

Саклаков Игорь Юрьевич

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ, РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ  
КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

специальности: 25.00.36 - Геоэкология; 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2005

Работа выполнена в Московском государственном строительном университете

Научные руководители: доктор технических наук, профессор

Пермяков Борис Андреевич

доктор технических наук, профессор

Потапов Александр Дмитриевич

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Хаванов Павел Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Пупырев Евгений Иванович

кандидат технических наук

Мелик - Аракелян Аркадий Телемакович

Ведущая организация: Северо-Кавказский государственный

технический университет

Защита диссертации состоится 2 июня 2005 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.138.07 при Московском государственном строительном университете по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, зал Ученого Совета, 1 этаж административного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного строительного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, прошу направлять по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Ученый Совет  
fax: 188-15-87; 261-81-20; e-mail: kanz@mgsu.ru .

Автореферат разослан «27» апреля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Потапов А.Д.-

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современной кризисной экологической обстановке проблемы охраны природы и энерго-, ресурсосбережения являются взаимосвязанными, актуальными и приобретают все большее значение из-за прогрессирующего истощения недр земли и, в первую очередь, топливно-энергетических ресурсов, и существенного загрязнения окружающей среды источниками теплоты топливно-энергетического комплекса.

До настоящего времени потери с теплотой уходящих газов во многих эксплуатируемых теплогенераторах очень велики и составляют до 10%. Снижение этих потерь возможно за счет более глубокого охлаждения уходящих газов, что напрямую ведет к уменьшению расхода топлива, снижению вредных выбросов и теплового загрязнения атмосферы -- одной из наиболее важных геосферных оболочек земли, тесно связанных с другими жизнеобеспечивающими геосферными оболочками как непосредственно, так и косвенно.

Эффективность большинства эксплуатируемых котельных даже при сжигании природного газа составляет около 82-90%. Повышение КПД источников теплоты в РФ на 1% может дать ежегодную экономию условного топлива на 2-3 млн. т. Поэтому улучшение энергетических и экологических показателей теплогенераторов за счет совершенствования конструкции отдельных узлов и, тем более, разработка новых перспективных типов котлов, весьма актуальны и имеют важное экологическое, хозяйственное и социальное значение.

**Цель и основные задачи.** Цель диссертации - на базе геоэкологических принципов экспериментально разработать энергоэффективные, ресурсосберегающие котельные установки с помощью искусственного способа интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях нагрева котлоагрегатов для достижения экономии топлива и снижения выбросов загрязнителей в биотопы антропогенных экосистем.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- выработка геоэкологических принципов разработки и конструирования энергоэффективных, ресурсосберегающих котлоагрегатов;
- анализ геоэкологической обстановки в РФ и ее негативных изменений в такой жизнеобеспечивающей геосферной оболочке, как атмосфера, под влиянием теплоэнергетического комплекса;
- в рамках решения общих геоэкологических проблем выявление возможности сбережения энергоресурсов в теплоэнергетике как больших, так и малых ее производственных мощностях;

- анализ функционирования и оценка эффективности эксплуатируемого в настоящее время оборудования котельных для обоснования необходимости интенсификации процесса теплообмена в конвективных и хвостовых поверхностях нагрева;

- разработка и создание экспериментальной установки для изучения процессов теплоотдачи и аэродинамики при использовании спиральных, проволочных вставок-турбулизаторов на основе специально разработанной методики исследований;

- анализ полученных экспериментальных данных и получение на его базе зависимостей для расчета теплообмена и аэродинамических характеристик поверхностей нагрева котлов со спиральными вставками-турбулизаторами;

- на основе полученных методик расчета предложенного способа интенсификации теплообмена обоснование наиболее рациональных конструкций спиральных турбулизаторов и оценка их эффективности с энергетических, геоэкологических, экономических позиций;

- оценка повышения геоэкологической, энергетической и экономической эффективности теплотехнического оборудования при применении предложенного способа интенсификации теплообмена с учетом уменьшения расхода топлива и объема выбросов загрязнителей в элементы биотопа антропогенных экосистем и прежде всего в атмосферу;

- разработка «Рекомендаций по практическому применению способа интенсификации теплообмена с помощью проволочных турбулизаторов» с целью повышения энергетической эффективности и геоэкологической безопасности котлов различной мощности.

**Методика выполнения исследований.** Анализ литературы и фондовых источников по задачам энергоэффективности и ресурсосбережения при выработке и использовании энергии в антропогенных экосистемах в рамках общей геоэкологической проблемы - обеспечения гомеостаза экосистем за счет стабилизации биотопов и снижения негативного воздействия на них энергоустановок с целью выработки принципов конструирования теплогенераторов в геоэкологически безопасном режиме. Аналитическое обобщение отечественных и зарубежных исследований в области повышения эффективности теплообмена в различных элементах котельных установок. Экспериментальное исследование на разработанной лабораторной установке. На базе эксперимента получены аналитические зависимости с оценкой степени их достоверности, обеспеченной корректностью поставленной задачи, обоснованным выбором метода исследования и конструкции лабораторной установки. Экспериментальные исследования

проводились с помощью приборов, отвечающих действующим нормативным документам и стандартам РФ. Всего было проведено 60 опытов, при которых получены конкретные значения экспериментальных данных. Конкретные численные значения полученных экспериментальных данных и предлагаемых расчетных зависимостей контролировались сходимостью с опубликованными данными исследований процессов с близкими характеристиками. Практическое внедрение спиральных турбулизаторов показало сходимость полученных результатов с расчетными зависимостями диссертации с доверительным интервалом  $\pm 5\%$ .

### ***Научная новизна работы.***

- Сформулированы геоэкологические принципы конструирования энергоэффективных, ресурсосберегающих теплогенераторов;

- разработаны и теоретически обоснованы методики интенсификации теплообмена, исследована аэродинамика газовых потоков в конвективных поверхностях котлов в целях сбережения энергоресурсов за счет повышения теплоотдачи как способа обеспечения геоэкологической безопасности теплогенерирующих установок;

- теоретически обоснована, экспериментально и практически подтверждена возможность и целесообразность повышения экологического и технико-экономического уровней теплогенераторов;

- опытным путем и по результатам обработки получены расчетные зависимости для расчета теплоотдачи и аэродинамики газовых потоков в конвективных поверхностях нагрева при применении проволочных турбулизаторов.

### ***Основные защищаемые положения диссертации:***

В соответствие с поставленной целью и сформированными задачами на защиту выносятся следующие полученные результаты:

1. Определены геоэкологические принципы, которые необходимо учитывать при конструировании энергоэффективных, ресурсосберегающих теплогенераторов.

2. Выполнено теоретическое обоснование методики и способа интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях котлоагрегатов в целях обеспечения геоэкологической безопасности городских экосистем.

3. Разработаны методика экспериментального исследования и лабораторная установка, сконструированная для решения поставленных задач по применению спиральных турбулизаторов в целях интенсификации теплообмена.

