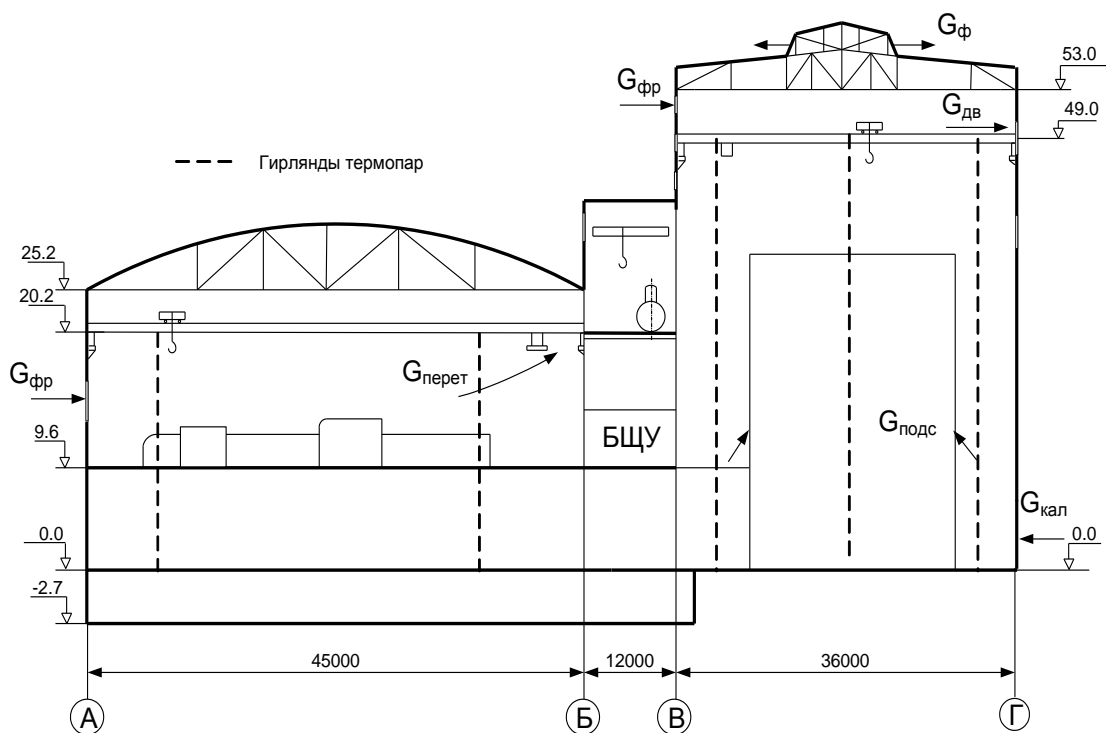


Рис. 1. Схема воздухообмена в главном корпусе Костромской ГРЭС

$G_{фр}$  – воздух, поступающий через открытые фрамуги оконных проемов;  $G_{перет}$  – воздух, перетекающий из машинного в котельное отделение;  $G_{подс}$  – воздух, подсасываемый кладкой парогенератора;  $G_{кал}$  – воздух, просасываемый через панельные калориферы ряда Г;  $G_{ф}$  – воздух, уходящий через аэрационный фонарь

от температуры окружающей среды, от числа работающих энергоблоков и их мощности, а также от количества воздуха, забираемого из помещения на технологические нужды.

Экспериментальное исследование микроклимата в главном корпусе КГРЭС проведено в холодный период года с декабря 2003 года по апрель 2004 года в соответствии с программой испытаний, составленной на основе РД 34.21.401-90 и утвержденной главным инженером КГРЭС.

В процессе эксперимента было выполнено измерение температуры воздуха в помещениях парогенераторного и турбогенераторного отделений. Температуру измеряли при помощи термоэлектрических термометров типа ТМК, которые были скомпонованы в две гирлянды по восемь термопар в каждой. В качестве регистрирующих приборов использованы два модуля распределенного ввода ADAM-4018M с функцией запоминания сигнала.

Установка рабочих спаев медь – константановых термопар, подключенных к ADAM-4018M, в точки замера проводилась с рабочих площадок кранов, которые перемещались в заранее намеченные позиции между парогенераторами в котельном отделении и турбогенераторами в машзале. В результате была получена подробная информация о распределении температуры воздуха по высоте главного корпуса.

Кроме этого в процессе эксперимента выполнено измерение температуры, влажности и скорости воздуха на основных рабочих отметках метеометром МЭС-2.

Измерения проводились в пределах рабочей зоны на отметках 0,0м, 9,0м, 15,0м и 21,0м при разных значениях температуры наружного воздуха и доли воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из атмосферы. Исследование показало, что во время проведения эксперимента параметры микроклимата (температура в рабочей зоне, скорости воздуха и влажность), в основном, соответствовали санитарным нормам. Однако, при температурах наружного воздуха ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  температура в рабочей зоне на отметке 0.0 м опускалась ниже допустимой. Кроме этого, во время всех экспериментов зафиксировано пониженное в 1,5-2 раза по отношению к нормативу значение относительной влажности воздуха.

Установлено влияние степени открытия шиберов на всасе дутьевых вентиляторов и изменения температуры наружного воздуха на температуру воздуха внутри корпуса. Открытие шиберов на всасе дутьевых вентиляторов на 50% на двух блоках из четырех работающих, приводит к увеличению температуры внутри корпуса не более чем на  $1^{\circ}\text{C}$ . Увеличение температуры наружного воздуха на  $1^{\circ}\text{C}$  приводит к росту температуры внутри корпуса в среднем на  $0,4^{\circ}\text{C}$ .

В процессе эксперимента также фиксировали температуру и расход воздуха, поступающего в главный корпус через калориферы, расположенные по ряду Г. Температуру измеряли в выходном сечении калориферной секции. Расход наружного воздуха, просасываемого через калориферы, определяли по значению скорости, измеренной метеометром МЭС-2.

