

На правах рукописи

**ПЕТРОВА ЕЛЕНА АЛЕКСЕЕВНА**

**Электроинтенсификация горения в газовых водогрейных котлах**

05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

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

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Андреев Сергей Андреевич**

**Официальные оппоненты:** **Голубкович Александр Викторович**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ФГБНУ ВИМ;

**Смирнов Александр Анатольевич**  
кандидат технических наук,  
старший инженер-проектировщик  
ЗАО «Связь инжиниринг М».

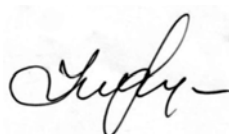
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет» (ФГБОУ ВПО РГАЗУ).

Защита состоится 29 сентября 2015 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 006.037.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ВИЭСХ и на сайте <http://viesh.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Алексей Иосифович  
Некрасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Серьезной проблемой современного сельского хозяйства является рациональное использование традиционных видов топлива. К сожалению, многие технологические процессы, связанные со сжиганием углеводородных энергоносителей, происходят в неэкономичных режимах. Результатом этого являются перерасход топлива и существенный вред, наносимый окружающей среде. Среди таких процессов значительное место занимает производство горячей воды, реализуемое в малых котельных на газовом топливе, в домах и сооружениях АПК.

Анализ состояния вопроса показал, что одним из путей оптимизации режимов горения может стать создание условий для тщательного выдерживания соотношения объемов топлива и окислителя. Соблюдение этого соотношения может быть достигнуто посредством принудительной и регулируемой подачи окислителя в топочную камеру. В качестве окислителя возможно применения воздуха, кислорода или его аллотропического видоизменения – озона. Последний вариант оказывается наиболее предпочтительным, поскольку окислительные свойства озона выше, чем у кислорода, а его получение технически несложно и довольно дешево.

В результате обзора исследований по вопросу использования озона в технологических процессах, проведенных учеными М.Я. Пурмалом, Н.В. Ксензом, И.А. Потапенко, Д.А. Нормовым, В.А. Драгиным, А.В. Голубковичем и др., сделан вывод о перспективности применения озона в качестве окислителя в реакциях горения в производственных условиях. Вместе с тем приходится констатировать, что газовые водогрейные котлы с озоновым наддувом в России и за рубежом пока не выпускаются. Такое положение сложилось вследствие недостаточной изученности процесса, отсутствия достоверных сведений о его режимах и недостатке информации о возможности и принципах управления. Помимо этого, предшествующие исследования не затрагивали импульсные режимы подачи озона, о перспективности которых свидетельствуют результаты рекогносцировочных экспериментов. Кроме того, на сегодняшний день еще не созданы простые и достаточно надежные котлы с озоновым наддувом, работа которых была бы независима от внешнего источника электроэнергии.

Таким образом, проблема изучения процесса горения газа в озонированной среде, разработки методов и режимов подачи озона в топочную камеру, конструирования простых электронезависимых водогрейных котлов является актуальной.

**Целью исследования** является совершенствование методов и режимов подачи озона в топочные камеры и разработка конструкций электронезависимых газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом.

### **Задачи исследования:**

1. Проанализировать современные методы интенсификации горения в топочных камерах газовых водогрейных котлов, изучить механизм воздействия озono-воздушной смеси на процесс горения и получить математическую модель динамического баланса концентрации озона в топочной камере.

2. Обосновать целесообразность подачи озона в импульсном режиме и сформировать принцип математического описания процесса импульсного озонирования среды.

3. Доказать возможность подачи ионизированного озона энергией электрического поля.

4. Проанализировать процесс самораспада озона и получить аналитические зависимости интенсивности разложения озона от режимов подачи и параметров котла.

5. Экспериментально исследовать процесс горения в озono-воздушной среде, определить параметры озonoвого наддува и разработать алгоритм управления электроозонатором.

6. Разработать конструкции электронеzависимых газовых водогрейных котлов с озonoвым наддувом, произвести их производственную проверку, оценку надежности и экономической эффективности.

**Объектом исследования** являются газовые водогрейные котлы.

**Предметом исследования** являются физические процессы воздействия озono-воздушной смеси на горение топлива, самораспада озона и взаимодействия его заряженных частиц с электрическим полем.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались законы физической химии, теория дифференциальных уравнений, дискретное преобразование Теллера-Боксера, методы математической статистики и планирования эксперимента.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель динамического баланса концентрации озона в топочной камере, позволяющая оценить изменение концентрации озона во времени и рассчитать производительность озонатора с учетом участия озона в процессе горения и аккумулярующих свойств топочной камеры;
- принцип построения математической модели процесса импульсного озонирования среды, дающий возможность составлять рабочие формулы для определения частоты включения озонатора в зависимости от его параметров и характеристик котла;
- способ подачи ионизированного озона с помощью электрического поля, включающий использование механических вентиляторов;
- аналитические зависимости интенсивности разложения озона от режимов его подачи и параметров котла, определяющие последовательность выбора озонатора требуемой производительности;
- алгоритм управления электроозонатором, предусматривающий выбор напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора в зависимости от требуемого режима горения и производительности котла;
- принципы построения конструкций электронеzависимых газовых водогрейных котлов, реализующих электроинтенсификацию горения с озonoвым наддувом для обеспечения сокращения потребления топлива при одновременном улучшении состава дымовых газов.

**Научная новизна.** Выполненные исследования позволили получить совокупность новых положений и результатов, заключающихся в разработке:

- метода электроинтенсификации горения газа в топочных камерах водогрейных котлов посредством импульсной подачи озono-воздушной смеси;
- принципа построения математической модели процесса импульсного озонирования среды;
- математической модели динамического баланса концентрации озона и аналитических зависимостей разложения озона от режимов подачи и параметров котла;
- алгоритма управления электроозонатором;
- метода подачи ионизированного озона посредством воздействия электрического поля;
- конструкций электрoнезависимых газовых водогрейных котлов с озoновым наддувом.

**Наиболее существенные результаты, полученные лично соискателем:**

- разработана математическая модель динамического баланса концентрации озона в топочной камере;
- обоснована целесообразность подачи озона в импульсном режиме;
- разработан принцип построения математической модели процесса импульсного озонирования среды;
- проанализирован процесс самораспада озона и получены аналитические зависимости интенсивности разложения озона от режимов подачи и параметров котла;
- экспериментально исследован процесс горения в озono-воздушной среде и определены параметры озoнового наддува;
- разработан алгоритм управления электроозонатором;
- обоснована целесообразность подачи ионизированного озона энергией электрического поля;
- разработаны конструкции электрoнезависимых газовых водогрейных котлов с озoновым наддувом.

**Достоверность результатов** подтверждается тем, что результаты проведенных аналитических рассуждений согласуются с результатами экспериментальных исследований с расхождением не более 7%.

**Практическая ценность работы.** Полученные результаты исследований использованы:

- при разработке электрoнезависимых газовых водогрейных котлов для горячего водоснабжения объектов АПК;
- при разработке лабораторного стенда по изучению подачи ионизированного газа энергией электрического поля.

