

На правах рукописи

Остапенко Дмитрий Валериевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖАРОТРУБНОГО
ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ
КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка - 2015

Работа выполнена в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лукьянов Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Недопекин Федор Викторович,
Донецкий национальный университет,
профессор кафедры физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии;

кандидат технических наук, доцент,
Гридин Сергей Васильевич,
Донецкий национальный технический
университет, доцент кафедры промышленной
теплоэнергетики.

Ведущая организация: Академия строительства и архитектуры ФГАОУ
ВО "КФУ им. В.И. Вернадского",
г. Симферополь.

Защита состоится «17» декабря 2015 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» октября 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время теплоснабжение около 80% городского фонда Украины осуществляется от централизованных источников. Оборудование котельных централизованных систем теплоснабжения давно морально и физически устарело, а тепловые сети являются самым ненадежным ее элементом, на который приходится примерно 85% отказов по системе в целом. В условиях непрерывного роста цен на топливо, электрическую энергию, воду и материальные ресурсы, эксплуатация таких систем является расточительством. К недостаткам существующих централизованных источников тепла можно отнести также то, что они проектировались без возможности снижения выбросов в окружающую среду.

Одним из направлений снижения энергозатрат и улучшения экологической составляющей работы тепловых предприятий является техническое совершенствование систем теплоснабжения. Среди способов реализации данной проблемы является переход от централизованных источников теплоснабжения к децентрализованным с локальным производством и распределением теплоты. Это позволит эффективно решать задачи отопления и горячего водоснабжения с экономией энергии.

В качестве теплогенераторов локальных источников теплоснабжения наиболее целесообразно использовать жаротрубные теплогенераторы малой мощности от 0,5 до 3,0 МВт. На сегодня наибольшее распространение получили теплогенераторы зарубежного производства, однако отечественные теплогенераторы обладают не худшими характеристиками и при их совершенствовании могут составить достойную конкуренцию зарубежным аналогам.

В теплогенераторах данного типа теплота на 70% отдается излучением и на 30% конвекцией. Из-за довольно высоких температур уходящих газов (160-200°C) актуальным вопросом является совершенствование конвективной части жаротрубных теплогенераторов малой мощности отечественного производства, что позволит улучшить их энергетические и экологические характеристики.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Основные исследования теоретического и прикладного характера выполнялись в соответствии с Законом Украины “Об энергосбережении”, Комплексной государственной программой энергосбережения Украины, Программой энергосбережения в жилищно-коммунальном строительстве, приоритетными направлениями развития науки и техники в Украине “Экологически чистая энергетика и энергосберегающие технологии”, Программой научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 г. “Донбасс-2020”.

Исследования выполнялись в пределах госбюджетных научно-исследовательских тем Министерства образования и науки Украины, в которых автор был исполнителем: Д-2-3-03 “Создание теоретических и технологических основ разработки основ автономного теплоснабжения и способов повышения качества воды у потребителей” (государственный регистрационный номер 0103 U 000585); Д-2-06-06 “Разработка методов и способов повышения энергетической эффективности источников теплоты для локального и индивидуального

теплоснабжения” (государственный регистрационный номер 0106 U 002951); Д-2-05-09 “Разработка теоретических и технологических основ обеспечения внедрения современных технологий систем функционирования ЖКХ” (государственный регистрационный номер 0109 U 003038); Д-2-05-11 “Разработка теоретических моделей технических и технологических решений обеспечения эффективного функционирования инженерных сетей тепло-, водоснабжения и водоотведения” (государственный регистрационный номер 0111U001806). Исследовательско-конструкторские разработки и внедрения результатов исследований осуществляются согласно хоздоговорным научно-исследовательским работам, которые выполняются в специализированном научно-производственном центре “Экотер” при Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Цель работы. Научно и экспериментально обосновать способ повышения энергоэффективности и улучшения экологических характеристик жаротрубных теплогенераторов на основе совершенствования конвективного теплообмена.

Задачи исследования:

- выполнить аналитические исследования известных конструкций жаротрубных водогрейных теплогенераторов для выявления перспективных направлений повышения их энергетической и экологической эффективности;
- разработать и исследовать математическую модель теплообменного процесса в конвективных трубках жаротрубного теплогенератора с применением турбулизатора потока;
- разработать математическую модель движения частиц в конвективных трубках теплогенератора с целью недопущения их зарастания;
- выполнить оценку влияния турбулизатора на теплообмен в конвективной части теплогенератора;
- проанализировать влияние внедрения локальных котельных на загрязнение приземного слоя атмосферы населенных пунктов;
- выполнить технико-экономическое обоснование реализации научно-технических решений по повышению энергетической и экологической эффективности жаротрубных теплогенераторов.

Объект исследования – тепломассообменные процессы в конвективных трубках жаротрубных водогрейных теплогенераторов малой мощности.

Предмет исследования – закономерности конвективного теплообмена, влияющие на тепловую эффективность конвективных поверхностей жаротрубного теплогенератора мощностью от 0,5 до 3,0 МВт с турбулизаторами потока.

Методы исследования. В работе использован комплексный подход к исследованиям, включающий анализ теоретических и экспериментальных работ предшественников с научным обобщением полученных результатов в расчетно-аналитическом и математическом моделировании в основу которых положены классические уравнения движения и теплообменных процессов. Применялись экспериментальные методы исследования геометрических параметров турбулизатора потока и понижения температуры продуктов сгорания за счет их установки с последующим сравнением их результатов с расчетными данными.

Математическая обработка результатов исследований базировалась на планировании многофакторного эксперимента и представлена в виде эмпирических зависимостей и номограмм.

Достоверность научных результатов диссертации подтверждается адекватностью экспериментальным данным, полученным на математических моделях, что обусловлено соответствием принятых допущений характеру решаемых задач, обоснованным выбором контрольно-измерительной аппаратуры, методов обработки экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов:

- усовершенствована математическая модель конвективного теплообмена в конвективных трубках жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока и получено дальнейшее развитие определения коэффициента теплоотдачи с учетом турбулентной вязкости;
- установлены закономерности по динамике изменения температуры продуктов сгорания, потерь давления и коэффициента теплоотдачи в конвективных трубках с турбулизаторами потока, что влияет на повышение тепловой эффективности конвективной части жаротрубного теплогенератора;
- получено дальнейшее развитие повышения тепловой эффективности применения турбулизатора газового потока в виде ломаной ленты;
- впервые аналитически получена математическая модель движения твердой частицы в газоходах жаротрубного теплогенератора с использованием критерия Клячко.