Температуру и скорость воздуха измеряли в нескольких точках с последующим усреднением результатов. При определении количества и мест размещения точек измерения температуры и скорости воздуха в выходном сечении калориферной секции руководствовались методом выбора точек измерений для круглых и прямоугольных сечений, приведенных в ГОСТ 12.3.018.79.

Для определения тепловой мощности воздушно-тепловых завес у ворот и калориферов, расположенных по ряду А, было выполнено измерение температуры и скорости воздушных потоков на входе и выходе из данных установок прибором МЭС-2.

В процессе эксперимента по штатным приборам, установленным на станции, регистрировали параметры системы теплоснабжения котельного и турбинного отделений (расход теплоносителя, температура теплоносителя прямой и обратной линии), а также рабочие параметры действующих энергоблоков (электрическая мощность, расход газа, температура воздуха перед дымососом).

По результатам экспериментов рассчитаны коэффициенты тепловыделений в рабочую зону и градиенты температур по высоте машинного и котельного отделений. Данные величины существенно отличаются от принятых в проекте: для котельного отделения в  $\sim 3$  раза, для машинного отделения в  $\sim 2,2$  раза.

Экспериментальные данные использованы для проверки адекватности и настройки математической модели тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт.

**В третьей главе** разработана методика расчета тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС, позволяющая определять допустимое количество воздуха забираемого на технологические нужды из помещения при соблюдении санитарно-гигиенических требований в зависимости от температуры наружного воздуха, количества работающих блоков и их нагрузки, а также параметров системы теплоснабжения.

Методика балансового расчета тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС основана на совместном решении уравнений теплового и материального балансов.

Баланс воздуха в главном корпусе ТЭС имеет вид:

$$G_{\text{кал}}^{\Gamma} + G_{\text{БЩУ}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{фр}} = G_{\text{дв}}^{\text{ном}} + G_{\text{подс}} + G_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{кал}}^{\Gamma}$  – количество воздуха, просасываемого через панельные калориферы ряда  $\Gamma$ ;  $G_{\text{БЩУ}}$  – количество воздуха, поступающего из БЩУ;  $G_{\text{инф}}$  – количество инфильтрационного воздуха, поступающего в корпус через неорганизованные неплотности и поры стеновых ограждений ниже уровня плоскости нулевого давления;  $G_{\text{фр}}$  – количество воздуха, поступающего через открытые фрамуги оконных проемов;  $G_{\text{дв}}^{\text{ном}}$  – количество воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из помещения главного корпуса;  $G_{\text{подс}}$  – количество воздуха, подсасываемого кладкой парогенератора;  $G_{\text{ф}}$  – количество воздуха, уходящего через аэрационный фонарь.

Количество воздуха, поступающего в главный корпус через приточные проемы, определяется на основе экспериментальных данных по интегральному уравнению неразрывности. Количество воздуха, поступающего из блочных щитов управления, принято по проекту.

Количество воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из помещения главного корпуса, определяется в зависимости от нагрузки и числа работающих блоков:

$$G_{\text{дв}}^{\text{ном}} = G_{\text{дв}}^{\Sigma} (1 - \beta), \quad (2)$$

где  $G_{\text{дв}}^{\Sigma} = G_1 + G_2$  – суммарная подача дутьевых вентиляторов;  $G_1$  – количество воздуха необходимое для горения;  $G_2$  – перетоки воздуха в РВП из напорного тракта дутьевых вентиляторов в тракт газохода;  $\beta$  – доля дутьевого воздуха, забираемого из атмосферы.

Уравнение баланса теплоты в единицу времени записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_T + Q_{\text{кал}}^{\Gamma} + Q_{\text{БЩУ}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{фр}} + Q_{\text{тс}} + Q_{\text{кал}}^A + Q_{\text{вз}} = \\ = Q_{\text{дв}}^{\text{ном}} + Q_{\text{подс}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{огр}}. \end{aligned} \quad (3)$$

В состав уравнения (3) входят величины:  $Q_T$  – количество явных тепловыделений в главном корпусе ТЭС;  $Q_{\text{кал}}^{\Gamma}$  – тепло, вносимое воздухом, подогретом в калориферах ряда  $\Gamma$ ;  $Q_{\text{БЩУ}}$  – тепло, вносимое воздухом из БЩУ;  $Q_{\text{инф}}$  – тепло, вносимое с инфильтрационным воздухом;  $Q_{\text{фр}}$  – тепло воздуха, поступающего через открытые

фрамуги оконных проемов;  $Q_{mc}$  - тепловая нагрузка системы теплоснабжения;  $Q_{кал}^A$  - тепловая мощность калориферов ряда А;  $Q_{вз}$  - тепловая мощность воздушно-тепловых завес у ворот;  $Q_{дв}^{ном}$  - тепло, отводимое с дутьевым воздухом;  $Q_{подс}$  - тепло воздуха, подсасываемого через кладку котла;  $Q_{ф}$  - тепло воздуха, уходящего через аэрационный фонарь;  $Q_{огр}$  - тепловые потери через ограждающие конструкции главного корпуса.

Сначала по результатам экспериментального исследования находят количество избыточных тепловыделений от основного и вспомогательного оборудования в главном корпусе ТЭС и количество инфильтрационного воздуха, поступающего через неплотности и поры стеновых ограждений. Суммарные поступления тепла от основного и вспомогательного оборудования (избыточные тепловыделения) в главном корпусе ТЭС находят из уравнения теплового баланса (3), а количество инфильтрационного воздуха из уравнения материального баланса (1).

Далее, зная величину избыточных тепловыделений, определяют допустимое количество воздуха, которое можно забирать на горение из котельного отделения, при соблюдении требуемой нормативными документами температуры внутри главного корпуса по формуле:

$$G_{дв}^{ном} = \frac{Q_1 - Q_2 + c_в T_{нв} (G_{подс} + G_{ф} - G_{кал}^Г - G_{БЩУ} - G_{фр})}{c_в (T_{дв} - T_{нв})}, \quad (4)$$

где  $Q_1 = Q_T + Q_{кал}^Г + Q_{БЩУ} + Q_{фр} + Q_{то} + Q_{вз}$ ;  $Q_2 = Q_{подс} + Q_{ф} + Q_{огр}$ ;  $T_{нв}$  - температура наружного воздуха;  $T_{дв}$  - температура воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из помещения.