Техническая новизна разработанных конструкций подтверждена восемью патентами РФ.

**Реализация результатов работы.**

Техническая документация на изготовление электрoнезависимых газовых водогрейных котлов с озoновым наддувом передана для использования на спе-

специализированное производственное предприятие ООО «Термофор» и проектно-исследовательское предприятие ООО «ТехноПромСервис» г. Новосибирск.

### **Научная апробация работы.**

Основные положения исследования докладывались и обсуждались на Международной научно-технической интернет-конференции «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах» в г. Воронеж в 2011 г.; на Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике» в г. Санкт-Петербург в 2012 г.; на научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГАУ «Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования» в г. Санкт-Петербург в 2012 г.; на Международной научно-практической конференции «Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятия, отраслей и народнохозяйственных комплексов» в г. Пенза в 2012 г.; на научно-практической конференции с международным участием «XLI неделя науки СПбГПУ» в г. Санкт-Петербург в 2012 г.; на Международной научно-практической конференции «Инновационные энергосберегающие технологии» в г. Москва в 2012 г.; на 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и эффективности в экономике РФ» в г. Санкт-Петербург в 2012 г.; на XII Международной научно-технической конференции «Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем» в г. Москва в 2012 г.; на II Международной научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий» в г. Курск в 2012 г.; на Международной научно-практической конференции «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях» в г. Мичуринск в 2014 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 28 печатных работах общим объемом 9,0 п.л., из них на долю соискателя приходится 3 п.л., в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 монография и 8 патентов РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общего заключения и списка литературы из 107 наименований и 13 приложений, включает 201 страницу, 19 рисунков, 10 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

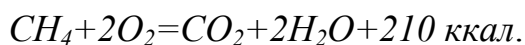
**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется научная концепция, определяются объект и предмет исследования, представляются основные положения, выносимые на защиту диссертации, а также данные о научной новизне и практической ценности работы.

**В первой главе** «Современные методы интенсификации горения в топочных камерах газовых водогрейных котлов» приведен обзор состояния и перспектив развития автономного теплоснабжения объектов АПК, изложены основы теории горения, дан анализ влияния условий горения на технико-экономические и экологиче-

ские характеристики водогрейных котлов, произведен обзор современных методов интенсификации горения, рассмотрены теоретические предпосылки возможности использования озона для обеспечения рационального и экологически чистого горения, обоснована целесообразность применения электрического поля для подачи ионизированных молекул озона в топочные камеры котлов.

Рациональное сжигание топлива является одной из важных задач эксплуатации теплотехнического оборудования. Это в полной мере относится и к небольшим водогрейным котлам, используемым для автономного отопления и горячего водоснабжения. Среди них возрастающая роль принадлежит водогрейным котлам на газовом топливе. Такие котлы удобны в эксплуатации, недороги и довольно надежны. Кроме того, работа газовых котлов легко управляема и автоматизируема. Вместе с тем, на сегодня просматриваются, по крайней мере, две причины, побуждающие к совершенствованию процесса сжигания газа в топочных камерах водогрейных котлов: с одной стороны, это – растущая цена на топливо, с другой, – возрастающие экологические требования.

Известно, что для успешного горения природного газа, необходимо тщательно выдерживать соотношение газ - кислород, поскольку само горение представляет собой реакцию окисления:



Чрезмерное количество кислорода снижает температуру дымовых газов и увеличивает тепловые потери котла. Кроме того, при завышенном количестве избыточного воздуха факел пламени сильно охлаждается и начинает образовываться  $CO$ . И наоборот, недостаточное количество кислорода вызывает неполное сгорание газа, что определяет его перерасход и нарушение экологических норм. Высокая стоимость производства кислорода сдерживает его применение в качестве окислительной составляющей процесса. Поэтому в большинстве современных котельных интенсификация горения реализуется принудительным наддувом воздуха, в состав которого входит 21% кислорода. Однако в бытовых котлах это обычно не делается, так как средства наддува существенно усложняют и удорожают котел, добавляют затраты на электроэнергию и создают предпосылки для возникновения акустических и вибрационных помех.

Интенсифицировать процесс горения при одновременном улучшении состава дымовых газов можно путем насыщения воздушной среды топочной камеры озоном. Озон получается при присоединении к молекулам  $O_2$  свободных атомов кислорода, образующихся под действием электрических разрядов, ультрафиолетовых лучей, гамма-квантов, быстрых электронов и других частиц высокой энергии. Из-за неустойчивости озона он должен производиться непосредственно перед сжиганием в топке котла.

На сегодняшний день получение озона технической сложности не представляет. В качестве внешнего побудителя процесса образования озона удобно использовать барьерный разряд. Процесс синтеза озона в этом случае состоит из двух стадий, на первой из которых в исходном газе происходит диссоциация молекулярного кислорода, а на второй – образование озона из атомарного кислорода. Энергозатраты при получении  $1 \text{ м}^3$  озона с концентрацией  $30 \text{ г/м}^3$  составляют  $37...40 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , что с учетом чрезвычайно высокой окислительной способности

озона позволяет сделать вывод о целесообразности его практического применения. Помимо интенсификации горения озонирование среды способно существенно повлиять на состав дымовых газов. Предшествующими исследованиями было установлено, что озон в определенной концентрации способствует снижению содержания оксида углерода в дымовых газах, снижению объемной доли кислорода, а также увеличению выхода углекислого газа. Кроме того, озон способствует снижению содержания в дымовых газах окислов азота  $NO$  и  $NO_2$ , которые составляют наиболее токсичную группу веществ. Озонирование воздушной среды увеличивает полноту сгорания углеводородного топлива и уменьшает химический недожог.

Известно, что наиболее гибким, экологически безопасным и легко управляемым является принудительный наддув. Однако широкому распространению этой технологии препятствует повышенное энергопотребление вентиляторов, а также акустические и вибрационные помехи при их эксплуатации. При использовании в качестве окислителя озона вопрос его активной подачи становится еще более актуальным, поскольку в этом случае приходится учитывать явление его самораспада.

Таким образом, подача газообразного окислителя с одной стороны, должна производиться интенсивно, с другой, – быть надежной, бесшумной и малоэнергосодержащей. Перечисленным требованиям удовлетворяют электростатические движители, принцип действия которых основан на ионизации молекул газообразного окислителя и придания им поступательного движения в электрическом поле. Электростатические движители вполне безопасны, экономичны, высоконадежны и практически бесшумны.

**Во второй главе** «Теоретические исследования процесса горения в озонированной среде» дано объяснение эффекта влияния озона на параметры горения, осуществлена оценка энергетических затрат на получение озона, исследовано разложение озона при его подаче в топочную камеру газового водогрейного котла.