Практическое значение полученных результатов:

- результаты позволяют определить размеры турбулизатора потока для достижения оптимального эффекта, определить скорости движения твердых частиц и время пребывания в любой точке контура жаротрубного теплогенератора;
- полученные закономерности позволяют определить коэффициент теплоотдачи конвекцией в трубках жаротрубного теплогенератора с турбулизаторами потока в виде ломаной ленты с учетом турбулентной вязкости, математически описать нестационарное движение твердых частиц и определить границы применения “вязкой” модели при ускоренном их движении;
- установка турбулизатора снижает расход топлива благодаря увеличению КПД теплогенератора. Для теплогенератора КВ-ГМ-1,6-95СН это дает возможность экономить до 16,7 тыс.м³ природного газа за отопительный сезон в условиях Донецкого региона;
- результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях ООО “Квант Энергия” г. Артемовск и КП “Макеевтеплосеть”, а также при разработке комплексных программ оптимизации систем теплоснабжения городов по заданию Госадминистрации Донецкой области;
- результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры в курсах

дисциплин “Теплогенерирующие установки”, “Вентиляция и аэродинамика вентиляции”, “Оценка воздействия на окружающую среду” для студентов специальности “Теплогазоснабжение и вентиляция”.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя включает:

- постановку цели и задач исследований;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в конвективной части теплогенератора;
- качественный и количественный анализ результатов исследований, а также их интерпретацию;
- получение результатов повышения величины коэффициента теплоотдачи при использовании турбулизаторов различных размеров;
- разработку математической модели движения твердых частиц в газоходах жаротрубного теплогенератора;
- определение воздействия на окружающую среду теплогенераторов малой мощности;
- формулирование общих выводов по результатам исследования и рекомендаций относительно дальнейшего использования полученных данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: II Международная научно-практическая конференция “Актуальные вопросы реформирования жилищно-коммунального хозяйства в Украине” (г. Макеевка – г. Славянск, 2009), IX Международная конференция молодых ученых, аспирантов, студентов “Здания и конструкции с применением новых материалов и технологий” (г. Макеевка ДонНАСА, 2010), Научно-практическая конференция “Научно-техническое творчество молодежи - путь к обществу, основанного на знаниях” (г. Москва, 2010).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах в специализированных рецензируемых научных изданиях МОН Украины (3 публикации включены в РИНЦ) общим объемом 1,59 п.л., лично автором 1,14 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы - 235 страниц, в том числе 128 страниц основного текста; 38 рисунков; 19 таблиц; 12 страниц списка литературы; 92 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, изложена научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы.

Первый раздел диссертации представляет собой обзор современного состояния систем теплоснабжения Украины. Рассмотрена децентрализация систем теплоснабжения, как способ повышения их эффективности, с использованием

современных жаротрубных теплогенераторов. Приведены современные конструкции котлов малой мощности, которые используются в нашей стране.

В последние годы в Украине наметилась тенденция, направленная на децентрализацию систем теплоснабжения, которая требует применения высокоэффективных и маневренных котлов малой мощности (от 0,5 до 3,0 МВт) (И.М. Карп, А.Ф. Редько, В.И. Соколов, П.А. Хаванов, В.Н. Братенков и др.), наиболее перспективными из которых являются жаротрубные котлы (А.В. Лукьянов, М.М. Литвиненко, Н.Д. Андрийчук, F.J. Gutiérrez Ortiz, Peter Novak, Wladimir Linzer и др.).

Высокие значения КПД современных жаротрубных теплогенераторов достигаются за счет совершенствования поверхностей нагрева и технологий сжигания топлива. Одним из главных вопросов остается интенсификация теплообмена в конвективных поверхностях нагрева. Из-за высокой температуры отходящих газов после котлоагрегата возникает необходимость в использовании дополнительного теплоутилизирующего оборудования, цена которого достаточно высока.

Альтернативой теплоутилизирующему оборудованию является применение турбулизаторов потока различной конструкции в конвективных трубках жаротрубного теплогенератора, в результате чего достигается высокая эффективность при небольших затратах. Конструкции современных турбулизаторов очень разнообразны и представляют собой: выступы в трубках, ломаные ленты, внутреннее оребрение, пружинные проволоочные вставки, скручивание ленты и другие.

Однако разнообразие турбулизаторов потока не позволяет определить единый подход к их применению из-за различных конечных данных. Для применения турбулизаторов в жаротрубных теплогенераторах необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования в условиях, приближенных к реальным.

На основе выполненного анализа теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации сформулирована цель и определены задачи исследований.

Во втором разделе выполнены аналитические исследования теплообменных и аэродинамических процессов в газоходах жаротрубных теплогенераторов малой мощности.

Анализ основных направлений развития и принципов разработки котлов малой мощности для децентрализованных систем теплоснабжения показал, что наиболее применяемой является конструкция жаротрубного котла с двухходовой схемой движения теплоносителя. Принятые в настоящее время методы расчета теплообмена в топках котлов основываются на применении теории подобия к топочным процессам и предполагают, что конвективной составляющей в суммарном теплообмене можно пренебречь. Однако, для котлов малой мощности, где интенсивность омывания конвективных поверхностей существенна, пренебрежение данным фактором может привести к существенной погрешности.

В качестве базового метода, для расчета теплообмена в котлах малой мощности при работе на газообразном топливе можно использовать аналитический

метод ВТИ-ЭНИН с внесением поправок на учет конвективной составляющей теплообмена.

Полученные в работе на основании аналитических исследований результаты показывают, что использование нормативного метода теплового расчета котлоагрегата не позволяет достаточно надежно анализировать теплообменные процессы в жаротрубных элементах котлов малой мощности.

Для обоснованного использования принятой математической модели расчета интенсивности теплоотдачи в жаровых трубках проведены дополнительные экспериментальные исследования.

В работе получено аналитическое решение уравнения движения частицы в газотоках жаротрубного теплогенератора при невязком обтекании. Получены первый и второй интегралы с использованием критерия Клячко.

$$u = V - \left[\left(V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

$$x = V \cdot t + \frac{3}{A} \cdot \left[\left(V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau \right]^{-\frac{1}{2}} + \\ + \frac{3}{A \cdot \sqrt{A \cdot \tau}} \cdot \arctg \left(\frac{\left(V^{-\frac{2}{3}} + A \cdot \tau \right) \cdot e^{\frac{2t}{3\tau}} - A \cdot \tau}{A \cdot \tau} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{3}{A} \cdot V^{\frac{1}{3}} + \frac{3}{A \cdot \sqrt{A \cdot \tau}} \cdot \arctg \frac{V^{-\frac{1}{3}}}{\sqrt{A \cdot \tau}} \right). \quad (2)$$

где u – скорость твердой частицы, м/с;

V – скорость потока, м/с;

τ – время релаксации, 1/с;

t – время, с;

A – комплексная величина;

x – расстояние, м.

Модель движения частицы в газовом потоке позволила определить закономерности движения твердых частиц (частиц топлива, сажи и золы) в нестационарных условиях, что характерно для котлов малой мощности. Полученный первый интеграл (ф-ла 1) позволяет оценить время разгона частиц различного размера до величины скорости потока, второй интеграл (ф-ла 2) позволяет определить расстояние, на котором произойдет стабилизация движения частицы. Это важно при изучении зарастания конвективных трубок частицами, содержащимися в дымовых газах.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований тепловых и аэродинамических характеристик конвективных труб, а также методика их проведения.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач, согласно теории планирования эксперимента, на основе анализа конструкций жаротрубных

теплогенераторов и турбулизаторов потока, разработана структурно-логическая схема исследований (Рис. 1).

