

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE
УДК 621.18

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЕМ В ПИРОЛИЗНЫХ КОТЛАХ

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент
E-mail: s.andreev@aol.com

ЗАГИНАЙЛОВ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ, докт. техн. наук, профессор
E-mail: energo-viz@mail.ru

ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор
E-mail: tatiana49@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Российская Федерация

Электрическое поле существенно влияет на скорость и характер горения твердого топлива. В зависимости от напряженности поля и полярности электродов, может быть достигнут как интенсифицирующий, так и ингибирующий эффект. Зависимость показателей горения от электрического поля может быть использована в пиролизных котлах. Первый этап сжигания топлива в таких котлах осуществляется при недостатке кислорода, что сопровождается выделением окиси углерода и риском его проникновения в помещение. В то же время увеличение содержания кислорода приводит к воспламенению топлива и нарушению пиролиза. В результате эксперимента было установлено, что уменьшение содержания кислорода можно заменить воздействием продольного электрического поля напряженностью от 1 до 7 кВ/см. При таком воздействии происходит угнетение горения (срыв пламени) за счет прекращения протекания цепных реакций деления заряженных радикалов воспламененных веществ. При этом не увеличивается выделение окиси углерода. Техническая реализация электротехнологического способа управления горением осуществлена на промышленном твердотопливном котле малой мощности. Экспериментальный образец этого котла оснащен емкостью для сжигания твердого топлива, выполненной из токопроводящего материала. Над емкостью расположен решетчатый электрод с возможностью его перемещения относительно емкости с помощью управляемого электропривода. При появлении пламени напряжение между емкостью и решетчатым электродом увеличивается, а расстояние между ними уменьшается. Напряженность продольного электрического поля возрастает, что приводит к подавлению пламени и восстановлению пиролизного режима.

Ключевые слова: горение, электрическое поле, напряженность, интенсификация и ингибирование горения, пиролизный котел, выделение угарного газа.

Формат цитирования: Андреев С.А., Загинайлов В.И., Воробьев В.А. Электротехнологический способ управления горением в пиролизных котлах // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. N2(90). С. 53-58.

ELECTROTECHNOLOGICAL METHOD OF CONTROLLING BURNING IN PYROLYS BOILERS

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor
E-mail: s.andreev@aol.com

VLADIMIR I. ZAGINAILOV, PhD (Eng), Professor
E-mail: energo-viz@mail.ru

VIKTOR A. VOROBIEV, PhD (Eng), Professor
E-mail: energo-viz@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

The electric field has a significant effect on the speed and character of the combustion of solid fuels. Depending on the field strength and polarity of the electrodes, both an intensifying and an inhibiting effect can be achieved. The dependence of the combustion parameters on an electric field can be used in pyrolysis boilers. The first stage of fuel combustion in such boilers is carried out with insufficient oxygen, which is accompanied by the release of carbon monoxide and the risk of its penetration into the room. At the same time, an increase in the oxygen content leads to fuel ignition and pyrolysis disturbance. As a result of the experiment, it was found that a decrease in the oxygen content can be replaced by the action of a longitudinal electric field with a strength of 1 to 7 kV/cm. With such an effect, combustion is suppressed (there is a flame failure) due to the termination of fission chain reactions of charged radicals of ignited substances. At the same time, the release of carbon monoxide does not increase. The electrotechnological method of combustion control is technically implemented using an industrial solid fuel boiler of low power. An experimental sample of this boiler is equipped with a box-shaped reservoir for burning solid fuel, made of a conductive material. Above the reservoir, there is a grid electrode able to move relative to the reservoir with the help of a controlled electric drive. When a flame appears, the voltage between the reservoir and the grid electrode increases, and the distance between them decreases. The strength of the longitudinal electric field increases, which leads to the suppression of the flame and the pyrolysis mode restoration.

Key words: burning, electric field, tension, combustion intensification and inhibition, pyrolysis boiler, carbon monoxide emission.

For citation: Andreyev S.A., Zaginailov V.I., Vorobiev V.A. Electrotechnological method of controlling burning in pyrolysis boilers. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 2(90): 53-58. (In Rus.).