По разработанной методике выполнен расчет теплового и воздушного балансов главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт с целью определения избыточных тепловыделений и количества воздуха, которое можно забирать из котельного отделения, соблюдая при этом санитарно-гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне. Исходные данные для расчета приняты по данным экспериментального исследования тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС.

Экспериментально найдена зависимость количества избыточных тепловыделений в помещении главного корпуса от температуры наружного воздуха при номинальной нагрузке блоков, которая с погрешностью менее 1% аппроксимируется линейным уравнением  $Q_T = 5934 + 148,5 \cdot T_{нв}$ , кВт.

В результате установлено, что инфильтрация в главном корпусе КГРЭС в зависимости от количества работающих блоков и их нагрузки составляет 37 ÷ 68 % от общего воздухообмена. Большие объемы инфильтрационных течений указывают на негерметичность ограждающих конструкций главного корпуса КГРЭС. Наличие повышенной инфильтрации приводит к увеличению затрат на собственные нужды станции и свидетельствует о нерациональной организации воздухообмена в главном корпусе в целом.

Разработанная методика расчета тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС оформлена в виде компьютерной программы AirKGRS, которая позволяет определять допустимое количество дутьевого воздуха, забираемого из помещения, в зависимости от числа работающих блоков и температуры окружающей среды при соблюдении санитарных норм воздушной среды и фиксированной тепловой нагрузке приборов системы теплоснабжения. Программа реализована на алгоритмическом языке «Object Pascal» в среде Delphi. В заключение третьей главы составлена инструкция по определению величины забора воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения главного корпуса Костромской ГРЭС в холодный период года.

**В четвертой главе** разработана математическая модель тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС.

Математическая модель разработана для условий холодного времени года. Приток воздуха в помещение осуществляется через калориферы, 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 (рис. 2).

Математическое моделирование системы тепловоздухообмена главного корпуса основано на решении системы дифференциальных уравнений движения (Навье-Стокса) и сохранения энергии текучей среды (Фурье-Кирхгофа). Замыкается

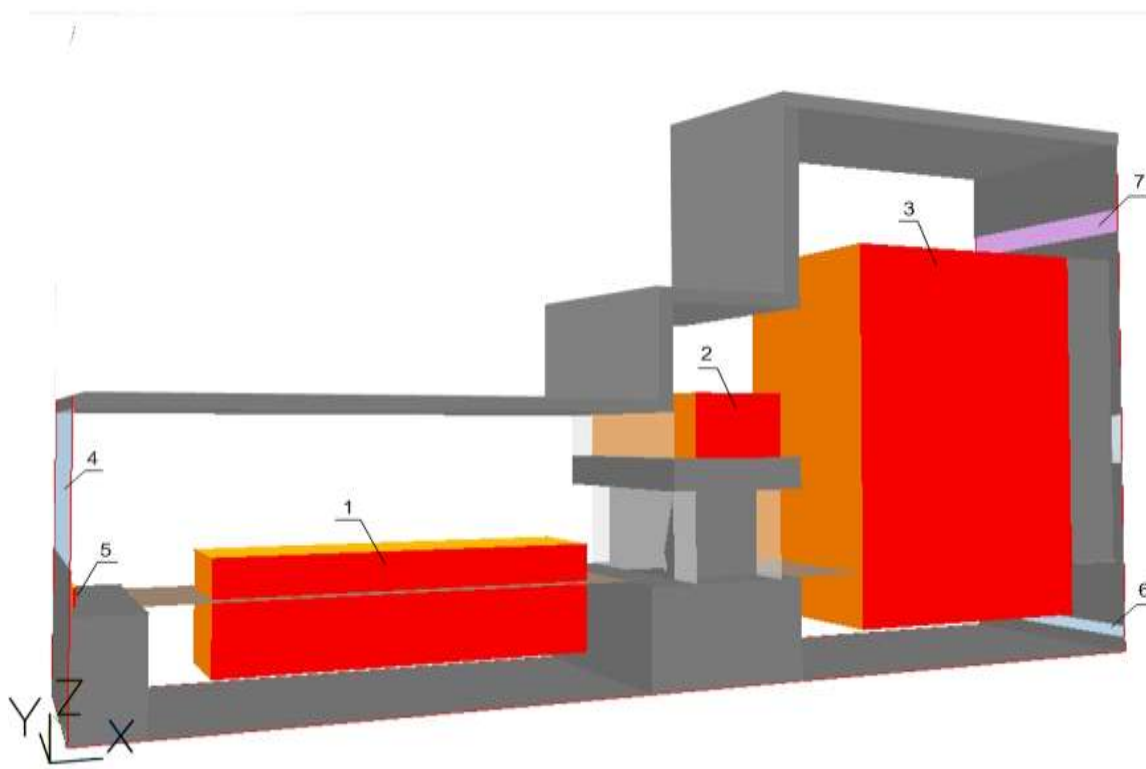


Рис. 2. Трехмерная геометрическая модель главного корпуса в ПВК Phoenix  
1 – турбогенератор; 2 – деаэратор; 3 – парогенератор; 4 – оконный проем турбинного отделения; 5 – регистры системы отопления; 6 – калориферы, встроенные в стены парогенераторного отделения; 7 – воздухозаборное отверстие дутьевых вентиляторов

система дифференциальных уравнений движения воздушной среды уравнением неразрывности. В трехмерных декартовых координатах для стационарного режима эти уравнения могут быть записаны в обобщенном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x \Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z \Phi) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + S_\Phi, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  – составляющие вектора скорости в декартовой системе координат;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – координаты;  $\rho$  – плотность;  $\Phi$  – зависимая переменная;  $\Gamma_\Phi$  – коэффициент переноса переменной  $\Phi$ ;  $S_\Phi$  – источниковое слагаемое для переменной  $\Phi$ .