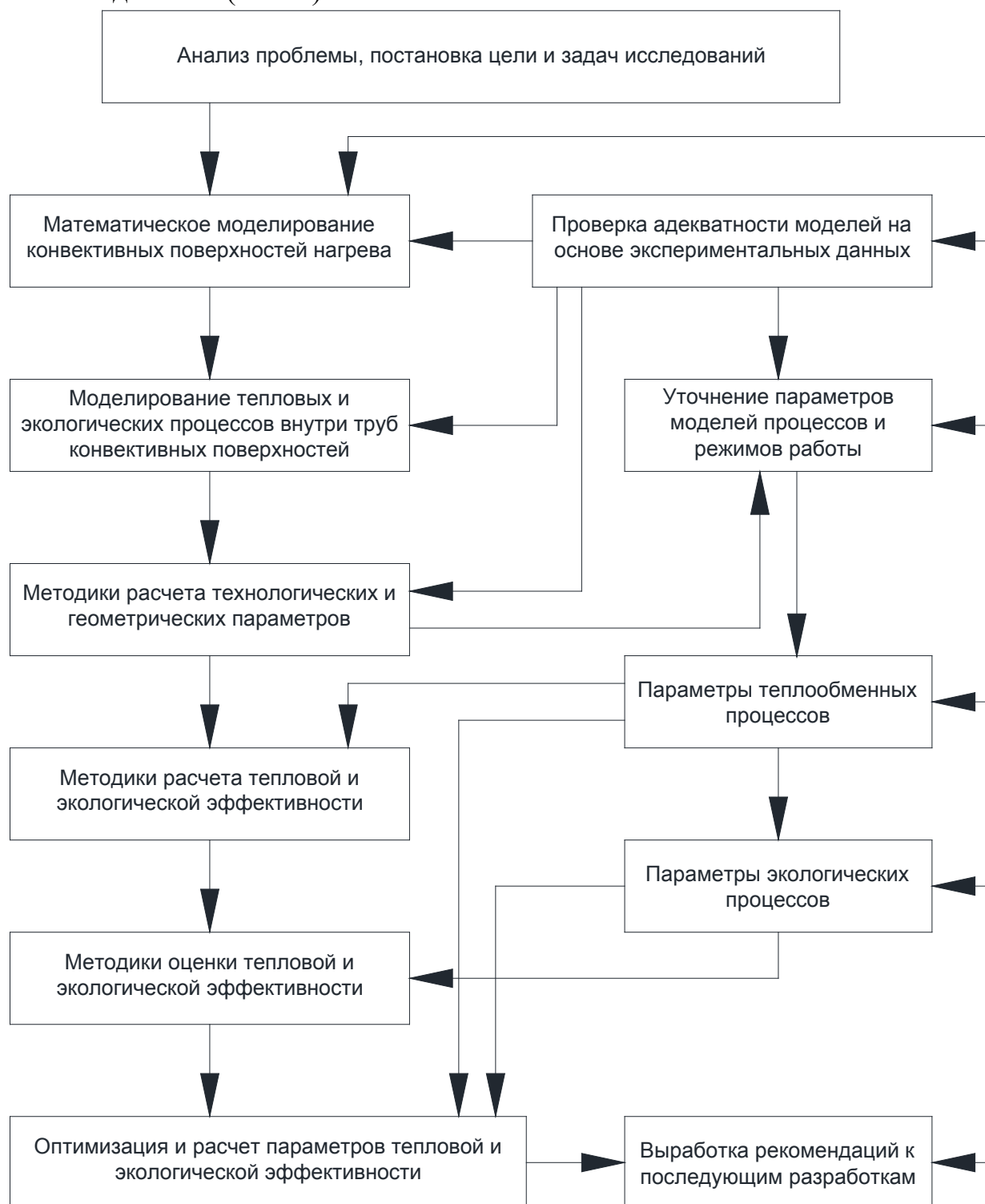


Рис. 1. Структурно-логическая схема исследований

Представленной схемой предусмотрена следующая последовательность действий:

- определение физических моделей теплообменных процессов в жаротрубном теплогенераторе;

- математическое моделирование теплообменных процессов во внутреннем контуре котла;
- разработка рекомендаций по использованию турбулизаторов потока в конструкции жаротрубного теплогенератора.

Для проведения экспериментальных исследований была создана опытная установка (Рис. 2) жаротрубного теплогенератора, которая обеспечивает возможность измерения температур на входе в конвективный пакет и на выходе из него при применении турбулизаторов потока, имеющих различные геометрические характеристики.