4. Получены расчетные зависимости и методики расчета аэродинамики газовых потоков и теплообмена в конвективных поверхностях нагрева при применении спиральных турбулизаторов, область их применения.

5. Обосновано снижение объема потребляемых энергоресурсов и повышение эффективности работы теплогенераторов с уменьшением объема выбрасываемых загрязнителей в целях обеспечения геоэкологической безопасности атмосферы.

**Практическая значимость диссертации.** Теоретически обоснованное, проверенное расчетами и практикой проектное решение, базирующееся на интенсификации теплообмена в конвективных и хвостовых поверхностях нагрева теплогенераторов с помощью спиральных вставок-турбулизаторов, позволяет существенно повысить энергоэффективность котлоагрегата (при мощности 209,34 кВт повышение КПД до 1,2%), что приводит к соответственной экономии топлива котельными установками и к положительным эффектам снижения теплового загрязнения и уменьшения объемов выбросов в атмосферу токсичных продуктов сгорания топлива.

По результатам диссертации спроектированы вставки-турбулизаторы в конвективную часть водогрейных, жаротрубно-дымогарных котлов типа КВа мощностью 0,25 - 2,5 мВт, с температурой воды до 115 °С. В настоящее время ООО «ЭКОЛОГИЯ - ТЕРМО» наладило серийное производство данных котлов для нужд отопления как жилищно-бытового так и производственного секторов. КПД данных котлов достигает 92%.

«Рекомендации по практическому применению способа интенсификации теплообмена с помощью проволочных турбулизаторов» подготовлены к опубликованию, а их материалы используются в учебном процессе кафедр «Инженерная геология и геоэкология» и «Теплотехника и котельные установки» МГСУ.

**Апробация диссертации:** Основные результаты работы опубликованы в 8-ми научных статьях, в том числе и в рекомендованном ВАК РФ журнале «Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века». Материалы диссертации докладывались на 54-й научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов (Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2000), межрегиональной конференции «Студенческая наука - экономике научно-технического прогресса» (Ставрополь, Сев-КавГТУ, 2000), пятой научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов «Строительство - формирование среды жизнедеятельности» (Москва, МГСУ, 2002), второй международной седьмой межвузовской научно - практической конференции молодых ученых аспирантов и докторантов «Строительство - формирование среды жизнедеятельности» (Москва, МГСУ, 2004).

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 частей, 16

параграфов, заключения и списка литературы из 134 наименований. Работа изложена на 132 страницах, содержит 20 таблиц и 25 рисунков.

Автор благодарит преподавателей А.И. Воронина, Н.И. Стоянова, В.А. Костина, Гейвандова И.А. и всех сотрудников кафедры «Теплотехника» СевКавГТУ, вложивших духовные силы в моё образование, где получил профессию инженера и начал заниматься научными исследованиями. Автор выражает глубокую благодарность своему первому научному руководителю, ныне покойному, профессору д. т. н. Б.А. Пермякову, заложившему основу исследований. Искренняя признательность научному руководителю зав. каф. ИГиГЭ МГСУ профессору д. т. н. А.Д. Потапову за огромную помощь, моральную поддержку, приложившему усилия к завершению диссертации, отдельная благодарность научному консультанту зав. каф. ТКУ МГСУ профессору д.т.н. П.А. Хаванову за ценные советы. Автор благодарит всех сотрудников кафедр «Инженерная геология и геоэкология» и «Теплотехника и котельные установки» МГСУ за помощь, ценные замечания и советы, позволившие подготовить диссертацию к защите.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, представлена научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, данные о теоретической, практической значимости, а также об апробации научных результатов.

**Первая глава** - *«Теплоэнергетический комплекс РФ: состояние, влияние на жизнеобеспечивающие факторы окружающей среды и перспективы развития»* посвящена обзору отечественной зарубежной литературы, постановке задач исследования.

**В первом параграфе** - *«Геоэкологическое влияние теплоэнергетического комплекса на загрязнение атмосферы и оценка топливного баланса»* рассмотрены основные виды техногенных загрязнений биотопов и биоценозов теплоэнергетическим комплексом РФ при сжигании органического топлива. Проанализирован топливный баланс РФ и его перспектива.

Запасы органического топлива - основы энергетики истощаются, и по оценкам аналитиков мировых запасов нефти хватит примерно на 40-50 лет, природного газа на 60-70 лет, угля на 150 лет. В сложившейся эколого-энергетической кризисной ситуации (окружающая среда предельно загрязнена, ископаемые на грани исчерпания, а альтернативные источники энергии не обеспечивают необходимых мощностей) необходимо осуществить глобальный

переход от реализовавшейся концепции неограниченного промышленного роста и ориентации на ценности общества потребления к устойчивому развитию и ориентации на энергосбережение.

Удельные выбросы загрязняющих веществ при сжигании различных видов топлива

Вид топлива	Загрязняющие вещества (кг/т.у.т.)						
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	зола, пыль	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Бурый уголь	3200-3300	14-55	4,0-6,0	5,0-25	3,0-10	70-100	-
Каменный уголь	2600-2700	14-55	2,5-7,5	1,5-8,0	0,78-1,16	60-80	-
Торф		14-55	До 30	1,4-4,4	до 7	до 80	-
Дрова		60-80	До 20	0,5-0,6	9,5-15	до 55	-
Мазут	1900-2250	3-3,5	1,8-5,0	15-40	2,0-5,0	2,0-4,0	0,2-16
Природный газ	1600-1700	3-7,5	1,3-4,5	1,4-4,4	0,4-0,9	0,05-0,2	-

Во втором параграфе - «*Геоэкологическая оценка ТЭК в России и перспективы развития в нем ресурсосбережения*» проанализированы состояние теплоэнергетического комплекса РФ, эффективность потребления тепловой энергии и перспективы развития энергоресурсосбережения. Проанализирован путь перестройки теплоснабжения за счет автономных источников тепла, обоснована необходимость разработки и производства энергосберегающих котлов малой мощности.

В России до сих пор энергия и топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) используются расточительно. Удельный расход ТЭР на единицу валового национального продукта в России в 3-4 раза выше, чем в индустриально развитых странах. Именно поэтому разработанная в последние годы новая энергетическая стратегия РФ предусматривает различные направления устойчивого и надежного обеспечения населения и предприятий топливом, тепловой и электрической энергией при первостепенном значении повышения эффективности использования ТЭР.

Потенциал энергосбережения в России огромен - он составляет более 500-550 млн. т.у.т., в том числе - в ТЭК 150-180 млн. т.у.т.. Использование энергосберегающих технологий требует меньших затрат, чем строительство новых мощностей: на производство каждой тонны условного топлива требуется в 3-4 раза больше инвестиций, чем на ее сбережение.

Практика показала, что унаследованная от СССР техника централизованного теплоснабжения не обеспечивает ожидаемого эффекта энергоресурсосбережения в жилищно-бытовом секторе. Более того, ее эффективность существенно уступает



зарубежным образцам. Более того, частые аварии вследствие физического износа 20-30 летнего оборудования (потери в теплосетях за 2001 г - 30%) существенно повышают стоимость тепловой энергии. Это приводит к все большему распространению альтернативных, высокоэффективных, децентрализованных систем теплоснабжения в местах, где они востребованы благодаря лучшим техническим и экономическим показателям.