Согласно уравнению Аррениуса, константа скорости химических превращений определяется температурой  $\vartheta$  и энергией активации молекул  $K_0$ :

$$K_1 = K_0 \exp(-E_0/R \vartheta),$$

где  $K_1$  – константа скорости химических превращений;  $K_0$  – коэффициент, отражающий число всех столкновений реагирующих молекул в единицу времени;  $\exp(-E_0/R \vartheta)$  – доля общего числа способных к реакции молекул.

Для увеличения константы скорости химической реакции необходимо либо повысить температуру, либо понизить энергию активации молекул. Повышение температуры связано со значительными техническими трудностями, поэтому более приемлемым является второй путь. В связи с этим необходимо обеспечить условия протекания химических реакций, при которых основная часть подводимой энергии расходуется на колебательное возбуждение молекул. Наиболее просто понизить энергию активации молекул и получить неравновесный молекулярный газ в воздушной среде можно с помощью высоковольтного резко неоднородного электрического поля. Образующийся озон устраняет период индукции, характерный для окисления насыщенных углеводородов кислородом, причем, окисление углеводородов ускоряется очень малыми количествами озона.



Влияние озона на кинетику окисления углеводородов обусловлено в основном его ролью в иницировании цепной реакции. Эффективная энергия активации окисления углеводородов в присутствии озона значительно снижается, что довольно сильно изменяет условия воспламенения, сдвигая нижний предел воспламенения в сторону более низких температур и давлений. Кроме того, озон ускоряет распространение пламени в смесях углеводородов с воздухом в результате ускорения окислительных реакций.

На сегодняшний день процесс синтезирования озона технической сложности не представляет и может быть осуществлен с помощью барьерного разряда. При использовании этого способа в потоке с давлением 0,13–0,2 МПа, требуемая мощность может быть оценена по формуле Мэйтли:

$$P = 4fC_{\Delta}U_b[U_p - U_b(C_{\Delta} + C_d)/C_{\Delta}], \quad (1)$$

где  $f$  – частота питающего напряжения, Гц;  $C_{\Delta}$  и  $C_d$  – емкости диэлектрического барьера и разрядного промежутка соответственно, Ф;  $U_b$  – напряжение горения разряда, В;  $U_p$  – амплитуда питающего напряжения, В.

С учетом тепловых потерь и обусловленным ими термического разложения образующегося озона, а также ввиду использования в качестве исходного газа воздуха, фактическая мощность озонатора должна быть увеличена в 8...10 раз:

$$P_{\text{пр}} = 0,32fC_{\Delta}U_b[U_p - U_b(C_{\Delta} + C_d)/C_{\Delta}]. \quad (2)$$

Принимая во внимание требуемую концентрацию озона на уровне 200 мг/м<sup>3</sup> применительно к водогрейному котлу АОГВ-25 с тепловой мощностью 25 кВт и средним потреблением газа 1 м<sup>3</sup>/ч было определено суточное потребление озона (72 г) и оценены энергозатраты на его получение (4,1 кВт·ч).

При разработке устройства подачи озона в топочную камеру необходимо принимать во внимание процесс его самораспада, который носит динамический характер. На первом этапе составления математической модели процесса определялись отдельные статические зависимости, а уже затем эти зависимости рассматривались с учетом координаты времени.

В первом приближении было сделано допущение, что интенсивность разложения озона зависит от совокупного влияния следующих факторов: начальной концентрации  $N_0$ , температуры  $\vartheta$ , скорости  $V$  и характера  $R$  его подачи:

$$C = f(N_0, \vartheta, V, R). \quad (3)$$

Интенсивность разложения озона может определяться собственно скоростью разложения, продолжительностью разложения до какого-то фиксированного значения (например, до периода полураспада), или остаточной концентрацией озона в рассматриваемом объеме.

Самораспад озона носит статистический характер: молекулы  $O_3$  распадаются в течение всего времени существования озона. При этом количество молекул, распадающихся в единицу времени, составляет определенную, постоянную часть количества нераспавшихся молекул. Эта часть была охарактеризована как постоянная распада и обозначена символом  $\lambda$ . Число молекул  $dN$ , распавшихся за время  $dt$ , равно  $\lambda N dt$ ,  $N$  – число нераспавшихся молекул в момент времени  $t$ . С учетом вышеизложенного получаем дифференциальное уравнение:

$$dN = -\lambda N dt. \quad (4)$$

После разделения переменных получим:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (5)$$

В результате интегрирования выражения (5) можно записать:

$$\ln N = -\lambda t + \ln C \text{ или } N = C \exp(-\lambda t). \quad (6)$$

Если известно первоначальное число  $N_0$  молекул ( $N = N_0$  при  $t = 0$ ), то можно определить произвольное постоянное  $C$ :  $N_0 = C$ , и, следовательно,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t). \quad (7)$$

Время  $Z$ , в течение которого распадается половина количества молекул озона, будет являться периодом его полураспада. Между значениями  $Z$  и  $\lambda$  имеется легко устанавливаемая связь. К моменту времени  $t = Z$  имеем  $N = \frac{N_0}{2}$  и, следовательно,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda Z), \quad (8)$$

откуда  $\exp(-\lambda Z) = 1/2$  и  $Z = (\ln 2)/\lambda \approx 0,693/\lambda$ .

В то же время  $\lambda = (\ln 2)/Z \approx 0,693/Z$ . Такое представление позволяет выразить  $N$  через  $Z$ , а именно:

$$N = N_0 \exp(-t \ln 2)/Z. \quad (9)$$

Пользуясь последней зависимостью, определим часть молекул озона, распадающуюся в течение заданного времени. Скорость самораспада озона может быть записана следующим образом:

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right|, \quad (10)$$

или, исходя из исходного дифференциального уравнения и его решения:

$$a = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t). \quad (11)$$

Через период полураспада скорость распада выражается по формуле:

$$a = \frac{N \ln 2}{Z} = \frac{0,693N}{Z}. \quad (12)$$

Вычислим среднюю продолжительность существования одной молекулы озона. Число  $dN$  молекул озона, сохранившихся в течение времени  $t$  и распавшихся в последующий промежуток времени  $dt$ , равно:

$$-dN = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) dt. \quad (13)$$

Эти молекулы имеют среднюю продолжительность существования, равную  $t$ . Чтобы получить среднюю продолжительность существования одной молекулы, нужно  $dN$  умножить на  $t$ , проинтегрировать результат по  $t$  в пределах от 0 до  $\infty$  и разделить его на первоначальное число молекул озона  $N_0$ :

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \lambda N_0 t \exp(-\lambda t) dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda} = \frac{Z}{\ln 2}. \quad (14)$$

Обозначив  $c_1(N_0) = a$ , остановимся на следующей зависимости:

$$c_1(N) = \frac{N \ln 2}{Z} = \frac{0,693N}{Z}. \quad (15)$$

Интенсивность разложения озона в значительной степени зависит от температуры. Известно, при 250°C он составляет 1,5 секунды. В результате аппроксимации имеющихся данных методом наименьших квадратов была установлена зависимость:

$$Z = c_2(\vartheta) = 5,5 \exp(-0,057 \vartheta), \quad (16)$$

где  $\vartheta$  – температура среды, °C.