Граничные условия для системы уравнений (5):

- на всех поверхностях скорость потока равна нулю  $\vec{u}_w(x_i) = 0$ ;
- на поверхностях турбины, парогенератора и деаэратора задан тепловой поток постоянной мощности, принятый по проекту  $q_w(x_i) = const$ ;
- для наружных ограждений задан коэффициент теплопередачи  $k(x_i) = const$ ;
- на поверхности регистров отопления турбинного отделения задан постоянный тепловой поток, который определен в соответствии с температурным графиком, утвержденным на станции  $q_{mc} = const$ ;
- для оконных проемов турбинного отделения и калориферов парогенераторного отделения задан свободный приток воздуха  $\vec{u}_{np}(x_i) = f(\Delta p)$ ;
- температура воздуха, поступающего через оконные проемы турбинного отделения, равна температуре наружного воздуха  $T_{np}(x_i) = T_{не}$ ;
- температура воздуха, поступающего в главный корпус через калориферы парогенераторного отделения, задана по данным эксперимента  $T_e(x_i) = T_{кал}^f$ ;
- для воздухозаборных отверстий дутьевых вентиляторов задан расход воздуха, удаляемого из главного корпуса. При этом количество работающих блоков и их нагрузку учитывали с помощью коэффициента использования установленной тепловой производительности котлов  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{Q_k^\Sigma}{Q_{к, ном}^\Sigma}, \quad (6)$$

где  $Q_k^\Sigma$  – суммарная тепловая производительность котлов;  $Q_{к, ном}^\Sigma$  – суммарная номинальная тепловая производительность котлов.

Количество воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из главного корпуса в расчете на один энергоблок, было найдено по формуле

$$G_{\text{дв}}^{\text{ном}} = G_{\text{дв, ном}}^{\text{ном}} \cdot \gamma, \quad (7)$$

где  $G_{\text{дв}}^{\text{ном}}$  – количество воздуха, забираемое из помещения главного корпуса при данной производительности котла;  $G_{\text{дв, ном}}^{\text{ном}}$  – количество воздуха, забираемое из помещения главного корпуса при номинальной производительности котла.

Решение поставленной задачи выполнено на основе численных методов при помощи программного комплекса Phoenics. 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 сетки составило 91264. 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.

Адаптация математической модели выполнена путем выбора проницаемости калориферов парогенераторного отделения и виртуальных перегородок между турбинным и парогенераторным отделениями.

Достоверность результатов расчета на математической модели проверена путем сопоставления с данными экспериментального исследования микроклимата в главном корпусе Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт. Для сравнения использованы

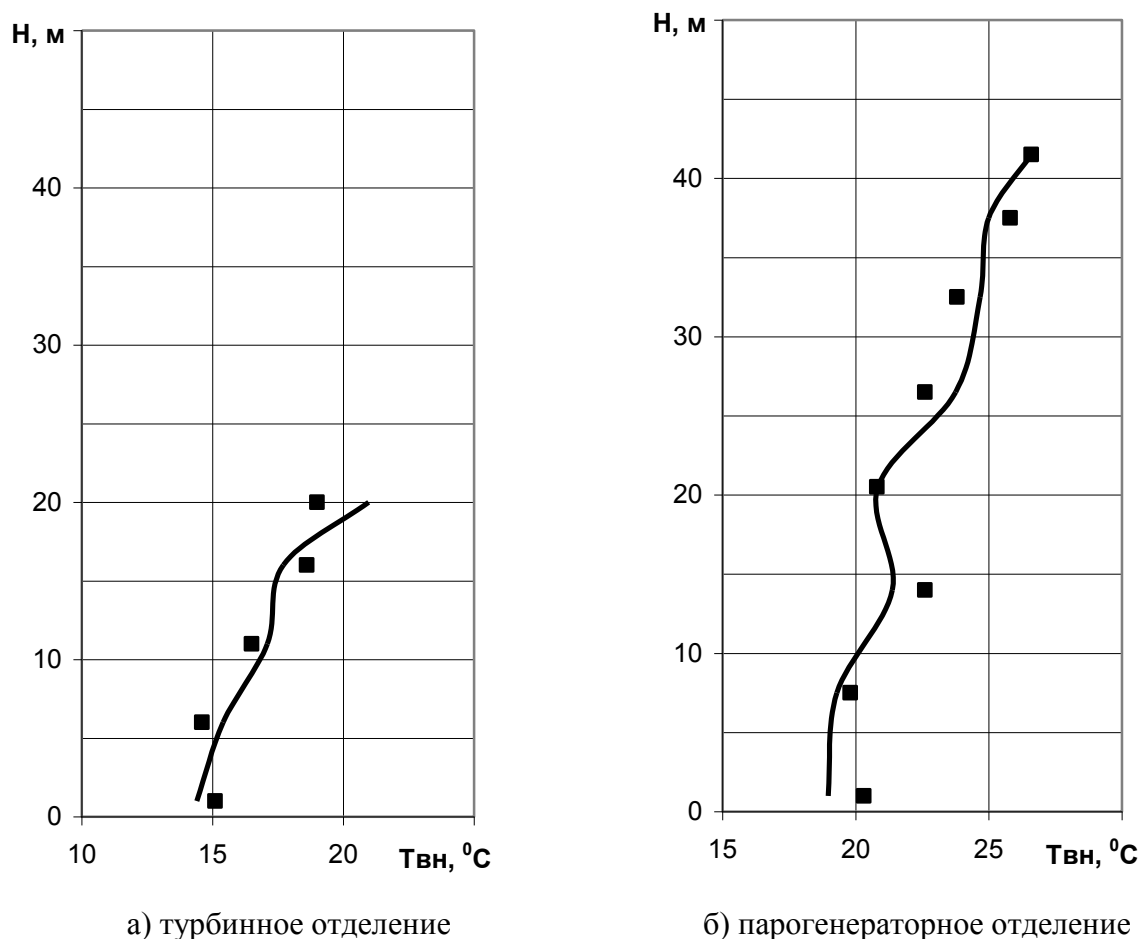


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения температуры при  $T_{нв} = -16^{\circ}\text{C}$   
 ( ■ - экспериментальные данные; — - результаты расчета)

средние значения температуры, измеренные в разных точках главного корпуса. Сопоставление результатов вычислительного эксперимента и опытных данных показало, что относительная погрешность расчета температуры не превышает 8 % (рис. 3).