При все большей тенденции децентрализации теплоснабжения разработка и изготовление новых перспективных теплогенераторов малой мощности полной заводской готовности с высокими теплотехническими показателями весьма актуальны и имеют важное экологическое, хозяйственное и экономико-социальное значение. Кроме того, наличие такого рода разработок полностью корреспондирует с международной экологической политикой (Киотское соглашение) и повышают геоэкологическую безопасность строительных систем.

**В третьем параграфе - «Оценка технического уровня котлов, наиболее распространенных в практике теплоэнергетики»** рассмотрен парк котельного оборудования РФ и его низкая энергоэффективность. Обоснована реконструкция существующих котлов с целью повышения КПД, уменьшения расхода топлива, снижения вредных выбросов.

Во второй половине XX века в нашей стране появился ряд стальных водотрубных паровых и водогрейных котлов, которые хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации. Это паровые котлы типа ДКВР, ДЕ, КЕ, Е и водогрейные котлы ПТВМ, КВ-ГМ. Учитывая низкие цены на топливо в те годы, котлы проектировались с достаточно высокими температурами уходящих газов и, следовательно, высокими потерями с уходящими газами, КПД указанных котлов существенно ниже, чем у энергетических и лучших зарубежных котлов из-за относительно высоких температур уходящих газов.

В целом современный парк котлов морально и физически устарел, необходим более глубокий «съем» теплоты уходящих газов, однако реальных разработок и внедрений до настоящего времени явно недостаточно и проблема эта очень актуальна, т.к. в настоящее время в стране находится, ориентировочно, в эксплуатации следующее количество котлов: ДКВР, ДЕ, КЕ — 68000; водогрейные стальные (КВ-ГМ, ПТВМ, ТВГ и др.) — 6500; КВ-300, КВ-300М и др. — 32000; чугунные — 420000.

В связи с этим в части рассмотрения проблематики усовершенствования котельных установок целесообразной является реконструкция существующих

котлов с минимальными переделками в конструкциях, что означает минимальные капиталовложения.

**В четвертом параграфе - «Анализ методов повышения энергетической и экологической эффективности котлоагрегатов»** рассмотрены пути совершенствования котельного оборудования и методы интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях нагрева котлоагрегатов. Проанализированы труды предшественников. Обоснован малозатратный, простой и эффективный метод интенсификации теплообмена посредством установки спиральных турбулизаторов в конвективные части теплогенераторов, позволяющий повысить КПД, снизить расход топлива, уменьшить вредные выбросы в атмосферу.

Из рассмотрения литературных данных можно сделать вывод, что при всём многообразии методов интенсификации внутреннего теплообмена (шнековые вставки, спиральные канавки, кольцевые выступы, пережимы и др.) они в большинстве своём сопряжены с повышением трудоёмкости данных работ, ухудшением технологических свойств труб и, соответственно, увеличением капитальных затрат. Как один из наиболее простых и дешевых в изготовлении, был выбран способ интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях - установка проволочной спирали.

Однако точный расчет теплообмена и аэродинамики в теплообменниках с проволочными спиральными турбулизаторами затруднён, т.к. неясно влияние диаметра проволоки и расстояния между витками проволочной спирали. В литературе нет четких расчетных формул для определения интенсивности теплообмена и аэродинамического сопротивления в теплообменниках (стеклянных и металлических воздухоподогревателях экономайзерах и пр.) при установке проволочных турбулизаторов, поэтому необходимы дальнейшие исследования теплообмена и аэродинамики проволочных вставок - турбулизаторов.

**В пятом параграфе «Модель гомеостатического функционирования котельной установки как природно-техногенной системы. Учет геоэкологических принципов при конструировании теплогенераторов»** котельная установка рассмотрена как природно-техногенная система (ПТС). Установлено, что за счет управляющих действий человека ПТС может функционировать в пределах гомеостаза. Выделены геоэкологические принципы конструирования геоэкологически безопасных котельных установок.

Имеет смысл соотнести формирование, функционирование и последствия теплоэнергетического комплекса с понятием гомеостаза инженерных систем строительных конструкций (антропогенных экосистем). ТЭК - теплоэнергетический

комплекс и по цели своего создания и по результатам деятельности аналогичен природно-техногенной системе (ПТС). А следуя логике В. И. Осипова, А.Д. Потапова, ТЭК применительно к геоэкологической среде, т. е. биотопу должен создаваться как экологически совместимая ПТС в модифицированной инженерной системе. Возникающее воздействие такой системы и соответствующие реакции природной среды при обеспечении геоэкологической безопасности формируют состояние устойчивого динамического равновесия - гомеостаза инженерных систем за счет управляющих действий человека, в данном случае путем модернизации котельной установки. С использованием метода А. Д. Потапова (рис. 1.2.) определены компенсационные возможности среды и системы, показана зона гомеостатического плато, реализующаяся за счет управляющих действий человека и компенсационных возможностей. Выявлены зоны стресса и разрушения, роста воздействий, как на среду, так и на систему и снижения (или отсутствия) их компенсационных возможностей.

Воздействия ПТС на окружающую среду в определенной степени могут быть скомпенсированы собственно этой средой - её абиотическими факторами. Однако компенсирующих возможностей при активном техногенезе, например, в условиях города, к сожалению недостаточно. Кроме того, ряд загрязнителей, которые могли бы быть скомпенсированы биотической составляющей экосистемы, сами активно воздействуют на биоценозы, снижая и угнетая их компенсационные возможности, особенно в городских условиях. Таким образом, компенсационных возможностей среды при эксплуатации рассматриваемой ПТС оказывается недостаточно.

При рассмотрении компенсационных способностей природно — техногенной системы - котельной установки выявляется ряд возможностей уменьшить негативное воздействие на биотопы и биоценозы рассматриваемой экосистемы за счет управляющих действий человека.

Анализ вышеизложенных данных первой главы диссертации позволяет выделить несколько геоэкологических принципов конструирования геоэкологически безопасных котельных установок:

1. Используемое оборудование котельных должно отвечать современным требованиям высокой энергоэффективности. Котлоагрегаты должны работать с максимальным теплосъемом и минимальными потерями энергии при её выработке, обеспечивая высокий КПД котельной установки и принцип ресурсосбережения.

2. Стремиться минимизировать выбросы загрязняющих веществ в биотопы даже при соблюдении ПДК по отдельным загрязнителям. При превышении ПДК принимать соответствующие меры и устройства по их снижению.