В реальных условиях озонатор будет находиться при комнатной температуре, а воздуховод, соединяющий озонатор с топочной камерой, не прогреется более чем до 100...180°C. Следовательно, период полураспада в лучшем случае не превысит нескольких десятков секунд.

Для оценки зависимости интенсивности распада озона от скорости и характера его подачи было предложено следующее выражение:

$$c_3(V; R) = L_1(A + BV) + L_2 \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i, \quad (17)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – масштабированные коэффициенты;  $A$  и  $B$  – постоянные параметры;  $V$  – скорость поступательного движения озона;  $F_i$  и  $\alpha_i$  – сечение препятствия и угол его расположения по отношению направлению движения озона соответственно;  $i$  и  $n$  – номер и количество препятствий движению озона соответственно.

В предложенном выражении слагаемое  $L_1(A+BV)$  определяет зависимость интенсивности разложения озона от скорости подачи. При отсутствии перемещения озона его распад будет определяться постоянной составляющей  $L_1A$ , а при движении он возрастет на величину  $L_1BV$ . Зависимость интенсивности разложения озона от скорости его подачи объясняется увеличением вероятности соударений молекул при их движении.

На значение этой вероятности будет также оказывать влияние турбулентность движения молекул. Очевидно, что с ростом турбулентности вероятность соударений молекул и, соответственно, интенсивность разложения озона возрастает. Турбулентность движения молекул определяется конфигурацией воздуховода. Наличие изгибов воздуховода, препятствий и неровностей сказывается на характере движения озона: чем их больше, тем хаотичнее движение молекул. Эта зависимость определяется вторым слагаемым рассматриваемого выражения:  $L_2 \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i$ .

Таким образом, полная модель процесса может быть представлена в виде:

$$C = L \frac{0,693N}{5,5 \exp(-0,057\vartheta)} + L_1(A + BV) + L_2 \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i. \quad (18)$$

В последнем выражении введенный коэффициент  $L$  также является масштабированным. Этот коэффициент определяет долю зависимости интенсивности разложения озона от его концентрации на фоне других факторов.

Заменив численные значения делимого и делителя первого слагаемого на коэффициент 0,126, а также введя обозначения  $x_1=N$ ,  $x_2=\vartheta$ ,  $x_3=V$ ,  $x_4=F$  и  $x_5=\alpha$ , преобразуем выражение к традиционному виду:

$$C = L_3 x_1 \exp(0,057 x_2) + L_1(A + B x_3) + L_2 \sum_{i=1}^n x_{4i} \sin x_{5i}. \quad (19)$$

Зависимость интенсивности разложения озона является функцией пяти переменных  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$ . Первые четыре аргумента оказывают одностороннее воздействие на результирующую функцию: с их увеличением функция возрастает. В то же время аргумент  $x_5$  входит в периодическую подфункцию, поэтому можно ожидать, что с увеличением  $x_5$  значение  $c_3(R; V)$  будет изменяться периодически.

Традиционный подход к исследованию функций нескольких аргументов предполагает частное дифференцирование суммарной функции  $C(x_1; x_2; x_3; x_4; x_5)$  по каждому из них и приравнивания полученных выражений к нулю:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{dx_1} = L_3 \exp(0,057x_2) = 0 \\ \frac{dC}{dx_2} = L_3 x_1 0,057 \exp(0,057x_2) = L_4 x_1 \exp(0,057x_2) = 0 \\ \frac{dC}{dx_3} = BL_1 = 0 \\ \frac{dC}{dx_4} = L_2 \sum_{i=1}^n \sin x_{5i} = 0 \\ \frac{dC}{dx_5} = L_2 \sum_{i=1}^n x_{4i} \cos x_{5i} = 0 \end{array} \right. \quad (20)$$

При этом аргумент  $x_5$  может принимать значения от нуля до  $\pi$ . Таким образом, оценка интенсивности разложения озона и подбор озонатора соответствующей мощности могут быть произведены посредством анализа стационарных точек сформированных уравнений  $\frac{dC}{dx_i} = 0$  при  $i=1 \dots 5$ .

**В третьей главе** «Изучение закономерностей подачи озона в область горения топлива» сформулирована цель теоретического изучения процесса подачи озона, обоснован электростатический метод подачи ионизированного озона в топочную камеру, рассмотрены вопросы управления концентрацией озона в области горения, исследован динамический баланс концентрации озона в топочной камере, обоснована целесообразность подачи озона в импульсном режиме, сформулирован принцип математического моделирования процесса импульсного озонирования среды на основе дискретного преобразования Теллера-Боксера.

Дополнение конструкций небольших водогрейных котлов вентиляторами, осуществляющими подачу озона в топочную камеру, связано с их усложнением, удорожанием, снижением надежности и образованием вибрационных и акустических помех. Во избежание перечисленных недостатков рассмотрена возможность подачи озона за счет воздействия электрического поля на ионизированные частицы озона.

Скорость частиц массой  $m$  с зарядом  $e$  на выходе из электростатического движителя определяется из уравнения энергии:  $m(\omega^2 - \omega_a^2)/2 = e(u_a - u)$ , откуда:

$$\omega = \sqrt{\frac{2e(u_a - u)}{m} + \omega_a^2}, \quad (21)$$

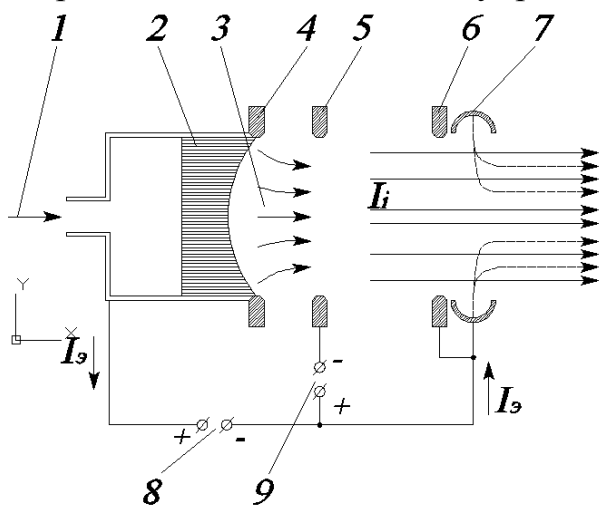
где  $(u_a - u)$  – разность потенциалов между началом и концом разгона;  $\omega_a$  – начальная скорость ионов на аноде.

В результате подстановки численных данных было установлено, что для обеспечения подачи озono-воздушной смеси  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  при концентрации озона  $200 \text{ мг}/\text{м}^3$  достаточно располагать электрическим напряжением между электродами  $18 \dots 23 \text{ кВ}$ . При этом суточные затраты энергии составят  $0,02 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

Принципиальная электрическая схема устройства подачи ионизированного озона с помощью электрического поля представлена на рисунке 1.