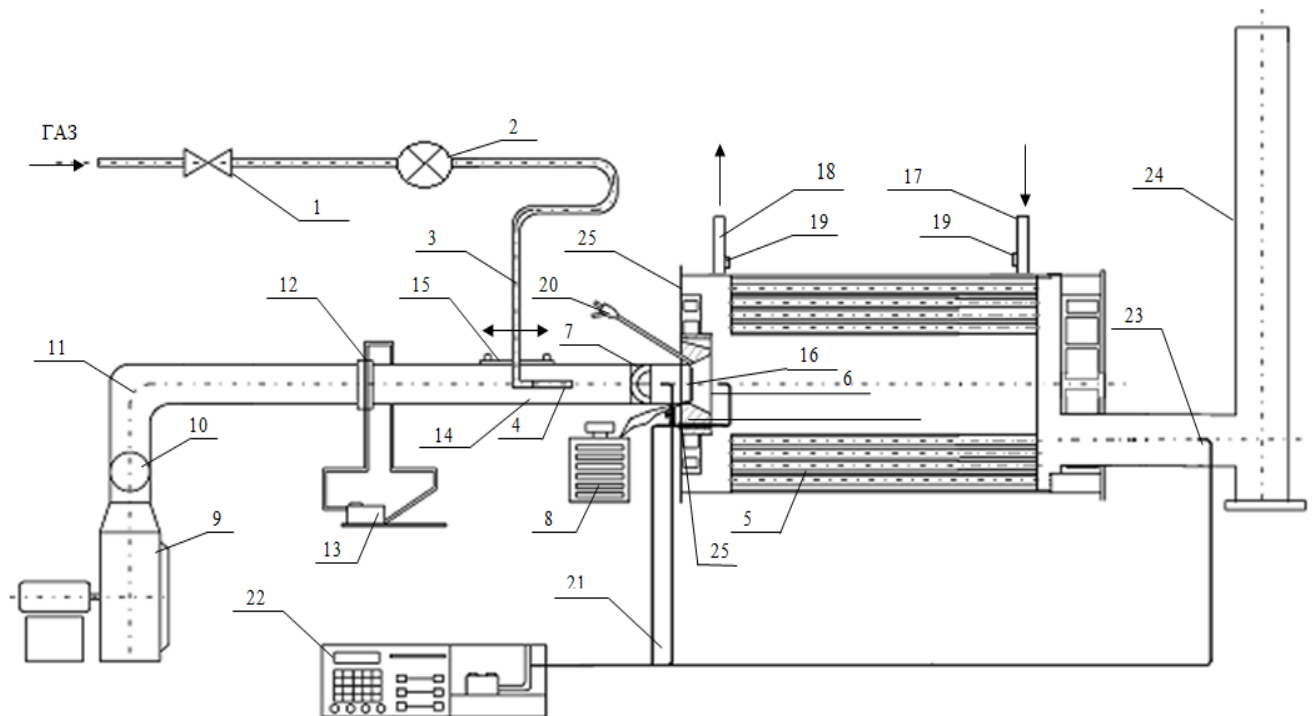


Рис. 2. Экспериментальная модель жаротрубного теплогенератора

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 - кран подачи газа; | 13 - микроманометр; |
| 2 - газовый счетчик; | 14 - горелка; |
| 3 - газоподводящая трубка; | 15 - фиксирующая планка; |
| 4 - насадок; | 16 - нихромовая нить; |
| 5 - модель теплогенератора; | 17 - подвод воды; |
| 6 - амбразура; | 18 - отвод воды; |
| 7 - горелочный камень; | 19 - температурный датчик; |
| 8 - автотрансформатор; | 20 - лючок; |
| 9 - вентилятор; | 21, 23 - капилляр газоанализатора; |
| 10 - шибер; | 22 - газоанализатор; |
| 11 - воздуховод; | 24 - дымовая труба; |
| 12 - интегральная трубка; | 25 - передняя трубная доска. |

Для проведения экспериментальных исследований была составлена матрица планирования полного двухфакторного эксперимента (Табл. 1), позволяющего математически описать исследуемый процесс в некоторой локальной области

факторного пространства, лежащей в окрестности выбранной точки с координатами нулевого уровня.

В качестве входных параметров, влияющих на результат, были приняты степень перекрытия сечения каналов турбулизатором потока Ω , которая составила $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$ и $\frac{1}{6}$ площади конвективного канала, и условный диаметр трубки d_y (46 и 35 мм).

Таблица 1. – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Факторы		Функция отклика $\overline{y_j}$
	X_1	X_2	
1	-1	-1	$\overline{y_1}$
2	+1	-1	$\overline{y_2}$
3	-1	+1	$\overline{y_3}$
4	+1	+1	$\overline{y_4}$

Где X_1 и X_2 входные параметры (влияющие).

Исследования были направлены на определение температуры продуктов сгорания (t) и потерь давления (ΔP) в конвективных трубках с применением турбулизатора потока (Рис. 3).

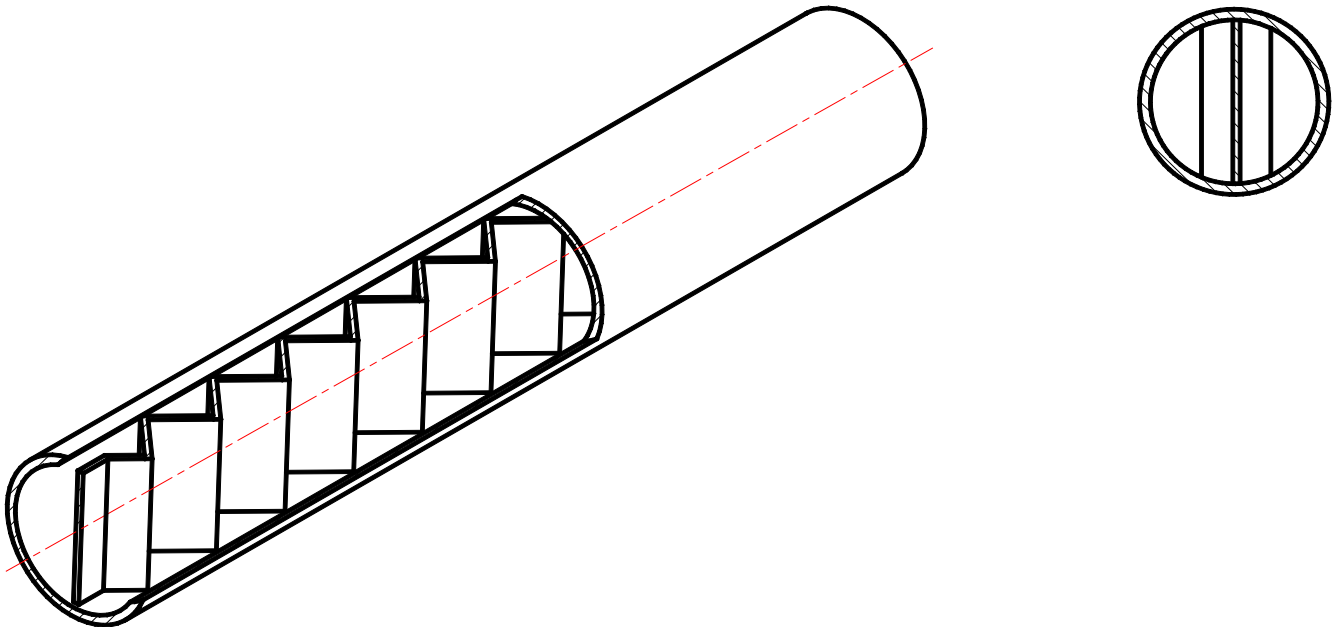


Рис. 3. Схема конвективной трубки с турбулизатором потока

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимости изменения температуры уходящих газов и потерь давления в конвективных трубках

жаротрубного теплогенератора от степени перекрытия сечения канала турбулизатором потока. Полученные зависимости представлены на рис. 4 в виде графиков.