Введение. Значительное место в технологических процессах современного АПК занимает горение органических веществ. В одних случаях мы заинтересованы в активизации горения, в улучшении его качественных показателей (горение в топках котлов, в рабочих камерах оборудования по производству травяной муки и т.д.) [1-3], в других, напротив, стремимся к предотвращению горения (исключения взрывов, пожаров, устранения условий для возникновения пламени и пр.) [4, 5]. При этом наиболее распространенные способы управления горением основаны на целенаправленном изменении подачи топлива или окислителя в рабочую зону [6-8]. В некоторых случаях эти воздействия ориентированы на объекты горения, вызывая в них структурные изменения, которые влияют на образование пламени. Накопленные к сегодняшнему дню сведения по воздействию на горение электрических полей открывают возможность практического использования этого явления в теплотехнических установках.

Цель работы – обобщение теоретических знаний по механизму воздействия электрических полей на горение, рассмотрение возможности использования отмеченного воздействия на угнетение пламени в пиролизных котлах и описание конструкции твердотопливного котла с электронным блоком управления горения.

Материал и методы. В качестве материалов исследований была использована теория горения, теория ионизации пламени, а также информация о современных промышленных котлах. При выполнении исследования применены методы и приемы библиографического обобщения, индукции и экспериментальной проверки теоретических заключений.

Результаты и обсуждения. Факт влияния электрического поля на горение известен более ста лет [9-11]. Вместе с тем единый взгляд на механизм воздействия электрической энергии на пламя до сих пор не сформировался. Проанализированные известные теории можно объединить в три группы:

1. Теория преобразования энергии электрического поля в тепловую форму, которое происходит непосредственно в объеме пламени. В результате такого

превращения происходит ускорение химических реакций, что, в соответствии с законом Аррениуса, приводит к повышению температуры:

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент скорости реакции; T – температура, $^{\circ}K$; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль \cdot $^{\circ}K$; E_a – энергия активации, Дж/моль; A – предэкспоненциальный множитель, характеризующий частоту столкновений реагирующих молекул, $c^{-1} \cdot m^3$.

2. Теория прямого воздействия электрического поля на скорость химических реакций вследствие поляризации реагирующих частиц и их активации; при этом активация частиц осуществляется посредством соударений с электронами, которые приобретают дополнительную энергию.

3. Теория «ионного ветра», согласно которой электрическое поле вызывает направленное движение вдоль своих силовых линий ионов и увлекаемых ими нейтральных частиц; движение частиц изменяет режим течения газа, в результате чего изменяется форма и скорость распространения пламени.

Все теории справедливы, однако доминирующая роль переходит от одной к другой, в зависимости от условий горения.

При воздействии электрических полей на горение переход от интенсифицирующего к ингибирующему эффекту может определяться изменением напряженности и направлением этих полей. Обычно исследователи проявляют интерес к интенсифицирующему эффекту, предлагая использовать электрические поля для повышения скорости горения, экономии топлива или улучшения состава дымовых газов. К ингибирующему эффекту обращаются гораздо реже, например, при разработке мер по предотвращению возгорания веществ или способов тушения пожаров. Ингибирующий эффект может найти применение в твердотопливных пиролизных водогрейных котлах. В этих котлах процесс горения осуществляется в двух камерах. В одной из них происходит медленное горение

топлива с выделением горячего газа, а в другой – догорание этого газа с выделением тепла. Для обеспечения медленного горения топлива доступ кислорода в пиролизную камеру ограничивают. Пиролизные котлы особенно эффективно работают на предварительно подготовленном топливе с одинаковыми размерами и однородными теплофизическими свойствами топливных элементов в виде пеллет или брикетов. В то же время при эксплуатации этих котлов необходимы тщательный контроль процесса пиролиза и оперативное управление содержанием кислорода в пиролизной камере. При избытке кислорода топливо вспыхивает и быстро сгорает, исключая перечисленные преимущества. При недостатке кислорода тление топлива может прекратиться, а риск проникновения в помещение угарного газа существенно возрасти. Кроме того, управление пиролизом за счет изменения подачи воздуха является высокоинерционным – при приложении управляющего воздействия условия горения будут оставаться прежними до возникновения нового устойчивого состояния. Это

состояние определяется соотношением объема участвующего в горении топлива, объема топочной камеры и количества кислорода.