В процессе работы котла концентрация озона в топочной камере является случайной, хотя и ожидаемой величиной. Концентрация озона зависит от стадии горения, химического состава газа, его количества и условий подачи, а также от режима удаления продуктов сгорания. Изменение концентрации озона по мере

его подачи и использования для интенсификации горения является функцией от соотношения названных аргументов и от аккумулирующих свойств топочной камеры. Для обеспечения эффективной интенсификации процесса горения концентрацией озона необходимо управлять.



- 1 – рабочее тело (озон);
- 2 – ионизатор; 3 – поток ионов;
- 4, 5, 6 – фокусирующий, ускоряющий и замедляющий электроды соответственно;
- 7 – нейтрализатор;
- 8, 9 – источники электрической энергии

Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема устройства подачи ионизированного озона с помощью электрического поля

На практике целенаправленное изменение расхода подаваемого озона легко реализуется изменением режимов работы озонатора. С целью выявления количественных характеристик управления было составлено и проанализировано дифференциальное уравнение баланса концентрации озона:

$$xdt = \rho dy + kydt, \quad (22)$$

где  $x$  – расход (подача) озона;  $y$  – концентрация озона;  $\rho$  – плотность озона;  $k$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий характер расхода озона на интенсификацию горения в функции его концентрации и времени. Уравнение (22) свидетельствует о том, что подводимый в топочную камеру озон  $x$  расходуется на увеличение его концентрации  $\rho dy$  и на интенсификацию горения  $kydt$ .

В результате интегрирования этого уравнения была получена следующая зависимость:

$$y = \left[ \frac{x}{k} e^{\frac{k}{\rho}t} + C \right] e^{-\frac{k}{\rho}t} \text{ или } y = \frac{x}{k} + \frac{C}{e^{\frac{k}{\rho}t}}, \quad (23)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Выражение (23) показывает зависимость концентрации озона от интенсивности его подачи и расхода в функции времени. Из этого выражения видно, что в целом концентрация изменяется во времени монотонно, принимая установившееся значение при  $t \rightarrow \infty$ . Процесс изменения концентрации является аperiодическим и может быть представлен в виде звена первого порядка:

$$W(p) = \frac{K}{Tp+1}, \quad (24)$$

где  $K$  – коэффициент передачи;  $T$  – постоянная времени.

Численное значение  $K$  рассчитывается как частное от деления установившегося значения  $Y$  на величину подачи озона  $X$ , а значение  $T$  определено графоаналитическим методом по кривой переходного процесса, построенной на основании зависимости (23). Для обеспечения устойчивого и качественного режима

работы системы с апериодическим звеном в качестве объекта управления можно рекомендовать управляющее устройство, реализующее пропорционально-дифференциальный, пропорционально-интегральный или пропорционально-интегрально-квадрат-интегральный законы управления.

Поступление озона в область горения и его расход являются взаимосвязанными величинами. С одной стороны, подача озона интенсифицирует горение, с другой, – интенсифицированное горение требует большего количества озона. Таким образом, при ограниченной подаче озона видимый эффект стимуляции пламени может не произойти.

Динамика образования и потребления озона могут быть описаны системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = kN - k_1Nx \\ \frac{dx}{dt} = k_2N \end{cases}, \quad (25)$$

где  $N$  – количество образовавшихся молекул озона;  $x$  – требуемое количество молекул озона;  $k$ ,  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициент пропорциональности,  $\frac{dN}{dt}$  – скорость образования озона;  $\frac{dx}{dt}$  – скорость изменения потребности в озоне. Поделив переменные, получим:  $\frac{dN}{dx} = \frac{k}{k_2} - \frac{k_1}{k_2}x$ , откуда  $N = \frac{k}{k_2}x - \frac{k_1}{2k_2}x^2 + C_1$ .

Так как  $x=0$  при  $N=0$ , то  $C_1=0$ . Связь между количеством образовавшихся молекул озона и требуемым количеством молекул озона устанавливается зависимостью:

$$N=ax - bx^2, \quad (26)$$

где обозначено:

$$a = \frac{k}{k_2} \text{ и } b = \frac{k_1}{2k_2}. \quad (27)$$

Для определения зависимости количества молекул озона от времени  $t$ , преобразуем равенство (26) к виду:  $bx^2 - ax + N = 0$  и разрешим его относительно  $x$ :

$$x = \frac{a}{2b} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} - \frac{N}{b}}. \quad (28)$$

Подставим эту зависимость, выраженную через  $N$ , в первое уравнение системы (25). Тогда:

$$\frac{dN}{dt} = kN - \frac{k_1a}{2b}N \mp k_1N \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} - \frac{N}{b}}. \quad (29)$$

В результате преобразований получим:

$$N = M \left(1 - th^2 \frac{kt}{2}\right) \text{ или } N = \frac{M}{ch^2(kt/2)}. \quad (30)$$

Из последнего выражения следует, что фактическое количество молекул озона в топочной камере сначала возрастает до некоторого наибольшего значения  $M$ , а затем убывает до нуля, поскольку интенсифицированное горение требует увеличенного количества озона. Следовательно, варьированием величиной коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ , а также периодически прерывая процесс подачи озона, можно существенно повысить энергетическую эффективность процесса.

Целью математического моделирования реакции пламени на импульсную подачу озono-воздушной смеси в топочную камеру газового котла явилось выявление количественных характеристик процесса, а также теоретическое обоснование рабочих параметров соответствующих технических средств.

Общее математическое описание процесса оказалось возможным при совместном решении общего уравнения динамики системы, в которую в виде отдельных звеньев вошли входное воздействие в форме прямоугольного импульса и физический отклик в виде нарастающей и спадающей во времени амплитуды пламени. Поскольку движение выходной координаты одного звена вызывает начало движения входной, а затем и выходной координаты другого, оба эти звена можно считать соединенными последовательно. Таким образом, общее уравнение динамики системы предлагается записать в виде произведения передаточных функций прямоугольного импульса  $W_{имп}$  и линейной части (нарастающего и зеркально убывающего аperiodического процесса второго порядка)  $W_{лин}$ :  $W_{сист} = W_{имп} W_{лин}$ .

Решением задачи может послужить последовательное представление передаточных функций  $W_{лин}$  и  $W_{имп}$  на языке дискретных  $w$  – преобразований в соответствии с преобразованием Тэллера-Боксера. При этом импульсное воздействие запишется в виде:

$$W_{имп}(w) = \frac{BT_k}{a} \frac{2+3w+w^2}{w}, \quad (31)$$

где  $T_k$  – период квантования;  $B$ ,  $a$  – амплитуда и продолжительность импульса соответственно.

Для перевода передаточной функции линейной части  $W_{лин}(P)$  в исходном выражении аperiodического процесса второго порядка необходимо поделить числитель и знаменатель на оператор Лапласа  $P$  в старшей степени и найти соответствующие им эквиваленты на языке  $w$ .