Математическая модель тепловоздухообмена была использована для исследования и совершенствования тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт.

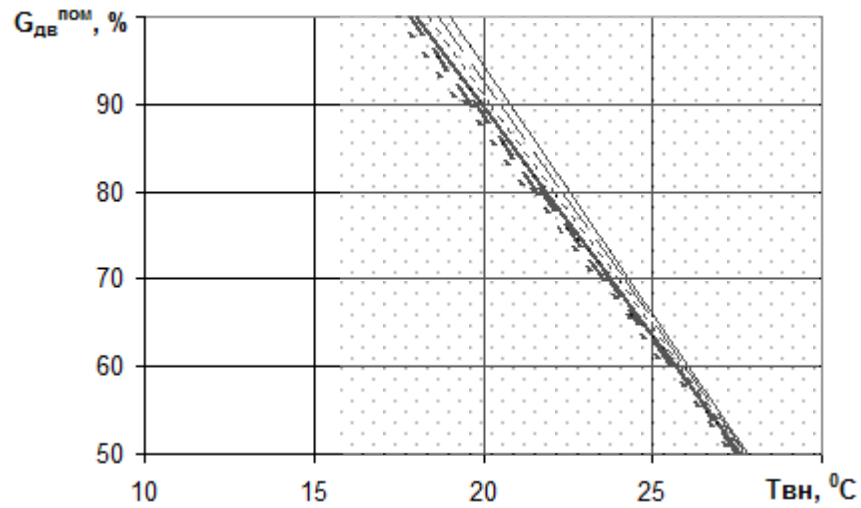
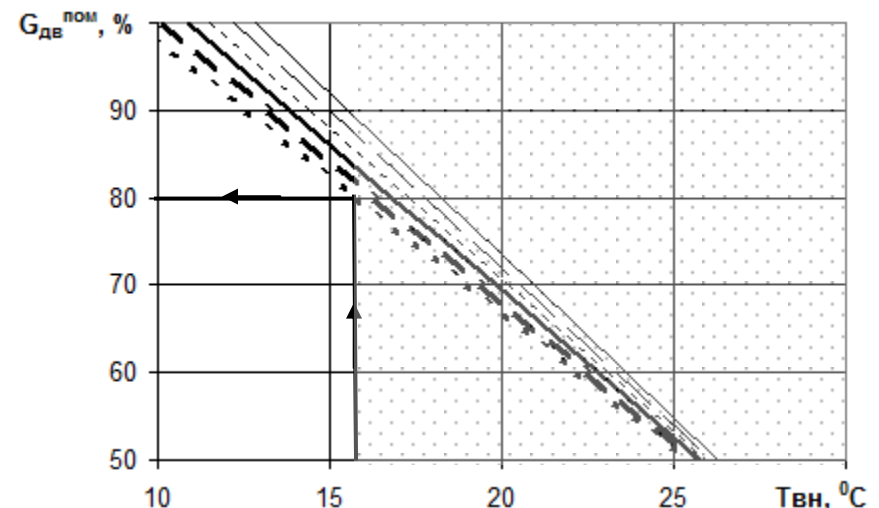
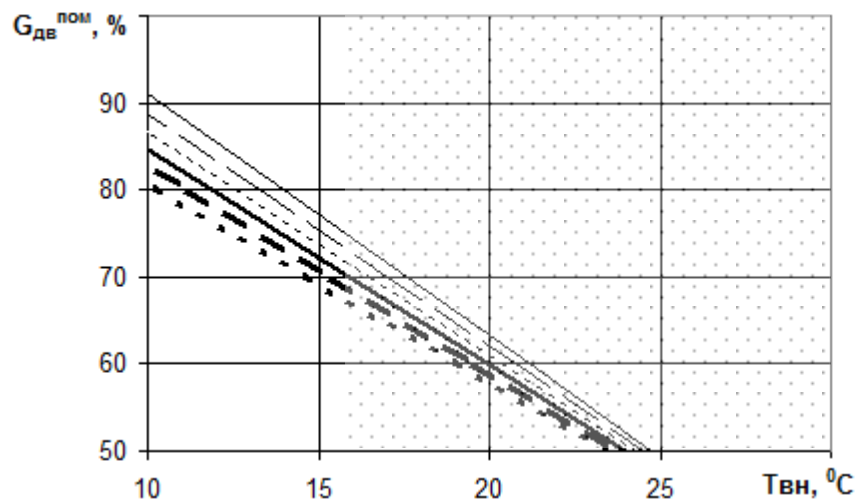
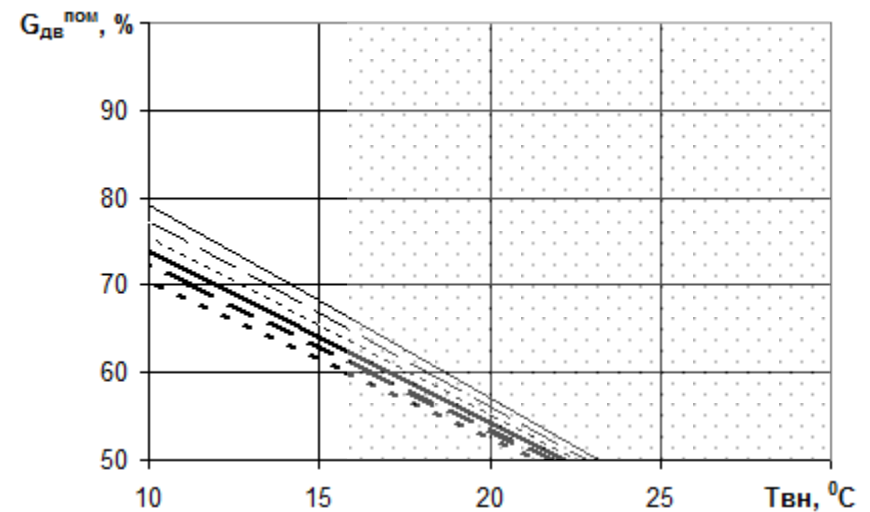
**В пятой главе** предложены рекомендации по повышению экономичности работы Костромской ГРЭС за счёт совершенствования системы тепловоздухообмена главного корпуса станции с блоками 300 МВт и выбора рационального режима работы калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем.