Воздействие электрического поля на процесс горения послужило основой использования этого явления в качестве управляющего фактора при пиролизе. При этом основной задачей явилось обеспечение условий, при которых тление твердого топлива было бы устойчивым, но в то же время не переходило в фазу воспламенения.

Рекогносцировочный эксперимент проводился в керамической камере при газификации древесных пеллет. Управление пиролизом достигалось варьированием напряженности электрического поля за счет изменения напряжения, подводимого к пластинчатым электродам, а также расстояния между ними. Процесс реализовывался на базе топочной камеры водогрейного котла малой мощности «Буржуй-К», серийно выпускаемого ЗАО «Тепло-Гарант» [12]. Функциональная схема водогрейного пиролизного котла представлена на рисунке 1.

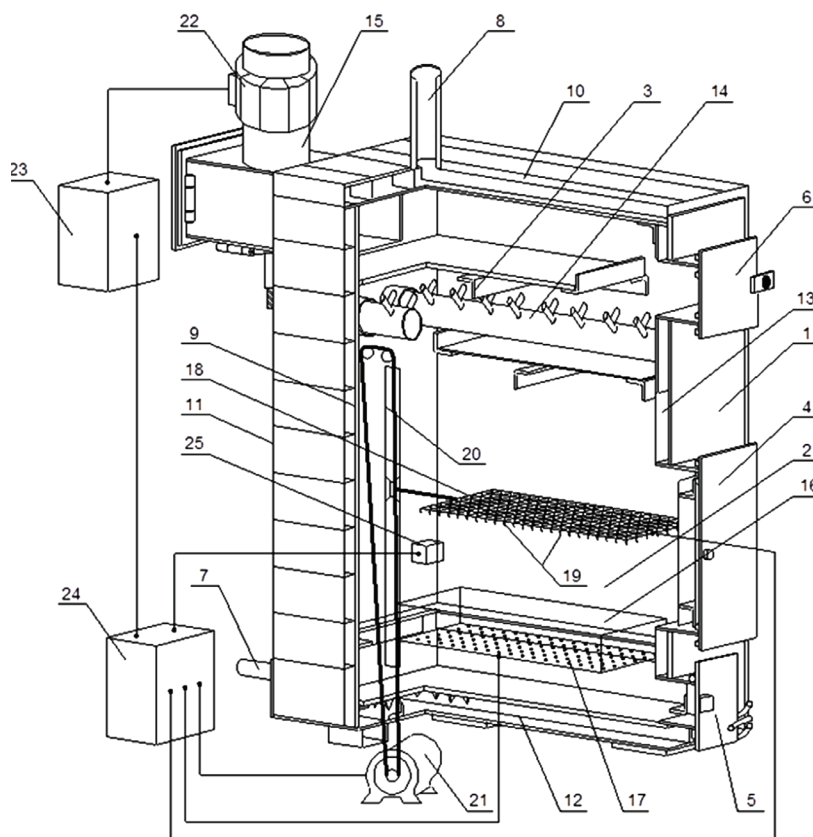


Рис. Функциональная схема водогрейного пиролизного котла:

- 1 – корпус; 2 – топочная камера; 3 – камера сжигания отходящих газов; 4 – дверца топочной камеры; 5 – дверца регулирования подачи первичного воздуха; 6 – внешняя дверца технологического окна; 7, 8 – патрубки обратной и подающей линии соответственно; 9, 10, 11 – боковая, верхняя и задняя водяные рубашки соответственно; 12, 13 – нижняя и верхняя камеры приточного воздуха соответственно; 14 – труба подвода вторичного воздуха; 15 – патрубок отходящих газов; 16 – коробкообразная емкость; 17 – отверстия для воздуха; 18 – решетчатый электрод; 19 – иглообразные элементы; 20 – протяжный механизм; 21 – электроприводное устройство; 22 – термоэлектрический преобразователь; 23 – блок питания; 24 – регулятор; 25 – фотоэлемент

Fig. Functional diagram of a pyrolysis boiler:

- 1 – a casing; 2 – a combustion chamber; 3 – a flue gas combustion chamber; 4 – a furnace door; 5 – a primary air regulation door; 6 – an external door of the process window; 7, 8 – return and flow connections, respectively; 9, 10, 11 – side, top and back water jackets, respectively; 12, 13 – lower and upper chambers of supply air, respectively; 14 – a pipe for supplying secondary air; 15 – a flue gas outlet; 16 – a box-shaped reservoir; 17 – holes for air; 18 – a grooved electrode; 19 – needle-shaped elements; 20 – a lingering mechanism; 21 – an electric drive device; 22 – a thermoelectric converter; 23 – power supply; 24 – a regulator; 25 – a photocell

Отличительная особенность конструкции заключается в том, что коробкообразная емкость 16 выполнена из токопроводящего материала, а решетчатый электрод 18 представляет собой рамку с расположенной внутри нее сеткой [13]. При этом иглообразные элементы 19 прикреплены к узлам этой сетки и направлены вниз. Протяжный механизм 20 выполнен в виде замкнутого металлического троса, натянутого между роликами, установленными на боковой поверхности топочной камеры 2, а термоэлектрический преобразователь 22 представляет собой батарею пластинчатых термопар. Внутренние поверхности термопар касаются внешней поверхности патрубка отходящих газов 15, а внешние контактируют с окружающей средой.

При работе твердотопливного пиролизного котла с электронным управлением разогреваемая вода поступает в корпус котла 1 через патрубок 7 обратной линии и нагревается, проходя через боковую, заднюю и верхнюю водяную рубашки 9, 10 и 11 соответственно. Выход нагретой воды из котла осуществляется через патрубок 8 подающей линии. Твердое топливо закладывается в топочную камеру 2 через дверцу 4 и размещается в коробкообразной емкости 16. Здесь происходит при ограниченном доступе кислорода горение, сопровождающееся процессом пиролиза. Доступ кислорода в зону горения осуществляется через отверстия 17. Количество кислорода в топочной камере 2 регулируется дверцей 5 регулировки подачи первичного воздуха.

Выделившийся в процессе пиролиза газ естественным путем поступает в камеру 3 сжигания отходящих газов, где в зоне инжекторов-дожигателей с калибровочными отверстиями происходит его смешение со вторичным воздухом. Этот воздух заранее подготавливается и подается через переднюю камеру вторичного воздуха 13 и через трубу подвода вторичного воздуха 14. Подготовка воздуха, поступающего в котел через дверцу 5 в нижнюю камеру 12 вторичного воздуха, осуществляется в результате разогрева воздуха окружающей среды. В результате термохимической реакции в камере 3 происходит сжигание поступивших из топочной камеры горючих газов. При этом также сгорает до 90% содержащихся в дыме мелких частиц, тем самым, не допуская их выброса в атмосферу. Остаточные дымовые газы отводятся из котла через патрубок 15.

Через внешнюю дверцу технологического окна 6 осуществляется наблюдение за процессом горения пиролизного газа. Ручное управляющее воздействие реализуется за счет подачи воздуха в топочную камеру 2 посредством изменения положения дверцы 5.

За счет разности температур на патрубке отходящих газов 15 и окружающей среды на выходе термоэлектрического преобразователя возникает постоянное по полярности электрическое напряжение. Это напряжение подается на вход блока питания 23. Здесь происходит формирование переменного напряжения и его повышение до значений, например, 12, 220 В и 2,5...5,0 кВ. Напряжение 12 В используется для питания регулятора 24, напряжение 220 В – для питания электроприводного устройства 21, а напряжение 2,5...5,0 кВ – для образования продольного электрического поля в топочной камере 2. Электрическая энергия с выхода блока питания 23 поступает на первый вход регулятора 24. На второй вход этого

регулятора подается сигнал с фотоэлемента 25, измеряющего уровень освещенности (и, соответственно, и наличие пламени) в топочной камере 2.

С выхода регулятора 24 электрическая энергия подается на коробкообразную емкость 16 и решетчатый электрод 18, образуя между ними разность потенциалов порядка 2,5...5,0 кВ. С другого выхода регулятора 24 переменное напряжение величиной 220 В подается на вход электроприводного устройства 21.