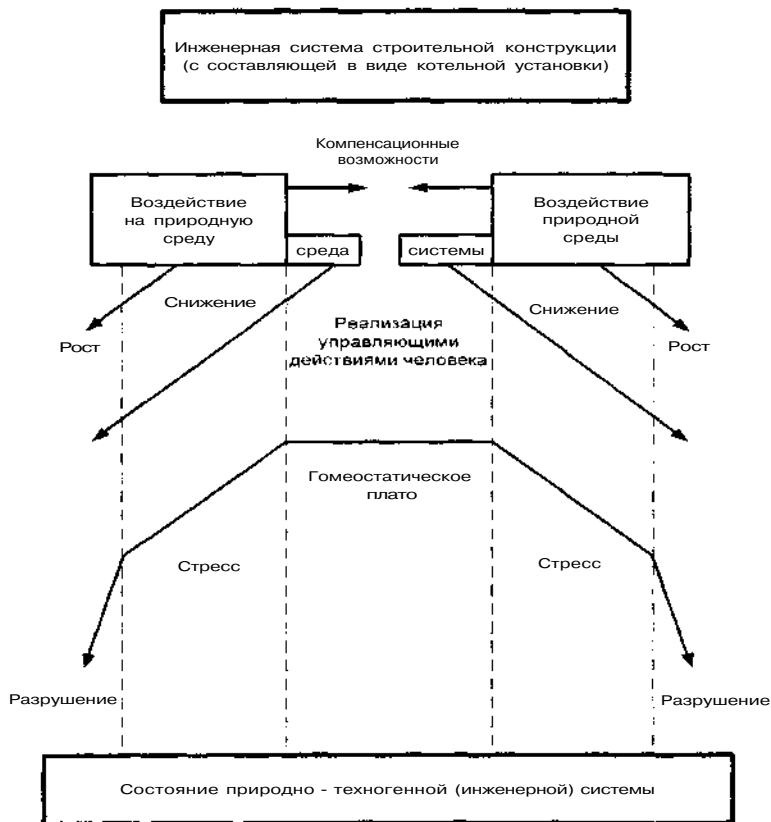


Рис. 1.2. Модифицированная инженерная система строительной конструкции низкого иерархического уровня (котельная установка)

3. Стремиться минимизировать физические (тепловое, звуковое и т.д.) воздействия на биотоп и биоценоз.

4. При выборе вида топлива руководствоваться принципом: чем сложнее экологическая ситуация, тем более «чистое» в экологическом отношении топливо, и наоборот. В целом стремится обеспечить использование топлива в рамках топливного баланса РФ. Так, например, использование природного газа приоритетно в местах с большим скоплением людей и высоким уровнем техногенеза, использование твердых топлив приоритетно в удалённых от жизни людей районах на крупных ТЭС.

5. Повышение до современных требований высокой энергоэффективности и геоэкологической безопасности действующих котлоагрегатов требующих модернизации в частности путем установки спиральных турбулизаторов, при

необходимости перевод котельных установок на другие виды топлива и смены схемы теплоснабжения (с централизованной на децентрализованную и наоборот).

При конструировании котельных установок в соответствие с данными геоэкологическими принципами можно добиться функционирования ПТС в рамках гомеостатического плато.

**Вторая глава - «Разработка методики исследования, его проведение на сконструированной экспериментальной установке, обработка полученных данных»** посвящена описанию разработанной экспериментальной установки, плана эксперимента, методики исследований и измерений, обработки опытных данных.

**В первом параграфе - «Рассмотрение совокупности моделирования и подобия физических процессов»**) обосновывается необходимость экспериментального метода исследования. Описаны метод моделирования и понятие о физическом подобии процессов, которые в совокупности позволяют добиться поставленной цели диссертации, описать изучаемые процессы при минимальном количестве опытов благодаря правильному планированию эксперимента.

Конвективный теплообмен, изучаемый в данной работе, представляет сложный физический процесс, который описывается системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности с большим числом переменных. Попытки аналитического решения этой системы уравнений встречают серьезные трудности. К настоящему времени точные решения найдены лишь для единичных частных случаев и базируются в большинстве случаев на разработке математических моделей для ЭВМ и их решения методами математической физики. Вследствие этого на первое место выдвигается экспериментальный путь исследований. Это объясняется тем, что при постановке задачи множество физических величин является заведомо неизвестным, может быть определено только при помощи лабораторных испытаний на моделях.

В соответствие с правилами моделирования, спроектирована и сконструирована экспериментальная установка. На основе теории подобия был разработан и обоснован план эксперимента, подразумевающий исследование теплоотдачи и аэродинамики в трубе с изменяющимися скоростью и геометрией канала по средствам установки спиральных вставок с различными относительными шагами спирали ( $S/d$ ). При составлении плана эксперимента изменение числа Рейнольдса ( $Re$ ) варьировалось в области развитого турбулентного течения и максимально приближалось к натурным условиям скоростного режима в конвективных поверхностях нагрева котлов. Изменения геометрических размеров

вставок-турбулизаторов планировались с учетом пробных опытов и анализа предшествующих исследований с целью получения максимального теплосъема при минимальном увеличении аэродинамического сопротивления.

Во втором параграфе - «Описание экспериментальной установки» описана конструкция экспериментальной установки, приведены геометрические размеры применяемых спиральных турбулизаторов, и описана методика установки их внутри трубы.

Поочередно применялись 12 вставок-турбулизаторов, выполненных из проволоки с диаметром ( $d$ ) 1,6; 2; 3 мм. Шаг между соседними витками спирали ( $S$ ) вставок-турбулизаторов варьировался таким образом, чтобы получить относительные шаги ( $S/d$ ) 5,10,15,20 для каждого диаметра вставки.