На математической модели проведено исследование различных режимов функционирования системы тепловоздухообмена главного корпуса Костромской ГРЭС при изменении тепловой нагрузки приборов системы теплоснабжения и количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения. Результаты расчетов на модели оформлены в виде регрессионной зависимости, полученной методом планирования эксперимента. Регрессионная модель характеризует зависимость температуры внутреннего воздуха  $T_{вн}$  от количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения  $G_{дв}^{ном}$ , нагрузки системы теплоснабжения  $Q_{мс}$  и температуры наружного воздуха  $T_{нв}$ .

Результаты расчета на модели представлены в виде номограмм, при помощи которых можно подобрать такие значения забора воздуха из помещения и нагрузки приборов системы теплоснабжения, при которых температура внутри главного корпуса будет соответствовать допустимой (заштрихованная область) для рабочих зон турбинного, котельного и деаэрационного отделений согласно требованиям нормативных документов. Номограммы построены для температуры наружного воздуха 0, -10, -20 и -30 °С (рис. 4). Например, при  $T_{нв} = -10$  °С и нагрузке системы теплоснабжения главного корпуса  $Q_{мс} = 50$  % количество воздуха, которое можно забирать из котельного отделения при  $T_{вн} = 16$  °С не должно превышать  $G_{дв}^{ном} = 80$  %.

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

На рис. 5 представлена зависимость количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения, от температуры воздуха внутри главного корпуса и нагрузки приборов системы теплоснабжения  $G_{дв}^{ном} = f(T_{вн}, Q_{мс})$  при двух значениях проницаемости оконных проемов турбинного отделения  $f$ . Из графика видно, что при  $T_{нв} = -30$  °С и  $f = 6,6$  % количество дутьевого воздуха, которое можно забирать из помещения главного корпуса не должно превышать 50 % при соблюдении требуемой СанПиН температуры воздуха в рабочих зонах котельного,

а)  $T_{нв} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ б)  $T_{нв} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в)  $T_{нв} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ г)  $T_{нв} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

—  $Q_{тс} = 100\%$     — —  $Q_{тс} = 90\%$     - - - -  $Q_{тс} = 80\%$     — — —  $Q_{тс} = 70\%$     — — —  $Q_{тс} = 60\%$     - - -  $Q_{тс} = 50\%$

Рис. 4. Зависимость  $G_{дв}^{ном} = f(T_{вн}, Q_{тс})$  при разной температуре наружного воздуха  $T_{нв}$

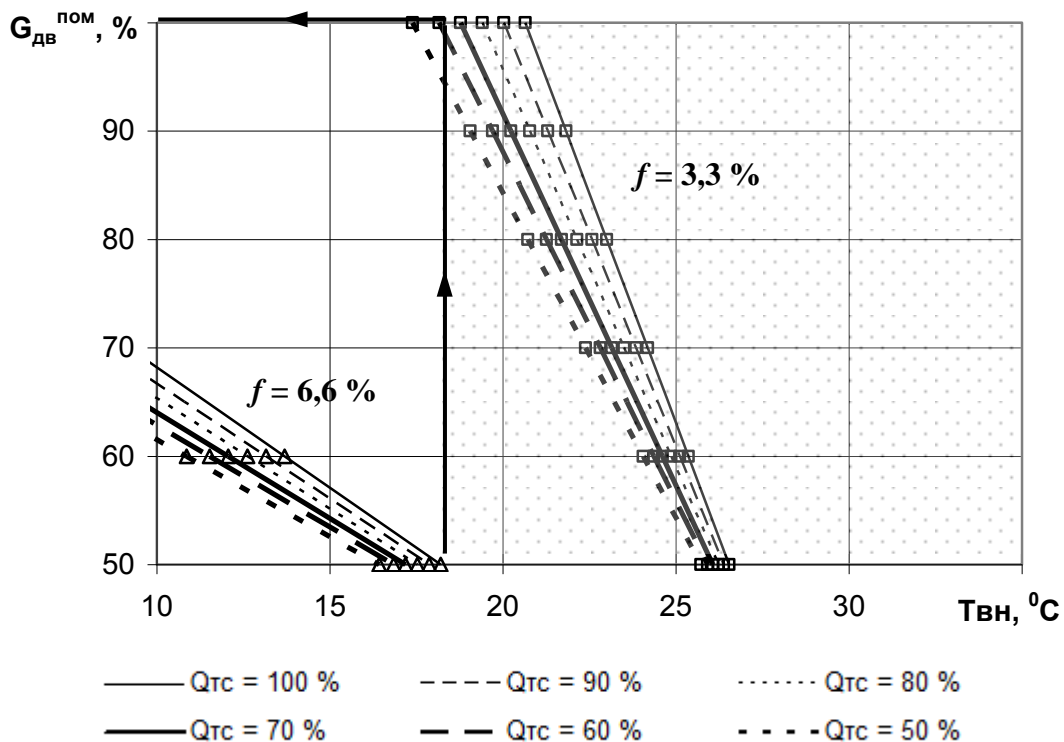


Рис. 5. Зависимость  $G_{дв}^{пом} = f(T_{вн}, Q_{тс})$  при  $T_{нв} = -30^\circ\text{C}$  и проницаемости оконных проемов турбинного отделения 6,6 % и 3,3 % ( $\square - f = 3,3\%$ ,  $\Delta - f = 6,6\%$ )

турбинного и деаэрационного отделений. Любое увеличение  $G_{дв}^{пом}$  приведет к понижению температуры в рабочих зонах ниже допустимого значения  $T_{вн} = 18^\circ\text{C}$  (не заштрихованная область). Уменьшение проницаемости оконных проемов за счет их уплотнения до 3,3 % позволит увеличить забор воздуха из помещения главного корпуса до 100 % и при этом уменьшить нагрузку приборов системы теплоснабжения на ~ 40 %.