При появлении пламени регулятор 24 увеличивает значение напряжения между коробкообразной емкостью 16 и решетчатым электродом 18. Одновременно включается электроприводное устройство 21, которое через протяжный механизм 20 осуществляет сближение решетчатого электрода 18 и коробкообразной емкости 16. Происходит увеличение напряженности продольного электрического поля в топочной камере 2, и практически наблюдается мгновенное угнетение горения.

Угнетение горения (срыв пламени), проявляющегося в подавлении дробления частиц горящего топлива под влиянием внешнего электрического поля, осуществляется за счет прекращения протекания цепных реакций деления заряженных радикалов воспламененных веществ. При этом электрическое поле определяет выделение части электронов и разноименно заряженных радикалов из пламени и их осаждение на иглообразных элементах 19. Как правило, угнетение горения большинства топлив достигается при значениях напряженности электрического поля от 1 до 7 кВ/см. Угнетение горения электрическим полем не вызывает увеличения выделения окиси углерода, которое сопровождается принудительное гашение пламени за счет уменьшения подачи кислорода.

Работа регулятора 24 настраивается таким образом, чтобы процесс пиролиза протекал в граничном режиме, при котором выделение пиролизного газа было бы максимальным и в то же время воспламенения топлива не происходило. Кроме того, диапазон и точность регулирования процесса пиролиза в описываемой конструкции существенно увеличиваются за счет возможности варьирования трех факторов: значения электрического напряжения между коробкообразной емкостью 16 и решетчатым электродом 18, расстоянием между ними, а также количеством поступающего кислорода изменением положения дверцы 5 регулировки подачи первичного воздуха.

Управление регулятором для обеспечения устойчивой работы котла осуществляется следующим образом.

При рассмотрении пиролизного котла в качестве объекта управления будем считать, что входным параметром является напряженность электрического поля, а выходным – интенсивность горения. Эти параметры связаны инерционным образом. При значительном увеличении напряженности поля интенсивность горения вступит в стадию насыщения, что согласуется со всеми тремя взглядами на механизм воздействия:

– в соответствии с теорией преобразования энергии электрического поля в тепловую форму рост коэффициента скорости реакции по формуле (1) с повышением температуры экспоненциально ограничен;

– в соответствии с теорией прямого воздействия электрического поля на скорость химических реакций из-за поляризации и активации реагирующих частиц насыщение

будет обусловлено конечным количеством этих частиц (при активации и поляризации всех частиц дальнейшее увеличение напряженности не приводит к интенсификации горения);

– в соответствии с теорией «ионного ветра» значительный рост напряженности не вызовет неограниченного увеличения интенсивности горения из-за невозможности изменить количество потенциально способных к взаимодействию ионов и нейтральных частиц.

Таким образом, инерционный и ограниченный характер зависимости интенсивности горения от напряженности электрического поля дает основание заключить, что объект управления может быть описан дифференциальным уравнением первого порядка. Передаточная функция, соответствующая такому уравнению, выражается формулой:

$$W(p) = \frac{K_0}{T_0 p + 1},$$

где K_0 и T_0 – коэффициент передачи и постоянная времени объекта управления соответственно; p – оператор Лапласа.

Произведем выбор алгоритма функционирования оптимального управляющего устройства, исходя из требования о равенстве коэффициента ошибки в установившемся режиме нулю ($K_{0x} = 0$) и равенстве коэффициента ошибки по скорости регламентированному значению ($K_{1x} \neq 0$). В таком случае передаточная функция управляющего устройства будет определяться по формуле [14]:

$$W_{yy}(p) = \frac{T_0}{K_{1x} \cdot K_0} + \frac{1}{K_{1x} \cdot K_0 \cdot p}. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что управляющее устройство включает в себя последовательно соединенные фотоэлемент, регулятор и регулирующий орган (совокупность решетчатых электродов с иглообразными элементами), передаточная функция регулятора находится из соотношения:

$$W_p(p) = \frac{W_{yy}(p)}{W_\phi(p) \cdot W_{po}(p)}, \quad (3)$$

где $W_\phi(p)$ и $W_{po}(p)$ – передаточные функции фотоэлемента и регулирующего органа соответственно.