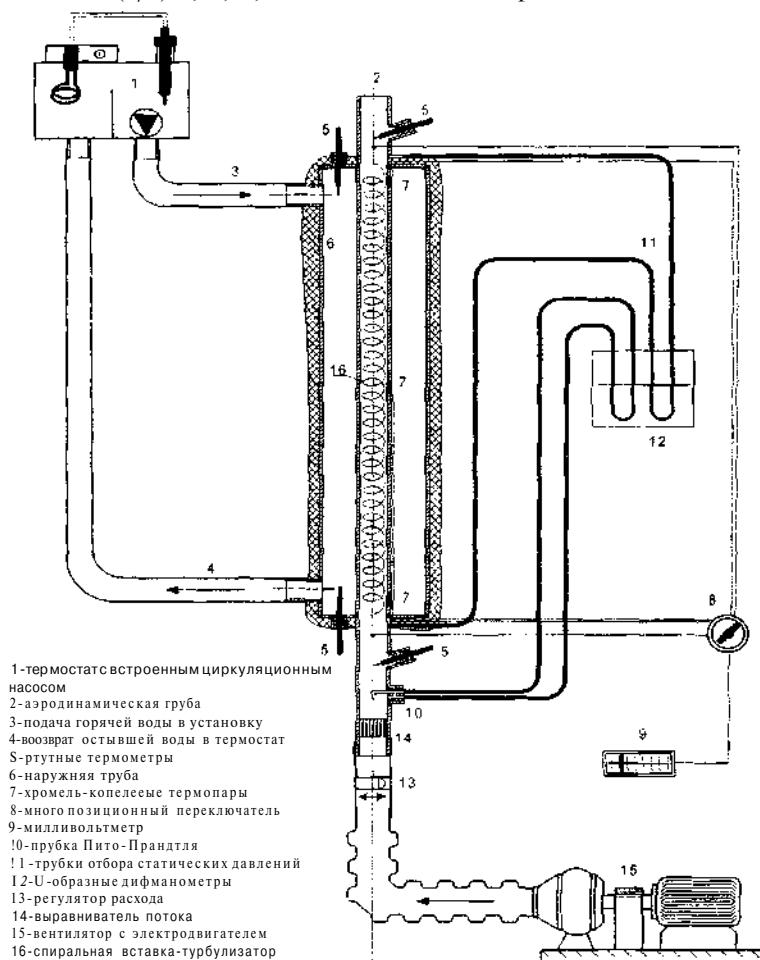


Рис. 2.1 Схема экспериментальной установки

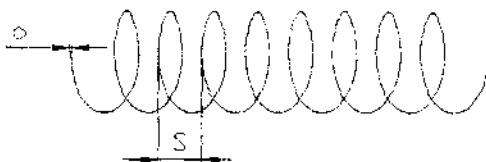


Рис. 2.2. Принципиальная схема вставок-турбулизаторов

В третьем параграфе - «*Схема и методика получения результатов испытаний на разработанной установке, используемые приборы, область исследования*» была описана подготовка установки к проведению опытов, дана принципиальная схема измерений, описаны измерительные приборы и их погрешности, приведена область изменения исследуемых параметров. Описана методика определения потерь в теплообменном участке и установлена их величина.

Перед проведением основных опытов были исследованы теплообмен и сопротивление гладкой трубы (без установки турбулизаторов). Опыты показали, что экспериментальные данные для гладкого канала хорошо согласуются с литературными данными и описываются зависимостями по теплообмену:  $Nu=0,02 Re^{0,8}$  - с отклонением экспериментальных данных +2%, по аэродинамике:  $\zeta=0,316 Re^{-0,25}$  - с отклонением экспериментальных данных +10. Здесь:  $Nu$  - критерий Нуссельта,  $Re$  - критерий Рейнольдса,  $\zeta$  - коэффициент аэродинамического сопротивления.

В четвертом параграфе - «*Обработка и анализ экспериментальных данных*» приведены методики обработки опытных данных при изучении теплоотдачи внутри аэродинамической трубы (со стороны воздуха), обработки опытных данных при изучении теплоотдачи снаружи аэродинамической трубы (со стороны воды) экспериментальной установки, определения коэффициента теплопередачи через стенку аэродинамической трубы, обработки опытных данных при изучении аэродинамики, проверки правильности выполненных расчетов.

В пятом параграфе - «*Оценка погрешностей всех измерений*» рассчитаны погрешности всех измеряемых и рассчитываемых величин, необходимых для изучения теплообмена и аэродинамики в данном эксперименте.

Третья глава - «*Результаты исследования тепловых и аэродинамических характеристик трубы со спиральными вставками-турбулизаторами*» здесь представлены результаты обобщения экспериментальных данных в виде критериальных зависимостей с построенными по ним графиками.

В первом параграфе - «*Методика обобщения опытных данных, результаты применения вставок-турбулизаторов*» представлены результаты

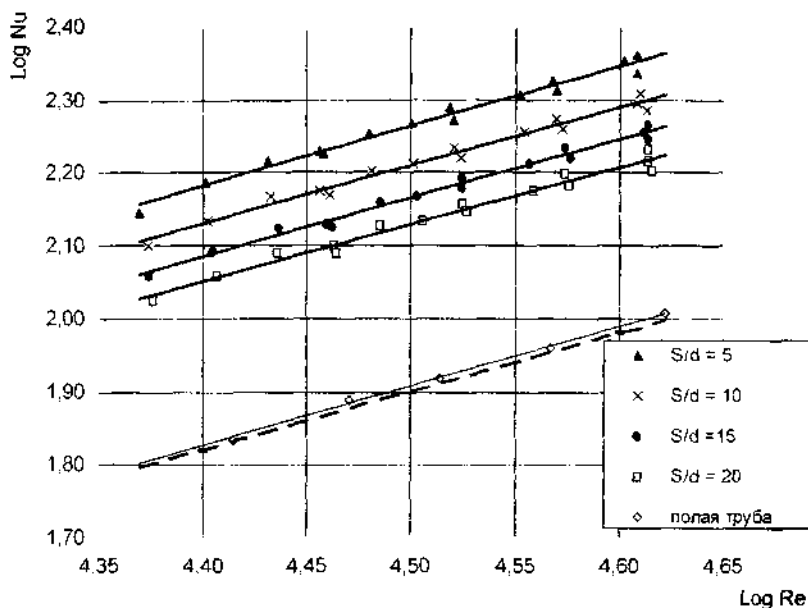


Рис. 3.5. Повышение теплоотдачи для турбулизаторов с разными  $S/d$  в зависимости от числа  $Re$

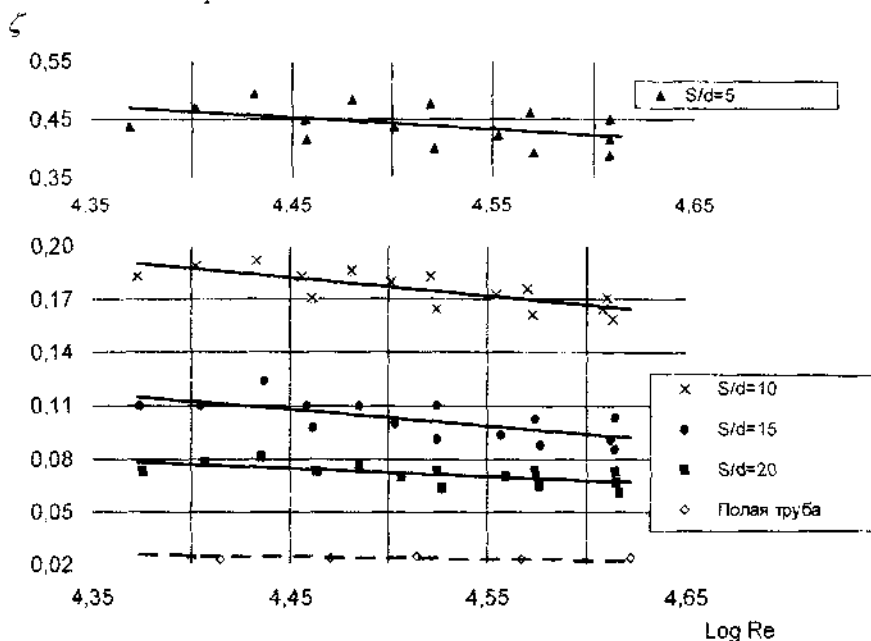


Рис. 3.7. Повышение аэродинамического сопротивления для турбулизаторов с разными  $S/d$  в зависимости от  $Re$