В диссертации также исследован способ повышения экономичности работы Костромской ГРЭС за счёт выбора рационального режима работы энергетического калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем с учетом требований, предъявляемых к микроклимату производственных помещений. Калорифер перед регенеративным воздухоподогревателем (РВП) предназначен для предварительного подогрева воздуха с целью защиты «холодного» слоя набивки воздухоподогревателя от низкотемпературной (серноокислотной) коррозии при сжигании мазута. При работе котлов на природном газе температура дутьевого воздуха за калорифером должна составлять  $45^\circ\text{C}$ , а при работе на мазуте –  $60^\circ\text{C}$ .

В холодный период года для предотвращения выхолаживания помещения и образования наледей 100% воздуха необходимого для горения рекомендуется брать из атмосферы. При помощи инструкции, разработанной в главе 3 диссертации, в зависимости от числа работающих энергоблоков и их нагрузки можно определить такое соотношение количества воздуха, забираемого на горение из атмосферы, к количеству воздуха, забираемого из главного корпуса при котором основные параметры

микроклимата в рабочих зонах будут соответствовать нормативным значениям. При этом температуру смеси наружного и внутреннего воздуха  $T_{см}$  на входе в энергетический калорифер перед РВП можно найти по формуле

$$T_{см} = \frac{G_{вн}^{ном}}{100} (T_{вн} - T_{нв}) + T_{нв}, \quad (8)$$

где  $T_{нв}$  и  $T_{вн}$  - соответственно температура наружного воздуха и воздуха, забираемого из помещения главного корпуса;  $G_{вн}^{ном}$  - количество воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из главного корпуса.

Забор части воздуха на горение из помещения позволяет утилизировать тепло-выделения от оборудования и приводит к повышению экономичности работы энергоблока за счёт снижения тепловой нагрузки на калорифер перед РВП. Результаты расчета экономии тепловой энергии на калорифер и топлива на парогенератор при заборе дутьевого воздуха из главного корпуса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета экономии тепловой энергии и топлива при снижении тепловой нагрузки на энергетический калорифер перед РВП

$T_{нв}, ^\circ\text{C}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
$T_{см}, ^\circ\text{C}$	-12	-6	0	7	13	20	26
$G_{вн}^{ном}, \%$	30	35	41	49	58	72	91
Продолжительность стояния температуры, ч	36,7	60,0	172,0	360,0	662,4	777,6	1723,0
Экономия тепловой энергии, МДж/кг	41,7	42,1	43,4	46,7	47,9	50,9	51,9
Экономия топлива, т у.т.	72,0	120,0	348,3	782,6	1472,6	1832,7	4131,1
Экономия топлива, т у.т./год	8759,3						

Таким образом, уменьшение тепловой нагрузки энергетического калорифера перед РВП снижает расход топлива на парогенератор на 8759,3 т у.т./год, что дает значительный экономический эффект.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана и апробирована методика экспериментального исследования системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС с учетом варьирования расхода воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из помещения, и изменения температуры окружающей среды.

2. В результате комплексного экспериментального исследования получена новая информация о микроклимате в главном корпусе Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт в зависимости от температуры наружного воздуха, числа работающих блоков и величины забора воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения. Определен

расход инфильтрационного воздуха и количество избыточных тепловыделений в главном корпусе КГРЭС в зависимости от температуры окружающей среды. Рассчитаны коэффициенты тепловыделений в рабочую зону и градиенты температур по высоте машинного и котельного отделений.

3. Разработана и апробирована новая методика балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС, которая на основе информации о величине избыточных тепловыделений в свободном объеме главного корпуса, позволяет определять количество дутьевого воздуха, забираемого из помещения, в зависимости от числа работающих блоков, температуры окружающей среды, тепловой нагрузки панельных калориферов "на просос" и приборов системы теплоснабжения при соблюдении санитарных норм в рабочих зонах. Методика расчета адаптирована к условиям свободного объема главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт.

Методика балансовых расчетов тепловоздушного режима главного корпуса реализована в виде вычислительной программы «AirKGRS».

4. Составлена инструкция по определению величины забора воздуха дутьевыми вентиляторами из помещения главного корпуса Костромской ГРЭС в холодный период года.

5. Разработана трехмерная математическая модель системы тепловоздухообмена главного корпуса Костромской ГРЭС с блоками 300 МВт. Моделирование выполнено с использованием программно-вычислительного комплекса Phoenics. Модель учитывает основные процессы, происходящие в главном корпусе тепловой станции: движение воздушных потоков, теплообмен между тепловыделяющим оборудованием, приборами системы теплоснабжения, воздушной средой и внутренними ограждениями здания.

Адекватность математической модели проверена путем сопоставления результатов расчета температурного поля на модели с данными экспериментального исследования тепловоздушного режима главного корпуса Костромской ГРЭС. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента. Средняя относительная погрешность не превышает 8 %.

6. На математической модели проведено исследование различных режимов функционирования систем тепловоздухообмена главного корпуса Костромской ГРЭС при изменении тепловой нагрузки приборов системы теплоснабжения и количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения. Получена регрессионная зависимость температуры воздуха внутри помещения от количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения, нагрузки системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха. Уравнение регрессии может быть использовано для прогнозирования температурного режима внутри корпуса в зависимости от перечисленных факторов.