С учетом этой замены передаточную функцию линейной части  $W_{лин}$  можно представить в виде:

$$W_{лин}(w) = \frac{K \frac{T_k(1-2w^2)}{12w^2}}{T_2 + T_1 \frac{T_k}{2} \frac{1}{w} + \frac{T_k^2(1-2w^2)}{12w^2}}. \quad (32)$$

Общее уравнение динамики системы записывается следующим образом:

$$W_{общ} = \frac{KB^2T_k^3(-2w^6-12w^5-25w^4-18w^3+5w^2+4)}{(24T_2-4T_k^2)w^3+12T_1T_kw^2+2T_k^2w}. \quad (33)$$

Выражение (33) открывает возможность анализировать реакцию амплитуды пламени на частоту подачи озono-воздушной смеси с учетом параметров топки котла. Это позволяет выявлять оптимальные параметры интенсификации, разрабатывать новые технические средства и обосновывать режимы импульсной подачи озono-воздушной смеси.

**В четвертой главе** «Экспериментальные исследования электроинтенсификации горения в озono-воздушной среде» приведено описание экспериментальной установки, обоснована целевая функция исследований зависимости эффективности горения от режимов работы озонатора, описаны этапы и результаты статистической обработки опытных данных, сформирована математическая

модель процесса, определены наиболее эффективные значения напряжения питания и частоты включения озонатора, проанализированы экспериментальные данные по выявлению зависимости концентрации озона от напряжения питания озонатора и интенсивности горения. Получено нелинейное уравнение регрессии и определен алгоритм управления озонатором.

Основной целью настоящих исследований явилось получение информации о зависимости эффективности горения топлива от режимов работы озонатора, сопоставление полученных результатов с расчетными значениями и экспериментальное определение приемлемых параметров процесса. Исследованию подвергались два фактора: напряжение питания и частота включения озонатора. В процессе эксперимента напряжение на первичной обмотке повышающего трансформатора варьировалось в диапазоне от 200 до 230 В, а частота его включения – от 0 до 2 Гц. Эффективность горения оценивалась по амплитуде пламени над фитилем свечи. С целью обеспечения возможности статистической обработки результатов, а также для достижения требуемой точности эксперимент проводился в трехкратной повторности.

На рисунке 2 представлена фотография экспериментальной установки.

В процессе выполнения двухфакторного дисперсионного анализа вычислялись групповые средние значения экспериментальных данных по напряжению питания и частоте включения озонатора  $\bar{Y}_{x_1} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Y_{x_{1i}}$  и  $\bar{Y}_{x_2} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Y_{x_{2i}}$ , где  $Y_{x_{1i}}$  и  $Y_{x_{2i}}$  – значение амплитуды пламени при соответствующих факторах, см, а также общее среднее значение результатов, измерений  $\bar{Y} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{x_{ij}}$ , где



$Y_{x_{ij}}$  – текущее значения амплитуды пламени, по обоим факторам. Далее вычислялись средние изменчивости, обусловленные варьированием напряжения питания и частотой включения озонатора. После этого оказалось возможным определить общую изменчивость по обоим факторам и случайную изменчивость.

Рисунок 2 – Фотография экспериментальной установки

Оценка влияния изменений факторов  $X_1$  и  $X_2$  на выходную величину  $Y$  производилась по критерию Фишера. При этом на первом этапе исследовалось влияние фактора  $X_1$ , а на втором –  $X_2$ . Для фактора  $X_1$  по величинам степеней свободы  $k=3$  и  $l=9$  находилось табличное значение  $F^{таб.}=3,86$ , которое впоследствии сравнивалось с расчетной величиной  $F_{x_1} = \frac{\sigma_{x_1}^2}{\sigma_0^2} = 4,7$ . По соотношению  $F_{x_1} > F^{таб.}$  был сделан вывод о статистически значимом влиянии напряжения питания озонатора на изменение амплитуды пламени. Количественная мера этого



влияния оценивалась коэффициентом детерминации. Аналогично для фактора  $X_2$  и того же количества степеней свободы находилось табличное значение  $F_{x_2} = \frac{\sigma_{x_2}^2}{\sigma_0^2} = 16,5$ , устанавливалась справедливость соотношения  $F_{x_2} > F^{таб.}$ , определялось статистически значимое влияние частоты включения озонатора и вычислялся коэффициент детерминации  $r_{x_2}^2 = \frac{\sigma_{x_2}^2}{\sigma^2} = 0,74$ . Для построения неполной квадратичной регрессионной модели по результатам полного факторного эксперимента  $2^2$  использовалась матрица с равномерным дублированием.

Поскольку каждый вариант эксперимента проводился при одинаковом количестве повторений, однородность дисперсий массива оценивалась по критерию Кохрена. При этом вычислялось расчетное значение критерия  $G_p$ , которое сравнивалось с теоретическим  $G_{таб.}$ :  $G_p = \frac{S_{y_{u_{max}}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2} = 0,35$ , где  $N$  – общее количество опытов, а  $S_{y_{u_{max}}}^2$  – максимальная дисперсия.

Математическая модель изучаемого процесса определялась в виде уравнения:  $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_{12}$ .

Для этого уравнения вычислялись: свободный член  $b_0$ :  $b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u$ ,  $b_0 = 3,35$ , коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты:  $\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_i \bar{Y}_u$ ,  $b_1 = 0,6$ ;  $b_2 = 0,9$  и коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия:  $b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{12} \bar{Y}_u$ ,  $b_{12} = 0,15$ .

Статистическая значимость полученных коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента. Таким образом, окончательная математическая модель имеет вид:  $y = 3,35 + 0,6x_1 + 0,9x_2$ .

В результате использования критерия Фишера посредством вычисления и сравнения погрешности опыта и погрешности уравнения регрессии был сделан вывод об адекватности математической модели.

Исследуемая зависимость имеет линейный характер и может быть графически представлена в виде плоскости (рисунок 3).

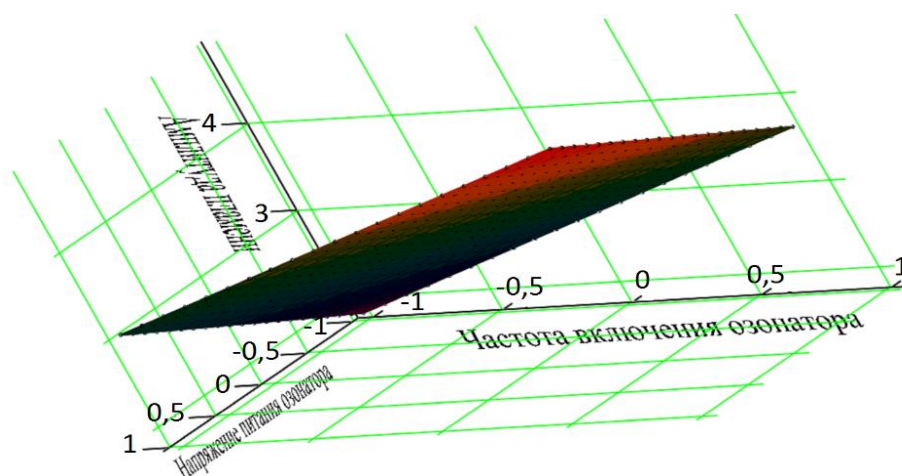


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды пламени от напряжения питания и частоты включения озонатора

На следующем этапе исследований экспериментально определялась зависимость концентрации озона в топочной камере ( $Y$ ) от интенсивности горения ( $X_1$ ) и производительности озонатора ( $X_2$ ). В качестве исследуемой функции выступало значение экспериментально замеренной концентрации озона  $K = Y$ . Количественной характеристики интенсивности горения служил световой поток  $\Phi = X_1$ , определяемый по косвенному показателю. Исходя из однозначной и почти линейной зависимости производительности электроозонатора от напряжения питания, его значение принималось за исследуемый фактор:  $U = X_2$ .