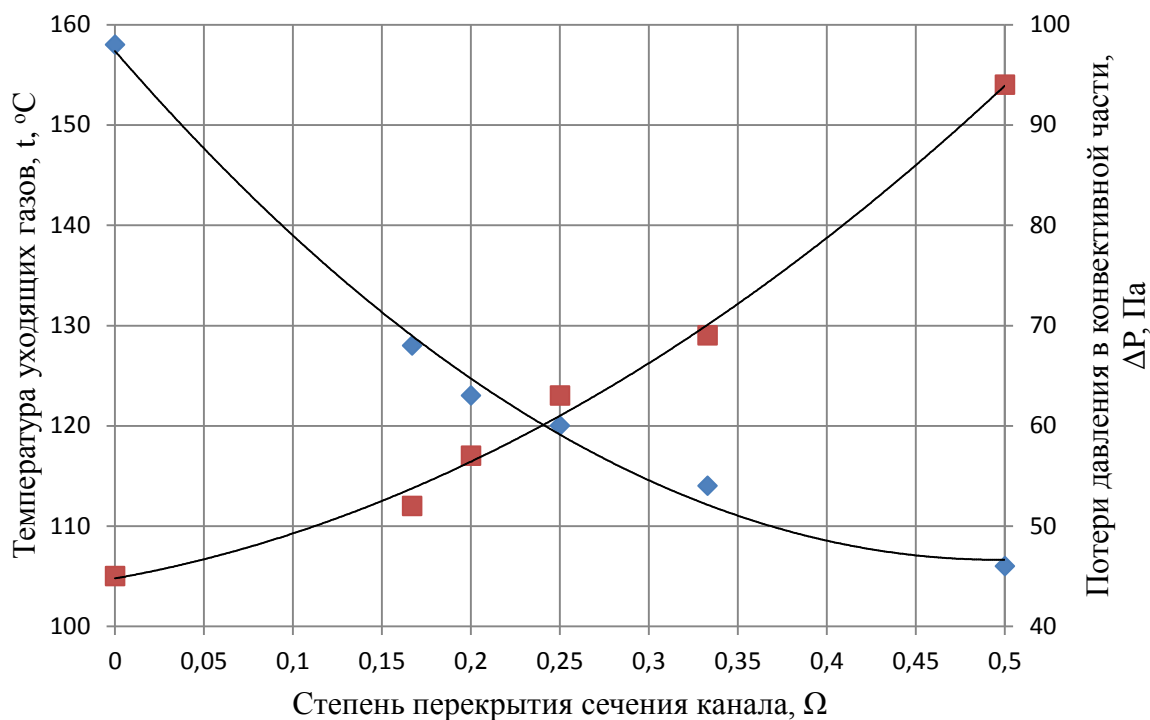


Рис. 4. Зависимость температуры уходящих газов и потерь давления в конвективных трубках от степени перекрытия сечения канала

Результаты регрессионного анализа полученных зависимостей аппроксимируются следующими уравнениями:

$$t = 173,36 - 198,68 \cdot \Omega - 0,33 \cdot d_y + 186,72 \cdot \Omega^2, \quad (3)$$

$$\Delta P = 53,29 + 50 \cdot \Omega - 0,21 \cdot d_y + 104 \cdot \Omega^2. \quad (4)$$

На основании анализа графика (Рис. 4) можно сделать вывод, что оптимальным значением степени перекрытия сечения конвективной трубки турбулизатором является 0,25.

В конвективных поверхностях нагрева интенсивность теплообмена определяет коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке тепловоспринимающей поверхности (трубки). Теоретические исследования позволили получить выражение для коэффициента теплоотдачи в конвективных трубках с турбулизаторами с учетом турбулентной вязкости.

$$\alpha_k = 0,038 \cdot \text{Re}^{0,85} \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{экв}}}. \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр конвективных трубок, м;

Экспериментальные исследования теплообмена в конвективных трубках были направлены на определение коэффициента теплоотдачи (α_k) от степени перекрытия сечения каналов турбулизаторами.

В результате исследований получены графические и эмпирические зависимости: скорости движения продуктов сгорания V (Рис. 5); турбулентной вязкости ν_t (Рис. 6); коэффициента теплоотдачи конвекцией α_k (Рис. 7).

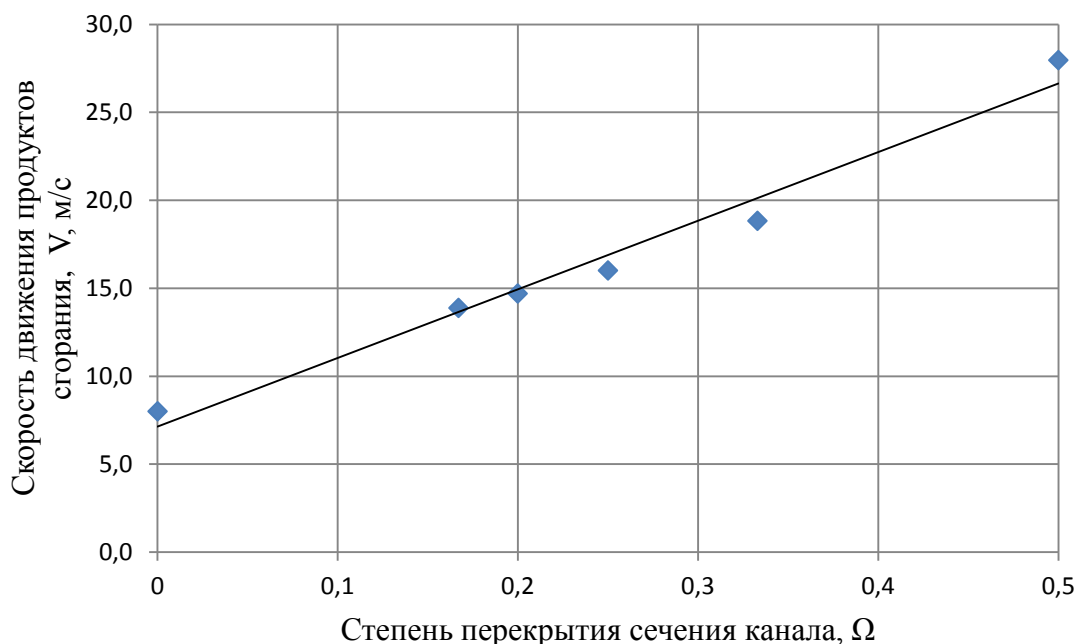


Рис. 5. Зависимость скорости движения продуктов сгорания от степени перекрытия сечения канала

$$V = 39,002 \cdot \Omega + 7,1339, \quad R = 0,977. \quad (6)$$

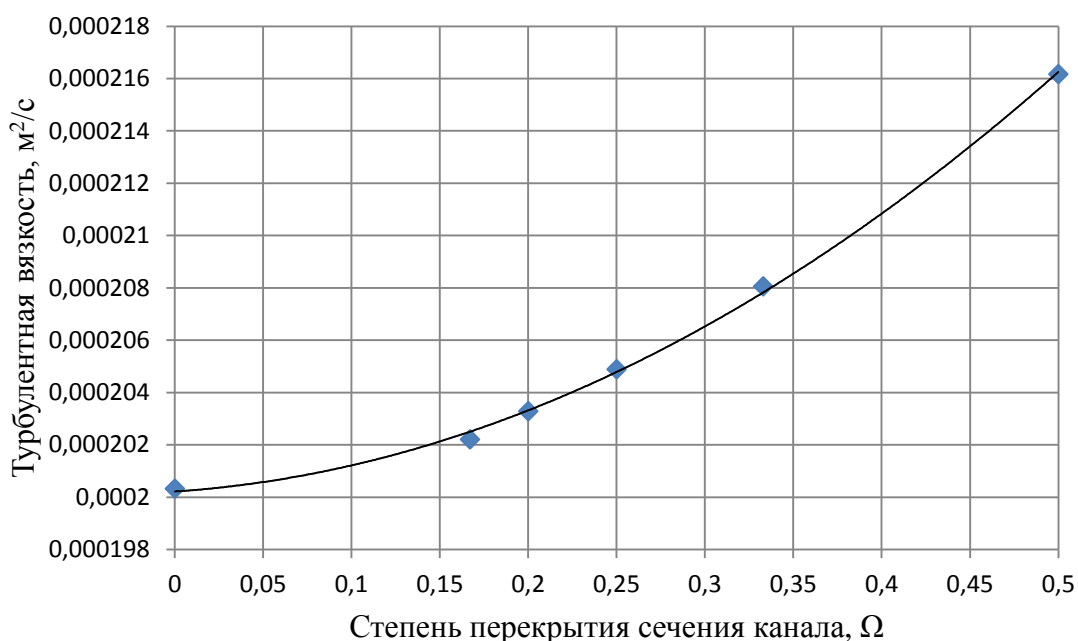


Рис. 6. Зависимость турбулентной вязкости от степени перекрытия сечения канала

$$\nu_m = 6 \cdot 10^{-5} \cdot \Omega^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega + 0,0002, \quad R = 0,999. \quad (7)$$