испытаний теплообмена и аэродинамики в трубе при применении спиральных вставок - турбулизаторов в виде отдельных критериальных зависимостей  $Nu = A \cdot Re^n$ ,  $Nu = C \cdot (S/d)^k$ ,  $\xi = B \cdot Re^m$ ,  $\xi = E \cdot (S/d)^h$  для каждой вставки и общих, для вставок с одинаковым  $S/d$ . Полученные значения критериев  $Nu$ ,  $Re$  и  $\xi$  наносились на графики в логарифмическом масштабе в виде зависимостей:  $Ig Nu = f_1(Ig Re)$ ,  $Ig Nu = f_2(Ig(S/d))$ ,  $\xi = f_3(Ig Re)$ ,  $\xi = f_4(Ig(S/d))$ . Показатели степени  $k$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $h$  в критериальных уравнениях  $Nu = A \cdot Re^n$ ,  $Nu = C \cdot (S/d)^k$ ,  $\xi = B \cdot Re^m$  и  $\xi = E \cdot (S/d)^h$  определялись расчетом на основании математической обработки опытных данных с применением ПЭВМ и характеризуются тангенсом угла наклона соответствующей прямой к оси абсцисс, а постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $E$  находились из соотношения для любой точки соответствующей прямой:  $A = Nu/Re^n$ ,  $B = \xi/Re^m$ ,  $C = Nu/(S/d)^k$ ,  $E = \xi/(S/d)^h$

Из рисунков 3.5, 3.7. видно, что для вставок с  $S/d$  5, 10, 15, 20 теплоотдача по отношению к гладкой трубе увеличилась соответственно в 2,28; 2; 1,81; 1,68 раза, аэродинамическое сопротивление по отношению к гладкой трубе увеличилось соответственно в 17,6; 7,1; 4,5; 2,8 раза. В таблицы 3.1, 3.3. сведены результаты по исследованию теплоотдачи и аэродинамики трубы с проволочными вставками.

Таблица 3.1.

Результаты обработки опытных данных по теплообмену для вставок-турбулизаторов с различными  $S/d$

Относительный шаг $S/d$	$Nu = A \cdot Re^n$ ; $4,2 \cdot 10^4 > Re > 2,5 \cdot 10^4$		Увеличение $Nu$ , %
	$A$	$n$	
5	0,046	0,8	228
10	0,041	0,8	200
15	0,037	0,8	181
20	0,034	0,8	168

Таблица 3.3.

Результаты обработки опытных данных по аэродинамике для трубы с различными вставками-турбулизаторами  $S/d$

Относительный шаг $S/d$	$\xi = B \cdot Re^m$ ; $4,2 \cdot 10^4 > Re > 2,5 \cdot 10^4$		Увеличение $\xi$ , %
	$B$	$m$	
5	3,51	-0,2	1760
10	2,35	-0,25	710
15	32,29	-0,3	450
20	1,07	-0,27	280

Во втором параграфе - «Результаты обобщения опытных данных»

предлагаются обобщенные аналитические зависимости обработки опытных данных в виде  $Nu = f(Re, S/d)$  и  $\xi = f(Re, S/d)$ . Обработка данных по теплообмену показала, что теплоотдача в пределах изменения параметров, имевших место в опытах ( $20 > S/d > 5$ ;  $42000 > Re > 25000$ ), с доверительным интервалом  $\pm 4,7\%$  и вероятностью 98,3% описывается обобщающей аналитической зависимостью:

$$Nu = 0,064 Re^{0,8} (S/d)^{-0,22};$$

Анализ данных по аэродинамическим сопротивлениям показал, что аэродинамика газовых потоков в пределах изменения параметров, имевших место в опытах ( $20 > S/d > 5$ ;  $42000 > Re > 25000$ ), с доверительным интервалом  $\pm 10\%$  и вероятностью 86,8 % описывается обобщающей аналитической зависимостью:

$$\xi = 67,7 Re^{-0,29} (S/d)^{-1,28}$$

Полученные расчетные зависимости позволяют достаточно просто оценить увеличение теплоотдачи и аэродинамического сопротивления газового потока при применении спиральных вставок — турбулизаторов с различными геометрическими характеристиками, и на основе оценки подобрать наилучший вариант геометрии вставки для конкретной технической задачи. Полученные расчетные зависимости рекомендуются при подборе спиральных турбулизаторов для конвективных и хвостовых поверхностей нагрева теплогенераторов.

**В четвертой главе - «Геоэкологическая оценка результатов усовершенствованных котельных установок»** даны рекомендации по внедрению проволочных турбулизаторов и показаны результаты внедрения проволочных турбулизаторов.

**В первом параграфе - «Практические рекомендации по использованию предложенных турбулизаторов в котлоагрегатах и сравнительный анализ с аналогичными разработками»** рассмотрены перспективные области применения проволочных турбулизаторов как при проектировании новых ресурсосберегающих, так и при реконструкции старых теплогенераторов с целью более эффективного сжигания топлива и уменьшения вредного воздействия на биогеоценозы.

В сжившихся условиях децентрализации особенно перспективны жаротрубно-дымогарные котлы, они нетребовательны к качеству воды, обладают большой аккумулирующей способностью, относительно просты в конструкции и эксплуатации и, при правильном сжигании топлива экологичны. Однако использование их возможно лишь при условии применения специальных методов и устройств интенсификации теплообмена в конвективной части, в противном случае, как показал опыт, достижение необходимой экологичной и экономической работы

невозможно. Это означает, что спиральные вставки-турбулизаторы необходимы при разработке новых конструкций дымогарных котлов в России.

При реконструкции существующих котлов спиральные турбулизаторы устанавливаются внутри труб воздухоподогревателя или водяного экономайзера.

Одним из направлений по избежанию коррозии, позволяющих снизить потери теплоты с уходящими газами, содержащими пары серной кислоты, было применение поверхностей нагрева из коррозионно-стойких материалов и в первую очередь из стеклянных труб. Основным недостатком стеклянных воздухоподогревателей (СВП) является громоздкость конструкции. Расчеты показывают, что установка проволочных спиралей внутрь стеклянной трубы СВП позволяет повысить теплоотдачу в 1,3-1,6 раза, что существенно снижает массогабаритные характеристики, уменьшает длину труб СВП (не рекомендуется применять стеклянные трубы длиной более 2,5 м). Установлено, что внедрение стеклянных воздухоподогревателей со спиральными вставками повышает КПД котла на 1,5-4,0 %. При этом на холодной поверхности воздухоподогревателя связывается золовыми отложениями до 35 % оксидов ванадия и 25% оксидов серы (шахматный пучок) или 15 %, оксидов ванадия и 15 % оксидов серы (коридорный пучок), соответственно происходит снижение выбросов этих веществ в атмосферу.