Для выявления количественной зависимости концентрации озона от режима работы генератора озона и интенсивности горения был проведен двухфакторный эксперимент, в ходе которого осуществлялось варьирование напряжением питания на первичной обмотке повышающего трансформатора озонатора в пределах от 140 до 220 В и световым потоком в пределах от 75 до 400 лм.

По полученным экспериментальным данным найдена эмпирическая зависимость  $K = f(U; \Phi)$ . Поскольку влияние каждого исследуемого фактора явно нелинейно, определение эмпирической зависимости осуществлялось в два этапа. На первом из них производился поиск модели вида  $K = f_1(a, b, \Phi)$  при  $U=140; 160; 180; 200; 220$  В, на втором – поиск моделей  $a = f_2(c; d; U)$  и  $b = f_3(f; e; U)$ , где  $a, b, c, d, e, f$  – параметры эмпирических формул:

$$K = 47,49 - \frac{5439,66}{U} + \frac{37648,33 - \frac{4564712,3}{U}}{\Phi}. \quad (34)$$

Найденная эмпирическая зависимость удовлетворительно воспроизводит исходные данные при средней погрешности 14,7%. В результате преобразования выражения (34) относительно  $U$  получим:

$$U = \frac{5,4 \cdot 10^3 \Phi + 4,56 \cdot 10^6}{3,7 \cdot 10^4 - (K - 47,49) \Phi}. \quad (35)$$

Последнее выражение представляет собой алгоритм управления озонатором для обеспечения интенсификации горения в пределах концентрации озона от 20 до 220 мг/м<sup>3</sup> при световом потоке пламени от 75 до 400 лм. Для оперативной реализации разработанного алгоритма при ручном управлении озонатором построена номограмма, представленная на рисунке 4.

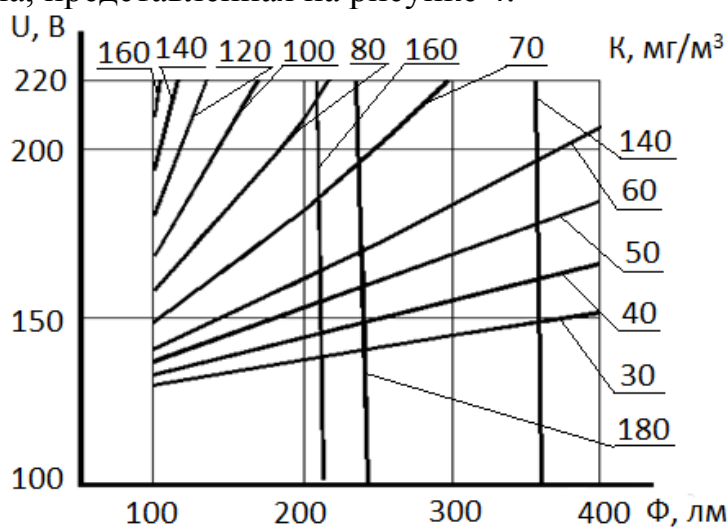


Рисунок 4 – Номограмма зависимости напряжения на первичной обмотке озонатора от концентрации озона и интенсивности горения

**В пятой главе** «Разработка, исследование и производственная проверка газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом» изложены основные требования к газовым водогрейным котлам, приведены описания конструкций и рабочие характеристики усовершенствованных электронезависимых водогрейных котлов с озоновым наддувом, сформулирован принцип автоматического управления озонатором, рассмотрены результаты оценки надежности и экономической эффективности разработанных конструкций.

Электронезависимые газовые водогрейные котлы для автономного отопления и горячего водоснабжения объектов АПК должны обеспечивать штатную тепловую производительность, удовлетворять экологическим требованиям по объему и составу продуктов сгорания, не требовать постоянного обслуживания и подключения к электросети, не являться источником окиси углерода и других ядовитых газов, а также не создавать вибрационных и акустических помех. Принимая во внимание перечисленные требования, а также на основании результатов проведенных исследований был разработан ряд конструкций, последовательно защищаемых патентами РФ. Все разработанные котлы проектировались на базе серийных водогрейных котлов, выпускаемых специализированным производственным предприятием ООО «Термофор», г. Новосибирск.

Помимо базовых блоков разработанные котлы включают озонаторы, расположенные рядом с топочными камерами. Для создания поступательного движения воздуха котлы комплектуются ионизаторами и системами электродов. Питание всех электропотребителей, входящих в состав котлов, осуществляется от термоэлектрических элементов со статическими преобразователями. Термоэлектрические элементы расположены в верхней части топочных камер и преобразуют тепловую энергию разнотемпературных сред в электрическую энергию. Подача озono-воздушной смеси в импульсном режиме обеспечивается либо циклическим включением озонатора, либо с помощью газоструйного генератора акустических колебаний.

Техническая документация на изготовление электронезависимых газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом передана для использования на специализированное производственное предприятие ООО «Термофор», и проектно-исследовательское предприятие ООО «ТехноПромСервис» г. Новосибирск.

В результате оценки надежности котлов было установлено, что при отсутствии регулярного технического обслуживания в течение расчетного периода эксплуатации они будут работать безотказно с вероятностью 92%. Экономический анализ показал, что внедрение разработанных конструкций позволит снизить эксплуатационные затраты на 20% при двухлетнем сроке окупаемости капитальных затрат. Помимо этого, при использовании разработанных котлов на 25% снижается содержание оксида углерода и оксида азота в продуктах сгорания.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. На основании анализа современных методов интенсификации горения в топочных камерах газовых водогрейных котлов, а также в результате изучения механизма воздействия озono-воздушной смеси на процесс горения и использования результатов математического моделирования сделано заключе-

ние о возможности применения озона в качестве окислителя при его концентрации 90...200 мг/м<sup>3</sup>. При этом для электроинтенсификации горения в газовых водогрейных котлах с тепловой мощностью 25 кВт и средним потреблением газа 1 м<sup>3</sup>/ч в течение суток потребуются 72 г озона, для получения которых должна быть затрачена электроэнергия в объеме 4,1 кВт·ч.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена целесообразность подачи озона в импульсном режиме. Доказано, что эффективность импульсного озонирования зависит от параметров топочной камеры и концентрации озono-воздушной смеси. Сформирован принцип математического описания процесса импульсного озонирования среды, позволяющей определять эффективную частоту включения озонатора.