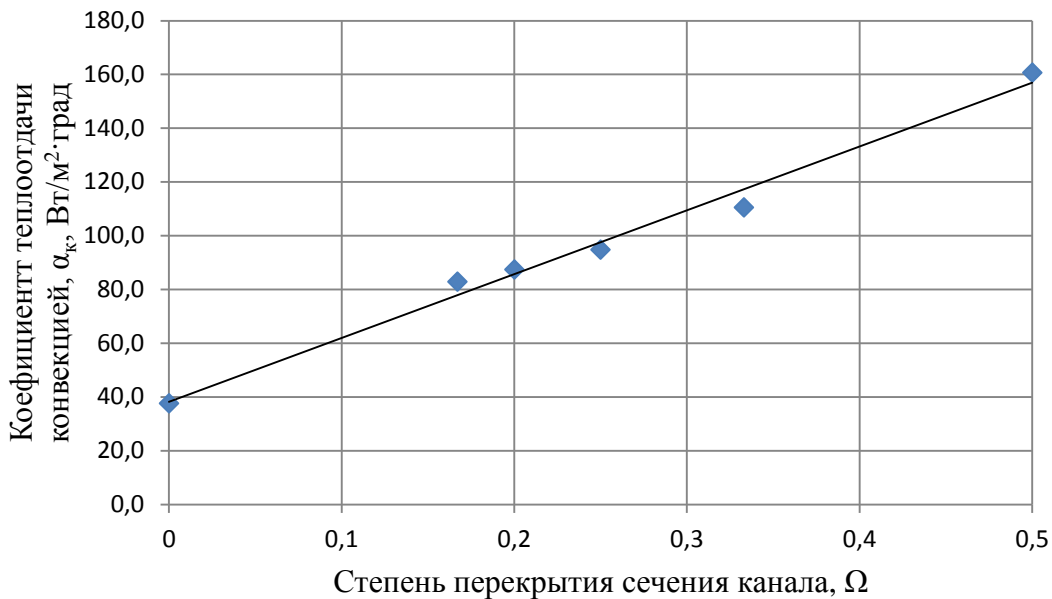


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи конвекцией от степени перекрытия сечения канала

$$\alpha_k = 237,55 \cdot \Omega + 38,154, \quad R = 0,988. \quad (8)$$

Анализ графических и эмпирические зависимости показывает, что установка турбулизаторов в конвективные трубки увеличивает скорость движения продуктов сгорания и соответственно коэффициент теплоотдачи.

Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики с доверительной вероятностью 0,95. Значимость коэффициентов уравнений регрессии и доверительный интервал определялись с помощью числа Стьюдента, адекватность математических моделей проверялась с помощью числа Фишера.

В четвертом разделе выполнено исследование загрязнения приземного слоя атмосферы дымовыми газами от автономных источников теплоснабжения. Проанализированы факторы, влияющие на распространение вредных выбросов в приземном слое атмосферы.

Определение величин вредных выбросов проводилось в европейском формате CORINAIR. Расчеты в этом формате основаны на показателях эмиссии.

Расчет рассеивания вредных веществ в приземном слое атмосферы от стационарных источников выполнен с использованием программного комплекса ЭОЛ-Плюс по приведенной методике. Рассмотрены вопросы загрязнения приземного слоя атмосферы как одиночными источниками различной мощности и высотой выброса вредных веществ, так и группой источников. В процессе разработки программы оптимизации теплоснабжения г. Макеевки было разработано комплексное применение автономных котельных малой мощности с использованием высокоэффективных жаротрубных теплогенераторов в том числе в комбинации с ныне действующими районными котельными. На рисунках 8 и 9

приведены карты загрязнения микрорайона “Зеленый” г. Макеевка до и после внедрения группы котельных малой мощности. Указанные локальные источники устанавливались по территории всего микрорайона.

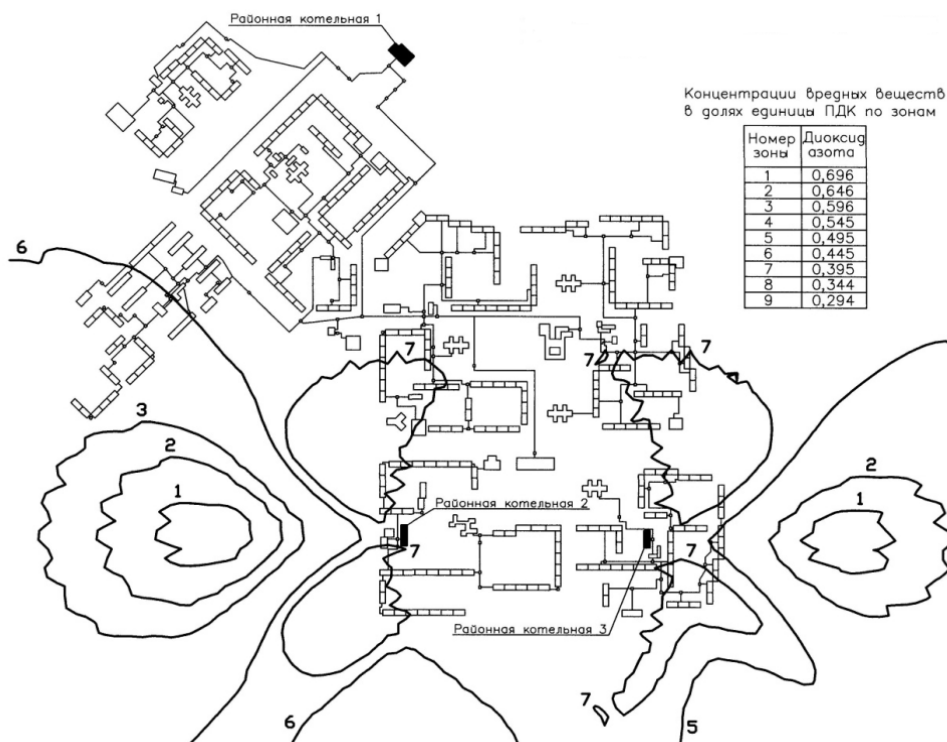


Рис. 8. Карта-схема экологического мониторинга района с тремя районными котельными