**Во втором параграфе - «Реконструкция котлоагрегатов путем установки спиральных турбулизаторов внутрь воздухоподогревателей. Методика расчета изменения энергетических показателей»** представлена оценка

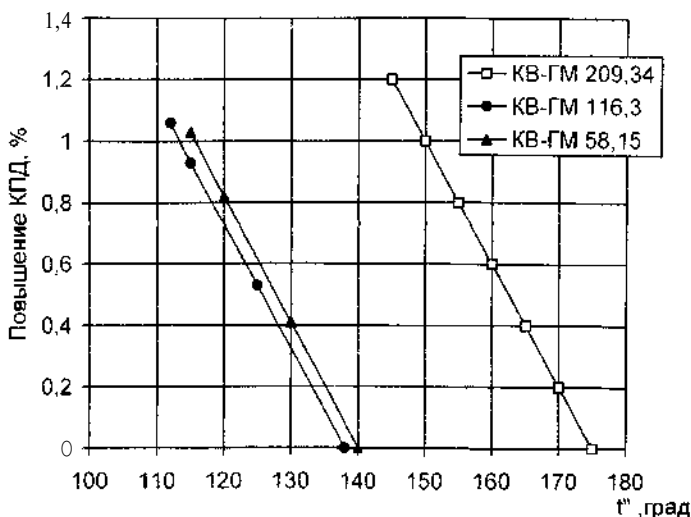


Рис.4.2. Зависимость повышения КПД котла от температуры уходящих газов

эффективности установки спиральных вставок-турбулизаторов с различными S/d в трубы воздухоподогревателей на примере водогрейных котлов КВ-ГМ 58,15; 116,3; 209,34.

Графически показан потенциальный резерв экономии топлива котлов КВ-ГМ посредством снижения температуры уходящих газов. Разработана методика расчета воздухоподогревателей при установке спиральных вставок-турбулизаторов. Показаны энергетические результаты реконструкции в виде увеличения КПД и электрической мощности дутьевого вентилятора, уменьшения расхода топлива и электрической мощности дымососа.

Расчеты показали, что установка вставок - турбулизаторов с относительным шагом S/d - 5 несмотря на большую экономию топлива (до 1,31 %), приводит к значительному увеличению потребления электрической энергии (до 144,4%) дутьевым вентилятором на прокачку воздуха через трубы воздухоподогревателя с установленными вставками, из-за увеличения аэродинамического сопротивления газового потока в 17,6 раз. Поэтому установка этих вставок возможна лишь при замене вентилятора более мощным, что приводит к значительным дополнительным затратам на закупку и установку вентилятора. В связи с этим применительно к данной технической задаче установка вставок - турбулизаторов с S/d = 5 признана неэффективной.

**В третьем параграфе - «Оценка экономической эффективности»** на примере котлов КВ-ГМ 58,15; 116,3; 209,34 автором были проведены расчеты экономической эффективности установки вставок-турбулизаторов с различными S/d в трубы воздухоподогревателей.

Суммарный экономический эффект (тыс.руб./год) при применении вставок-турбулизаторов рассчитывался следующим образом:

$$C_{\Sigma K} = \Delta C_{\text{топ}} + \Delta C_{\text{э, дым}} - \Delta C_{\text{э, вент}} - C_{\text{монт}}$$

где:  $\Delta C_{\text{топ}}$  - стоимость сэкономленного топлива, тыс.руб./год;  $\Delta C_{\text{э, дым}}$  - стоимость сэкономленной электроэнергии, потребляемой дымососом, тыс.руб./год;  $\Delta C_{\text{э, вент}}$  - увеличение затрат на закупку электроэнергии, потребляемой дутьевым вентилятором, тыс.руб./год;  $C_{\text{монт}}$  - затраты на изготовление и монтаж турбулизаторов, тыс.руб. Рассчитаны и графически показаны: снижение потребления газа, экономия затрат на закупку газа.

**В четвертом параграфе - «Оценка геоэкологической эффективности»** на примере тех же котлов были выполнены расчёты по оценке значений уменьшения выбросов в атмосферу CO, NO и снижения теплового загрязнения атмосферы при сжигании природного газа, по следующей методике: количество окиси углерода

$M_{CO}$ , выбрасываемого в атмосферу котлом, уменьшается и определяется по формуле, кг/с:

$$M_{CO} = 0,001 C_{CO} B_p^{umt} (1 - q_4/100);$$

$$C_{CO} = q_3 R Q_p''/1,013;$$

где:  $C_{CO}$  – удельный выброс окиси углерода при сжигании топлива на 1 мДж теплоты, г/мДж;  $q_3$  – потери тепла от механической неполноты сгорания, %;  $R$  – коэффициент, учитывающий потери вследствие химической неполноты сгорания.

Уменьшается и количество выделяемых окислов азота  $M_{NO}$ , которое определяется, кг/с:

$$M_{NO} = 0,001 Q_p'' B_p^{umt} K_{NO};$$

где:  $K_{NO}$  – удельный выброс окислов азота при сжигании топлива на 1 мДж теплоты, г/мДж, для водогрейных котлов работающих на газе равен:

$$K_{NO} = 0,013 \sqrt{Q_K} + 0,03$$

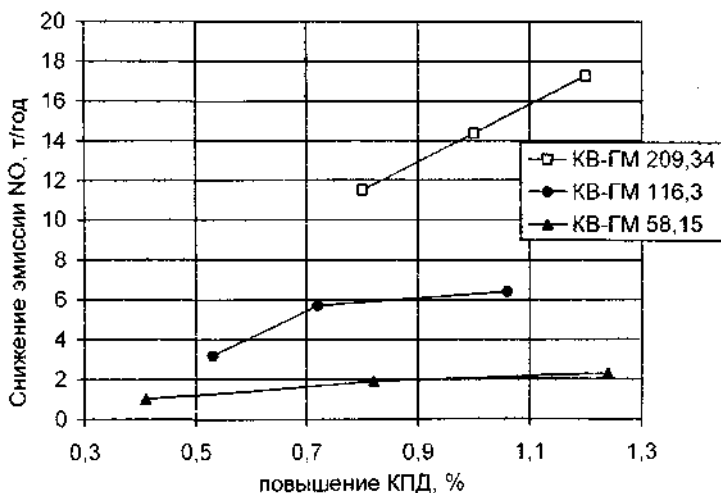


Рис. 4.5. Годовое уменьшение эмиссии NO в зависимости от повышения КПД котла

Приводимые материалы достаточно ясно иллюстрируют технические и экологические возможности и эффективность охлаждения продуктов сгорания в водогрейных котлах типа КВ-ГМ при использовании спиральных вставок-турбулизаторов.

Представляется, что удалось найти один из простых и эффективных элементов управляющих действий человека, позволяющих снизить возможность перехода антропогенных экосистем в зону стресса. Следует отметить, что модификация котельных установок, их частей в существенной степени оказывает влияние на состояние биотопов, их характеристик и опосредственно на биоценозы, исходя из

важнейшего экологического принципа: «мыслить глобально - действовать локально».