3. Доказана возможность подачи ионизированного озона энергией электрического поля. Установлено, что для обеспечения подачи озono-воздушной смеси  $3,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с при концентрации озона 200 мг/м<sup>3</sup> достаточно располагать электрическим напряжением между электродами 18...23 кВ. При этом суточные затраты энергии составят 0,02 кВт·ч.

4. Разработана математическая модель динамического баланса концентрации озона в топочной камере. Проанализирован процесс самораспада озона и получены аналитические зависимости интенсивности его разложения от режимов подачи и параметров котла.

5. Разработан алгоритм управления озонатором, позволяющий устанавливать величину напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора в зависимости от требуемого режима горения и производительности котла.

6. Разработаны конструкции электронеависимых газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом. В результате оценки надежности котлов было установлено, что при отсутствии регулярного технического обслуживания в течение расчетного периода эксплуатации они будут работать безотказно с вероятностью 92%. Экономический анализ показал, что внедрение разработанных конструкций позволит снизить эксплуатационные затраты на 20% при двухлетнем сроке окупаемости капитальных затрат.

### **Основные результаты исследования отражены в следующих публикациях:**

#### **Публикации в ведущих изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:**

1. Петрова, Е.А Ресурсосберегающее автономное теплоснабжение объектов АПК / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Е.А. Петрова // Международный научный журнал. – 2011. – № 5. – С. 83–91.
2. Петрова, Е.А Совершенствование конструкций электронеависимых водогрейных котлов с озоновым наддувом / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Международный научный журнал. – 2013. – № 5. – С. 71–76.
3. Петрова, Е.А. Исследование количественных характеристик процесса перемещения ионов озона электростатическим движителем / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2013. – № 1. – С. 19–24.

4. Петрова, Е.А. Разработка алгоритма управления озонатором / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2014. – № 2. – С. 26–29.
5. Петрова, Е.А. Исследование динамического баланса концентрации озона в топочной камере водогрейного котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2014. – № 3. – С. 11–13.
6. Петрова, Е.А. Экспериментальное исследование горения в озono-воздушной среде / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Международный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 84–90.
7. Петрова, Е.А. К вопросу управления концентрацией озона в топочной камере водогрейного котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова, Т.В. Иванова // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 5. – С. 63–66.

#### **Патенты РФ:**

1. Патент № 119860 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006.01) Отопительный котел / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Нормов Д.А. – № 2012110351/06; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
2. Патент № 131459 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006.01) Отопительный котел / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И. – № 2012153818/06; заявл. 13.12.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
3. Патент № 131461 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006.01) Котел для приготовления горячей воды и пара / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И. – № 2013107151/06; заявл. 20.02.2013; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
4. Патент № 137091 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006.01) Устройство для нагрева воды / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Богоявленский В.М. – № 2013118676/06; заявл. 24.04.2013; Опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3.
5. Патент № 138737 U1 Российская Федерация МПК F24B5/06 (2006.01) Отопительно-варочная печь / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Бессонов К.Е., Богаченков А.Г. – № 2013141054/03; заявл. 06.09.2013; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8.
6. Патент № 140809 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006/01) Водогрейный котел / Андреев С.А., Петрова Е.А. – № 2013139515; заявл. 27.08.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
7. Патент № 144540 U1 Российская Федерация МПК F24H1/00 (2006.01) Водогрейный пиролизный котел / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Макаров Е.А. – № 2013157082/06; заявл. 24.12.2013; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 24.
8. Патент № 2535296 Российская Федерация МПК F24D3/12 (2006.01) Устройство для отопления / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И. – № 2012151928/06; заявл. 24.12.2012; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

#### **Монография**

1. Петрова, Е.А. Ресурсосберегающий способ повышения эффективности газовых котлов / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Опыт и проблемы управления мо-

дернизацией инновационной деятельности в социально-экономических и технических системах: монография. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – 111 с.

#### **Публикации в других изданиях:**

1. Петрова, Е.А. Использование озона для интенсификации горения в топках газовых водогрейных котлов / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах: материалы Международной научно-технической интернет-конференции. – Воронеж: ВГТА, 2011. – С. 162–167.
2. Петрова, Е.А. Озонирование среды сжигания топлива для улучшения состава дымовых газов водогрейных котлов / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Экология: Синтез естественно-научного, технического и гуманитарного знания: материалы II Всероссийского научно-практического форума, Саратов, 6–11 октября 2011 года. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. тех. ун-та, 2011. – С. 225–228.
3. Петрова, Е.А. Особенности подачи озона в топочную камеру газового котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике: труды Всероссийской конференции с международным участием 24–26 мая 2012 года. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 263–282.
4. Петрова, Е.А. Эффективность котлов с озоновым наддувом / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – СПб.: СПбГАУ, 2012. – С. 357–360.
5. Петрова, Е.А. Исследования разложения озона при его подаче в топочную камеру газового котла / С.А. Андреев, Т.В. Иванова, Е.А. Петрова // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятия, отраслей и народнохозяйственных комплексов: сборник статей IV Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С. 19–23.
6. Петрова, Е.А. Электротехнологический способ улучшения эксплуатационных показателей газовых котлов / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 116–118.
7. Петрова, Е.А. Математическое описание интенсификации горения импульсной подачей озono-воздушной смеси / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Информационно-управляющие системы в АПК: материалы Международного научно-практического семинара, посвященного 90-летию профессора В.Т. Сергванцева. – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. – С. 43–45.
8. Петрова, Е.А. Энергосберегающий способ подачи окислителя в топочную камеру водогрейного котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Пленарные доклады и тезисы сообщений Международной научно-практической конференции «Инновационные энергосберегающие технологии». – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. – С. 168–170.
9. Петрова, Е.А. Исследование подачи озона в топочную камеру газового котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Научные и технические средства обеспечения

энергосбережения и эффективности в экономике РФ: сборник научных трудов 2-й Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 9–15.

10. Петрова, Е.А. Математическое моделирование реакции пламени на импульсную подачу озono-воздушной смеси / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: сборник докладов XII Международной научно-технической конференции. Ч. 2. – М., 2012. – С. 205–212.
11. Петрова, Е.А. Использование электростатического движителя для подачи окислителя в топочную камеру котла / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы II Международной научно-практической конференции: в 2-х т. Т. 1. – Курск: Юго-Зап. ун-т, 2012. – С. 31–35.
12. Петрова, Е.А. Алгоритм управления автоматизированным озонатором / С.А. Андреев, Е.А. Петрова // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции 10–12 ноября 2014 г. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. – С. 290–294.

Подписано к печати 06.07.2015. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ № 05.

Отпечатано в информационно-издательском отделе ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова  
127550, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2