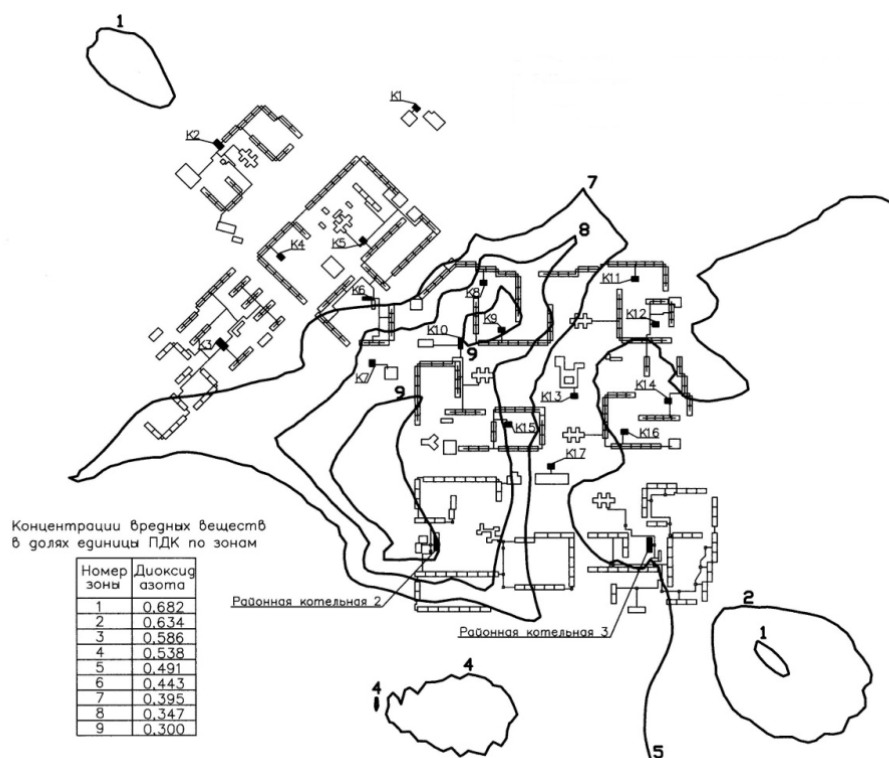


Рис. 9. Карта-схема экологического мониторинга района с двумя районными и 17 автономными котельными

Анализ данных показывает, что загрязнение атмосферы представляет собой набор локальных областей, ограниченных изолиниями со своими концентрациями вредных веществ. При рассмотрении выбросов от котельных малой мощности, использующих природный газ, превышений предельно допустимых концентраций не наблюдается.

В пятом разделе выполнено технико-экономическое обоснование реализации внедрения результатов работы.

Даны рекомендации по конструктивным особенностям турбулизатора потока в виде ломаной линии, а также размещению локальных источников теплоснабжения с экологической точки зрения в зависимости от компоновки жилой зоны.

Внутри трубки турбулизатор рекомендуется размещать вертикально. Это позволяет избежать изменений размеров проходного сечения канала, которое возможно за счет провисания турбулизатора при его горизонтальном расположении в результате теплового воздействия.

Для обеспечения максимального эффекта турбулизатора его рекомендуется выполнить в соответствии с параметрами: ширина $0,2d_y$, расстояние между соседними вершинами (шаг) $0,4d_y$.

Рассмотрен вариант децентрализации системы теплоснабжения теплового района на примере микрорайона “Зеленый” г. Макеевка, что предусматривает установку 17 миникотельных с высокоэффективными жаротрубными теплогенераторами взамен районной котельной мощностью 105 МВт. Это позволит снизить расход топлива и уменьшить экологическую нагрузку на район.

Установка турбулизатора позволяет экономить топливо благодаря увеличению КПД теплогенератора, что подтверждено расчетом.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования существующих систем теплоснабжения показали необходимость их децентрализации с переходом на автономные котельные малой мощности. Изучение современных водогрейных теплогенераторов позволило определить, что наиболее эффективными для автономных котельных являются жаротрубные теплогенераторы. Изучение конструкций и характеристик современных жаротрубных теплогенераторов показало необходимость совершенствования процессов теплообмена в их конвективной части.

2. Проведенные теоретические и практические исследования процессов теплообмена в конвективных трубках жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока в виде ломаной линии позволили увеличить его КПД. Установка турбулизатора увеличивает отбор тепла от уходящих продуктов сгорания, при этом их температура на выходе уменьшилась на 40°C и составила 120°C . КПД теплогенератора увеличился на 2% и достиг значения 94%.

3. В работе впервые получена математическая модель движения частицы при невязком обтекании с учетом критерия Клячко. Полученные первый и второй интегралы позволили определить закономерности движения твердых частиц в нестационарных условиях, что характерно для котлов малой мощности. Первый

интеграл позволяет оценить время разгона частиц различного размера до величины скорости потока. В этом случае можно определить границы вязкого обтекания. Второй интеграл позволяет определить расстояние, на котором произойдет стабилизация движения частицы. Практическое применение результатов позволяет определить размеры входных участков золоуловителей, закономерности движения частиц в конвективных трубках.

4. Установлены закономерности по динамике изменения температуры продуктов сгорания, потерь давления и коэффициента теплоотдачи в конвективных трубках с турбулизаторами потока, которые влияют на повышение тепловой эффективности конвективной части жаротрубного теплогенератора.

5. Проведенные исследования воздействия автономных котельных на окружающую среду при существующей застройке жилого района показали довольно высокую экологическую эффективность данных источников выбросов вредных веществ в атмосферу; позволили определить возможность их использования для теплоснабжения объектов как вновь возводимых, так и существующих.

6. Экономический эффект от применения турбулизатора потока достигается за счет уменьшения расхода топлива, который составляет до 16,7 тыс. м³ природного газа за отопительный период для теплогенератора КВ-ГМ-1,6-95СН, работающего в номинальном режиме в условиях Донецкого региона. При стоимости природного газа для теплоснабжающих предприятий ЖКХ на уровне отопительного сезона 2013-2014 годов в размере 1030 грн. за 1000 м³ экономия средств одним теплогенератором составит 17185 грн. за отопительный сезон. Стоимость предложенного турбулизатора составляет 4000 грн., а его срок эксплуатации составляет 4 года.

7. Чистый дисконтированный доход за 4 года применения турбулизатора потока в конструкции теплогенератора КВ-ГМ-1,6-95СН составит 50474 грн.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Лукьянов, А.В. Экологическая составляющая теплоснабжения жилого района города от различных источников [Текст] / А.В. Лукьянов, Д.В. Остапенко, Л.Д. Катин // Вестник ДонНАСА. – 2009. – № 2(76). – С. 76-80. *(Выделены недостатки существующих централизованных систем теплоснабжения, произведен анализ воздействия систем теплоснабжения на окружающую среду).*

2. Остапенко, Д.В. Движение твердых частиц на горизонтальных участках газопроводов теплогенераторов малой мощности [Текст] / Д.В. Остапенко, А.В. Лукьянов, Л.Д. Катин // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 3 (том 5). – С. 145-151. *(Получено аналитическое решение уравнения движения твердой частицы в газовом потоке для жаротрубного теплогенератора с использованием зависимости Клячко).*

3. Остапенко, Д.В. Совместное использование централизованных и децентрализованных источников теплоснабжения [Текст] / Д.В. Остапенко // Вестник ОГАСА. – 2009. – № 34. – С. 580-583.

4. **Ostapenko, D.V.** Convective heat transfer in tubes with turbulator [Text] / **D.V. Ostapenko** // Modern industrial and civil constructions. – 2014. – № 1. – P. 15-22.