7. Предложены номограммы для выбора количества воздуха, забираемого из помещения, и нагрузки приборов системы теплоснабжения, при которых температу-

ра внутри главного корпуса будет соответствовать допустимой при заданной температуре наружного воздуха.

8. 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.

9. Разработана методика, позволяющая выбирать рациональный режим работы энергетического калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем с учетом требований, предъявляемых к микроклимату производственных помещений в зависимости от температуры наружного воздуха, количества работающих блоков и их мощности. Уменьшение тепловой нагрузки калорифера перед РВП дает значительный экономический эффект.

10. Результаты диссертационной работы в виде вычислительной программы «AirKGRS» и конкретных рекомендаций по совершенствованию тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС переданы ОАО «Костромская ГРЭС». Внедрение предложенных рекомендаций позволит повысить экономичность работы станции.

Программа «AirKGRS» может быть использована для разработки алгоритма управления микроклиматом в главных корпусах ТЭС с блоками 300 МВт.

11. Результаты экспериментального и теоретического исследования системы тепловоздухообмена главного корпуса Костромской ГРЭС опубликованы в широкой печати и могут быть использованы при проектировании и наладке тепловоздушного режима ТЭС данного типа.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. Бухмиров, В.В. Экспериментальное исследование системы аэрации главного корпуса Костромской ГРЭС / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов**, Д.В. Ракутина. // Вестник ИГЭУ. – Вып. 1. – 2007. – С. 14 – 18.
2. Бухмиров, В.В. Выбор рационального режима работы калорифера перед регенеративным воздухоподогревателем энергоблока мощностью 300 МВт / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов**, Д.В. Ракутина. // Теплоэнергетика. – Вып. 8. – 2010. – С. 46 – 48.
3. Бухмиров, В.В. Совершенствование системы тепловоздухоснабжения главного корпуса ТЭС на основе математического моделирования / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов**, Д.В. Ракутина. // Вестник ИГЭУ. – Вып. 1. – 2011. – С. 4 – 7.

### **Публикации в других изданиях**

4. Бухмиров, В.В. Расчет тепловоздушного режима производственного помещения с избыточными тепловыделениями / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов**, Д.В. Ракутина. // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. С. 13 – 17.
5. **Гильмутдинов, А.Ю.** Оптимизация режима эксплуатации системы аэрации блочной ТЭС / А.Ю. Гильмутдинов, В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Тез. докл. – Т.2 – Москва: МЭИ(ТУ) – 2008. – С. 374-375.

6. **Гильмутдинов, А.Ю.** Повышение экономичности энергоблока за счёт утилизации избыточных тепловыделений / А.Ю. Гильмутдинов, В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика Тез. докл. – Т.2 – Москва: МЭИ(ТУ) – 2009. – С. 361.
7. **Гильмутдинов, А.Ю.** Анализ влияния тепловой нагрузки калорифера перед воздухоподогревателем на основные характеристики работы энергоблока / А.Ю. Гильмутдинов, В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина. // Материалы докладов IV международной молодежной науч. конф. «Гинчуринские чтения». – Казань: ГОУ ВПО «КГЭУ», 2009. Т.2. – С. 152-153.
8. Ракутина, Д.В. Математическое моделирование вентиляции промышленных зданий с тепловыделениями / Д.В. Ракутина, **А.Ю. Гильмутдинов.** // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения) Тез. докл. – Т. 2. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина». 2009. – С. 5.
9. **Гильмутдинов, А.Ю.** Разработка методики расчета тепловоздушного режима производственного помещения с избыточными тепловыделениями / А.Ю. Гильмутдинов. // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. трудов. – Вып. 8. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 209 – 214.
10. Бухмиров, В.В. Математическое моделирование конвективного теплообмена в среде «Phoenics» / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов,** Д.В. Ракутина. // Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Энергия 2009» Тез. докл. – Т. 1. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина». 2009 – С. 100 – 101.
11. **Гильмутдинов, А.Ю.** Математическое моделирование системы аэрации главного корпуса ТЭС / А.Ю. Гильмутдинов, В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина. // Материалы докладов V международной молодежной науч. конф. «Гинчуринские чтения». – Казань: ГОУ ВПО «КГЭУ», 2010. Т. 2. – С. 164-165.
12. Бухмиров, В.В. Исследование режимов функционирования системы вентиляции главного корпуса ТЭС на основе математического моделирования / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов,** Д.В. Ракутина. // Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Энергия 2010» Тез. докл. – Т. 1. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина». 2010 – С. 106 – 107.
13. Ракутина, Д.В. Применение программного комплекса «Phoenics» для моделирования системы вентиляции производственных помещений / Д.В. Ракутина, **А.Ю. Гильмутдинов,** В.Ю. Осинцев. // Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Энергия 2010» Тез. докл. – Т. 1. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина». 2010 – С. 118 – 119.
14. Бухмиров В.В. Энергосбережение на основе математического моделирования тепловоздушного режима производственного помещения с избыточными тепловыделениями / В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов,** Д.В. Ракутина // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов: Материалы 5-й международной науч.-практич. конф. – Москва: МИСиС, 2010. – С. 189-194.
15. **Гильмутдинов, А.Ю.** Результаты математического моделирования тепловоздушного режима главного корпуса ТЭС / А.Ю. Гильмутдинов, В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина. // Материалы докладов V международной молодежной науч. конф. «Гинчуринские чтения» . – Казань: ГОУ ВПО «КГЭУ», 2010. Т. 2. – С. 155-156.
16. Бухмиров, В.В. К вопросу определения допустимого количества воздуха, забираемого из главного корпуса ТЭС на технологические нужды // В.В. Бухмиров, **А.Ю. Гильмутдинов,** Д.В. Ракутина. // Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Энергия 2010»: Тез. докл. – Т. 1. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина». 2011 – С. 97 – 98.