Фотоэлемент является практически безынерционным линейным звеном, что позволяет описать его статическим коэффициентом передачи $W_\phi(p) = K_\phi$. Поскольку результирующее воздействие электрического поля имеет накопительный характер, математическое описание регулирующего органа может быть произведено передаточной функцией идеального интегрирующего звена $W_{po}(p) = K_{po}/p$.

Подставив передаточные функции в выражение (3), получим:

$$W_p(p) = \frac{T_0}{K_{1x} \cdot K_0} + \frac{1}{K_{1x} \cdot K_0 \cdot p} = C_1 + C_2 p, \quad (4)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{1}{K_{1x} \cdot K_0 \cdot K_\phi \cdot K_{po}} \text{ и } C_2 = \frac{T_0}{K_{1x} \cdot K_0 \cdot K_\phi \cdot K_{po}}.$$

В соответствии с выражением (4), для устойчивой работы пиролизного котла с коэффициентом ошибки по скорости, не превышающим значение K_{1x} , регулятор напряженности поля должен выполнять пропорционально-дифференциальный закон управления.

Выводы

1. Для управления горением в пиролизных котлах, снижения инерционности процесса, расширения его диапазона, а также для уменьшения риска выделения окиси углерода целесообразно использовать электрическое поле напряженностью от 1 до 7 кВ/см.

2. Электрическое поле в топочной камере котла может быть образовано напряжением, поданным к коробкообразной емкости из токопроводящего материала и расположенному над ней решетчатому электроду. При этом решетчатый электрод выполняется в виде рамки, с помещенной внутри нее сеткой, в узлах которой укреплены иглообразные элементы, направленные вниз.

3. Изменение напряженности поля возможно за счет варьирования электрического напряжения, а также расстояния между коробкообразной емкостью и решетчатым электродом.

4. Управление процессом горения при отсутствии ошибки в установившемся режиме и минимальной ошибки по скорости может быть достигнуто при реализации пропорционально-дифференциального закона формирования управляющего воздействия.

Библиографический список

1. Родатис К.Ф. Котельные установки. Учебное пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов. М.: Энергия, 1977. 432 с.
2. Борщов Д.Я. Устройство и эксплуатация котельных малой мощности. М.: Стройиздат. Изд. 20-е испр. и доп., 1989. 198 с.
3. Баринов А.В., Батырев В.В., Укке О.В., Тегушов К.З. Теория горения и взрыва. Книга I. Теория горения. Новгород: Академия гражданской защиты МЧС России. 2006. 562 с.
4. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения; Под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. 352 с.
5. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное издание: в 2-х книгах / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. М.: Химия, 1990. Книга 1. 496 с., Книга 2. 384 с.
6. Петрова Е.А. Электроинтенсификация горения в газовых водогрейных котлах. Дисс. ... канд. техн. наук, 05.20.02. М.: ВИАЭСХ, 2015. 202 с.
7. Методические указания по составлению режимных карт котельных установок и оптимизации управления ими. РД 34.25.514-96. М.: СПО ОРГРЭС, 1998. 60 с.
8. Громцев С.А., Антуфьев В.Т. Методы вепольного повышения эффективности тепловых аппаратов пищевой промышленности // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 27-29.

9. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. Пер. с англ. Под общ. ред. В.А. Попова. М.: Энергия, 1976. 296 с.

10. Фиалков Б.С., Щербаков Н.Д., Плицин В.Т. Распределение электрического потенциала в углеводородных пламенах // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. Вып. 2. С. 104-108.

11. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968. 310 с.

12. Технический паспорт. Руководство по обслуживанию, эксплуатации и монтажу котла «Буржуй-К». Кострома: ЗАО «ТеплоГарант», 2010, 32 с.

13. Водогрейный пиролизный котел: Патент № 144540 РФ МПК F24 Н1/00 (2006.01) 2013157082/06 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Макаров Е.А.; заявл. 24.12.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24.

14. Кирилин Н.И. Теория расчета оптимальных систем автоматического управления: Научное издание. М., 1999. 161 с.

References

1. Roddatis K.F. Kotel'nyye ustanovki. Uchebnoye posobiye dlya studentov nezhnergeticheskikh spetsial'nostey vuzov [Boiler installations. Study manual for non-technical university students]. Moscow, Energiya, 1977: 432. (In Rus.)