5. **Остапенко, Д.В.** Повышение энергетической эффективности тепловых предприятий ЖКХ [Текст] / **Д.В. Остапенко, А.В. Лукьянов** // Вестник ДонНАСА. – 2014. – № 3(107) – С. 32-36. *(Рассмотрен вопрос модернизации тепловых предприятий ЖКХ, определена экономическая эффективность применения турбулизатора потока).*

6. Лукьянов, А.В. Определение тепловых характеристик продуктов сгорания жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока [Текст] / **А.В. Лукьянов, Д.В. Остапенко, Д.В. Басист** // Труды Одесского политехнического университета. – 2014. – Вып. 2(44) – С. 102-107. *(Создана экспериментальная установка для проведения опытов по повышению энергоэффективности жаротрубного теплогенератора).*

– публикации в других изданиях:

1. **Остапенко, Д.В.** Повышение эффективности работы тепловых предприятий ЖКХ / **Д.В. Остапенко** // Актуальные вопросы реформирования жилищно-коммунального хозяйства в Украине: Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции (20-22 мая 2009 г.). – Донецк: ООО “Цифровая типография”, 2009. – С. 156-158.

2. **Остапенко, Д.В.** Движение твердой частицы в газоходах жаротрубного теплогенератора [Текст] / **Д.В. Остапенко, А.В. Лукьянов** // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях: Сборник научных докладов. Научно-практическая конференция (29 июня – 2 июля 2010 г.). – Москва: ООО “Эй Би Си Групп”, 2010. – С. 381-383.

АННОТАЦИЯ

Остапенко Д.В. Повышение эффективности жаротрубного теплогенератора за счет улучшения конвективного теплообмена.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. Макеевка, 2015.

Диссертация посвящена решению проблемы энергоэффективности теплоэнергетических предприятий - повышению эффективности конвективной части жаротрубного теплогенератора. В работе в качестве теплогенераторов локальных источников теплоснабжения, на основании аналитических исследований, рекомендуется использовать жаротрубные теплогенераторы мощностью от 0,5 до 3,0 МВт.

Комплексными экспериментальными исследованиями, которые проводились на натурной модели жаротрубного теплогенератора КВГМ-1,6-95СН с помощью новейшего оборудования, получены данные, позволившие определить эффективность применения турбулизатора потока в конвективных трубках теплогенератора.

Усовершенствована математическая модель конвективного теплообмена в конвективных трубках жаротрубного теплогенератора с турбулизатором потока. Разработана математическая модель движения частиц в газовом потоке конвективных трубок жаротрубного теплогенератора при невязком обтекании с учетом критерия Клячко.

Получено дальнейшее развитие повышения тепловой эффективности жаротрубного теплогенератора за счет применения турбулизатора потока в виде ломаной ленты. Для обеспечения максимального эффекта турбулизатора его рекомендуется выполнить в соответствии с параметрами: ширина $0,2d_y$, расстояние между соседними вершинами (шаг) $0,4d_y$.

В процессе разработки программы оптимизации теплоснабжения г. Макеевки было разработано комплексное применение автономных котельных малой мощности с использованием высокоэффективных жаротрубных теплогенераторов в том числе в комбинации с ныне действующими районными котельными. Выполнено исследование загрязнения приземного слоя атмосферы дымовыми газами от автономных источников теплоснабжения.

Применение турбулизатора потока в теплогенераторе КВГМ-1,6-95СН позволило увеличить его КПД на 2% до 94%. Тем самым удалось достичь экономии газообразного топлива в размере 16,7 тыс. м³ газа за отопительный сезон. При стоимости природного газа для теплоснабжающих предприятий ЖКХ на уровне отопительного сезона 2013-2014 годов в размере 1030 грн. за 1000 м³ экономия средств одним теплогенератором составит 17185 грн. за отопительный сезон. Стоимость предложенного турбулизатора составляет 4000 грн., а его срок эксплуатации составляет 4 года.

Ключевые слова: жаротрубный теплогенератор, конвективная часть, теплообмен, турбулизатор потока, математическая модель, локальный источник теплоснабжения, энергетическая эффективность.

АНОТАЦІЯ

Остапенко Д.В. Підвищення ефективності жаротрубного теплогенератора за рахунок поліпшення конвективного теплообміну.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 - теплопостачання, вентиляція, кондиціонування повітря, газопостачання та освітлення. Донбаська національна академія будівництва і архітектури. Макіївка, 2015.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми енергоефективності теплоенергетичних підприємств – підвищенню ефективності конвективної частини жаротрубного теплогенератора.

Комплексними експериментальними дослідженнями, які проводилися на натурній моделі жаротрубного теплогенератора КВГМ-1,6-95СН за допомогою новітнього обладнання, отримані дані, що дозволили визначити ефективність застосування турбулізатора потоку в конвективних трубках теплогенератора.

Розроблено математичну модель руху твердої частинки в газовому потоці конвективних трубок жаротрубного теплогенератора при невязкою обтіканні з урахуванням критерію Клячко.

Розроблено рекомендації з розміщення локальних джерел теплопостачання з екологічної точки зору.

Застосування турбулізатора потоку в теплогенераторі КВГМ-1,6-95СН дозволило збільшити його ККД на 2% до 94%. Тим самим вдалося досягти економії газоподібного палива в розмірі 16,7 тис. м³ газу за опалювальний сезон. При вартості природного газу для теплопостачальних підприємств ЖКГ на рівні опалювального сезону 2013-2014 років у розмірі 1 030 грн. за 1000 м³ економія коштів одним теплогенератором складе 17185 грн. за опалювальний сезон. Вартість запропонованого турбулізатора становить 4000 грн., а його термін експлуатації становить 4 роки.

Ключові слова: жаротрубний теплогенератор, конвективна частина, теплообмін, турбулізатор потоку, математична модель, локальний джерело теплопостачання, енергетична ефективність.

ABSTRACT

Ostapenko D.V. Improving the efficiency of fire-tube heat generator by improving convective heat transfer.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.03 - heating, ventilation, air conditioning, gas supply and illumination. Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Makiyivka 2015.

Comprehensive experimental studies that were carried out on a full-scale model of the fire-tube heat boiler KVGM-1,6-95SN using the modern equipment, finding datas, possible to determine the effectiveness of convective flow in the turbulator tubes of a boiler.

Developed mathematical model of the motion of solid particles in a gas flow tube fire-tube convective heat source in the inviscid flow, taking into account the criterion Klyachko.

The recommendations on the placement of local heat sources from an environmental standpoint.

Application flow baffle heat generator KVGM-1,6-95SN allowed to increase its efficiency by 2% to 94%. Thereby it achieved savings of gaseous fuel in the amount of 16,7 thousand m³ of gas per heating season. When the cost of natural gas for heat supply utilities at the level of the heating season in 2013-2014 in the amount of 1030 UAH for 1000 m³ savings will be one heat generator 17185 UAH during the heating season. The cost of the proposed baffle is 4000 UAH, and its service life is 4 years.

Keywords: fire-tube heat generator, the convective part, heat transfer, the turbulator, the mathematical model, a local source of heat, energy efficiency.