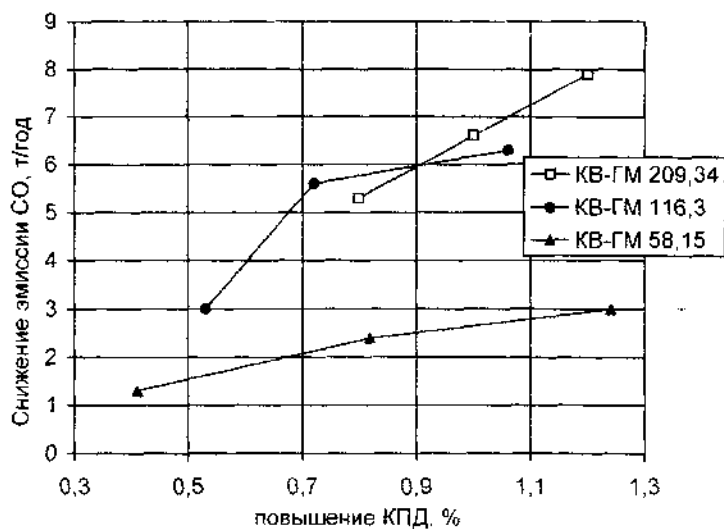


Рис. 4.6. Годовое уменьшение эмиссии CO в зависимости от повышения КПД котла

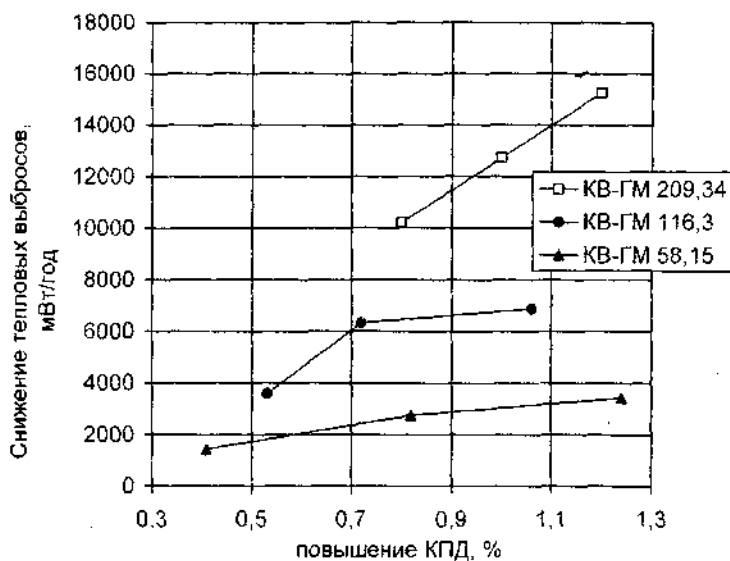


Рис. 4.7. Годовое уменьшение прямых тепловых выбросов в атмосферу в зависимости от повышения КПД котла

## Выводы

1. На базе анализа и обобщения литературных и фондовых источников по негативному воздействию теплоэнергетического комплекса РФ на важнейшую жизнеобеспечивающую геосферную оболочку - атмосферу, техническому состоянию эксплуатируемого в настоящее время котельному оборудованию выработаны геоэкологические принципы конструирования энергоэффективных, ресурсосберегающих котельных установок.

2. На базе оценки методов повышения эффективности работы котельного оборудования обоснован перспективный, малозатратный способ повышения экологических и технических характеристик теплогенераторов путем интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях нагрева с помощью установки спиральных вставок-турбулизаторов;

3. Разработана и изготовлена лабораторная установка, составлена методика исследования, изучены экспериментальным путем тепловые и аэродинамические характеристики цилиндрических труб при установке внутрь спиральных турбулизаторов с различными геометрическими характеристиками, интенсифицирующих теплообмен;

4. Определены и экспериментально обоснованы расчетные теплотехнические и аэродинамические характеристики трубных конвективных поверхностей теплообмена с внутренними спиральными проволочными вставками-турбулизаторами. Получены обобщающие уравнения подобия для расчета теплообмена и аэродинамических сопротивлений цилиндрических труб со спиральными проволочными турбулизаторами с различным относительным шагом  $S/d$ , определена область их применения;

5. Разработана методика расчета воздухоподогревателей при установке внутрь труб спиральных вставок-турбулизаторов. На примере котлов серии КВ-ГМ расчетным путем произведена оценка повышения технико-экономического и экологического уровня эксплуатации котельного оборудования при установке спиральных турбулизаторов в трубы воздухоподогревателей. Экономический эффект за счет экономии топлива для мощности котла 209,34 кВт достигает 1027,7 тыс.руб./год при увеличении КПД на 1,1%, снижение количества выбросов газообразных загрязнителей в атмосферу при этом составило: NO - 14,4 т/год, CO - 6,6 т/год, снижение прямых тепловых выбросов составило 12746 мВт/год: в определенной степени реализованы главенствующие положения - энергоэффективность и ресурсосбережение.

6. Установлено, что усовершенствование котлов на базе принятых геоэкологических принципов создает условия для функционирования городских экосистем в пределах гомеостатического плато за счет управляющих действий человека «в ПТС - котельные установки» путем снижения негативных воздействий на биотопы, прежде всего на атмосферу.

**Основные результаты работы опубликованы в 8-ми научных статьях:**

1. Саклаков И.Ю. Повышение эффективности работы теплогенераторов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2005. № 1. - С.63.

2. Саклаков И.Ю., Потапов А.Д. Энергосберегающая теплоэнергетика как фактор обеспечения устойчивости атмосферы - важнейшей геосферной оболочки // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.- 2004. № 5. - С.62.

3. Саклаков И.Ю. Энергосбережение в котельной технике: Материалы второй международной седьмой межвузовской научно - практической конференции молодых ученых аспирантов и докторантов «Строительство - формирование среды жизнедеятельности». - М.: МГСУ, 2004. - 274 с.

4. Саклаков И.Ю. Исследование аэродинамики при применении проволочных турбулизаторов в конвективных поверхностях теплогенераторов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2004. № 2. - С.87.

5. Саклаков И.Ю., Потапов А.Д., Богомолова Т.Г., Тогина Е.С., Потапов П.А. Организационно - учебное обеспечение блочно - модульной схемы подготовки и переподготовки инженерных кадров «Спецстроя» РФ в области охраны природной среды, водоподготовки, и водоотведения: Материалы научно - практической конференции «Наука, инновации, подготовка кадров в строительстве». - М.: МГСУ, 2004.- 139с.

6. Саклаков И.Ю. Интенсификация теплообмена в дымогарных трубах отопительных теплогенераторов: Материалы пятой научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов «Строительство - формирование среды жизнедеятельности». - М.: МГСУ, 2002. - 296 с.

7. Саклаков И.Ю. Ходорыч А. Интенсификация теплообмена в дымогарных трубах отопительных теплогенераторов: Материалы 54-й научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов (часть 2).- С.-Петербург: СПбГАСУ (ЛИСИ), 2000,- 148 с.

8. Саклаков И.Ю. Интенсификация теплообмена в газотрубных котлах: Материалы межрегиональной конференции «Студенческая наука - экономике научно-технического прогресса». - Ставрополь: Сев-КавГТУ, 2000.