2. Borshchov D.Ya. Ustroystvo i ekspluatatsiya kotel'nykh maloy moshchnosti [Design and operation of low-power boiler houses]. Moscow, Stroyizdat. 20th ed., reviewed and extended, 1989: 198. (In Rus.)

3. Barinov A.V., Batyrev V.V., Ukke O.V. Tegushov K.Z. Teoriya goreniya i vzryva. Kniga I. Teoriya goreniya [Theory of combustion and explosion (Study manual). Book I. Theory of combustion]. Novogorsk: Akademiya grazhdanskoj zashchity MCHS Rossii. 2006: 562. (In Rus.)

4. Pomerantsev V.V., Aref'yev K.M., Akhmedov D.B. et al. Osnovy prakticheskoy teorii goreniya [Fundamentals of the practical theory of burning]. Ed. by V.V. Pomerantsev. 2nd ed., reviewed and extended. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoye otdeleniye, 1986: 352. (In Rus.)

5. Baratov A.N., Korol'chenko A. Ya., Kravchuk G.N. et al. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva

ikh tusheniya: Spravochnoye izdaniye [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means]. Moscow, Khimiya, 1990. (In Rus.)

6. Petrova Ye.A. Elektrointensifikatsiya goreniya v gazovykh vodogreynykh kotlakh. Diss. ... kand. tekhn. nauk, 05.20.02 [Electro-intensification of combustion in gas hot-water boilers. PhD (Eng) thesis –5.20.02]. Moscow, VIESKH, 2015: 202. (In Rus.)

7. Metodicheskiye ukazaniya po sostavleniyu rezhimnykh kart kotel'nykh ustanovok i optimizatsii upravleniya imi [Methodical instructions for compiling mode maps of boiler plants and optimizing their operation]. RD34.25.514-96. Moscow, SPO ORGRES, 1998: 60. (In Rus.)

8. Gromtsev S.A., Antuf'yev V.T. Metody vepol'nogo povysheniya effektivnosti teplovykh apparatov pishchevoy promyshlennosti [Methods of vepolar increasing the effectiveness of heatinstallations in the food industry]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2010; 4: 27-29. (In Rus.)

9. Lauton J., Weinberg F. Elektricheskiye aspekty goreniya [Electrical aspects of combustion]. Translated from English. Ed. by V.A. Popov. Moscow, Energiya, 1976: 296. (In Rus.)

10. Fialkov B.S., Shcherbakov N.D., Plitsin V.T. Raspre-deleniye elektricheskogo potentsiala v uglevodorodnykh plamenakh [Distribution of electrical potential in hydrocarbon flames]. *Fizika goreniya i vzryva*, 1978; 14(2): 104-108. (In Rus.)

11. Stepanov Ye.M., D'yachkov B.G. Ionizatsiya v plameni i elektricheskoye pole [Ionization in a flame and an electric field]. Moscow, Metallurgiya, 1968: 310. (In Rus.)

12. Tekhnicheskij passport. Rukovodstvo po obsluzhivaniyu, ekspluatatsii i montazhu kotla "Burzhuy-K" [Technical passport. Manual for maintenance, operation and installation of the boiler "Burzhuy-K"]. Kostroma: ЗАО "ТеплоГарант", 2010. (In Rus.)

13. Andreyev S.A., Sudnik Yu.A., Petrova Ye.A., Makarov Ye.A. Vodogreynnyy piroliznyy kotel [Water heating pyrolysis boiler]: Patent No. 144540 RF, 2014. (In Rus.)

14. Kirilin N.I. Teoriya rascheta optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya: Nauchnoye izdaniye [Calculation theory of optimal automatic control systems: Scientific publication]. Moscow, 1999: 161. (In Rus.)

Критерии авторства

Андреев С.А., Загинайлов В.И., Воробьев В.А. провели обобщение и написали рукопись. Андреев С.А., Загинайлов В.И., Воробьев В.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 10.01.2019

Contribution

Andreyev S.A., Zagainailov V.I., Vorobiev V.A. summarized the material and wrote the manuscript. Andreyev S.A., Zagainailov V.I., Vorobiev V.A. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on January 10, 2019