

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.1

С.А. АНДРЕЕВ, Е.А. ПЕТРОВА

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ОЗОНИРОВАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

Прогрессивным способом повышения эффективности работы водогрейных котлов может стать горение газа в озono-воздушной среде. Известно, что озonoвый наддув обеспечивает снижение затрат газа на 15...20% и существенно улучшает химический состав продуктов сгорания. Вместе с тем озон является нестойким веществом, и его невозможно запастись заблаговременно. Поэтому получение озона должно производиться непосредственно в котлах. Получение озона сопровождается затратами энергии, и эти затраты необходимо учитывать при оценке эффективности работы водогрейного оборудования.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены химические реакции горения компонентов природного газа в кислородной среде и определена потребность в кислороде для котлов с тепловой мощностью 7...30 кВт. Принимая во внимание повышенные окислительные свойства озона, а также некоторые другие особенности горения газа в озonoвой среде, вычислим требуемое количество озона, составившего величину 3,5 г на каждый час работы котлов.

На основе анализа современных методов получения озона сделан вывод о целесообразности использования барьерного электрического разряда. Этот метод характеризуется высокой производительностью и удовлетворительными экологическими показателями. В результате анализа технических характеристик современных промышленных озонаторов было установлено, что для создания озono-воздушной среды с требуемой концентрацией озона озонатор должен обладать мощностью порядка 100 Вт. Эта мощность составляет примерно 0,33...1,5% от тепловой мощности рассматриваемых котлов, что свидетельствует о целесообразности озono-воздушного наддува в топочные камеры.

Ключевые слова: озон, интенсификация горения, топочная камера, водогрейный котел, затраты энергии на получение озона.

Повышение эффективности водогрейных котлов остается важной проблемой, занимающей современных разработчиков теплотехнического оборудования. При этом наряду с совершенствованием топочных камер, горелок и систем удаления продуктов сгорания, а также созданием всевозможных отражателей и утилизаторов тепла, значительное внимание уделяется мерам по интенсификации сжигания традиционных видов топлива.

Многочисленными исследованиями установлено, что эффективность горения во многом определяется режимами подачи топлива и окислителя [1, 2]. Доказано, что наряду с воздухом, в составе которого в среднем присутствует 21% кислорода, окислителем может выступать озон [3, 4]. Известно, что этот газ проявляет высокие окислительные свойства даже в сравнении с кислородом. Однако озон является крайне нестойким газом, что исключает возможность его заблаговременного получения и

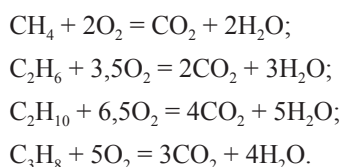
использования по мере необходимости. Поэтому в современных водогрейных котлах с озonoвым наддувом озон синтезируется специальными устройствами, расположенными в непосредственной близости от топочной камеры.

Интенсифицирующие свойства озона проявляются в существенном улучшении состава остаточных газов, а также в экономии топлива. Например, при использовании озonoвого наддува в газовых котлах экономия топлива составляет 15...20% [5]. Вместе с тем получение озона также связано с некоторыми энергозатратами. Эти затраты являются частью эксплуатационных издержек и поэтому остаются весьма важными в определении эффективности котла. Произведем оценку затрат на получение озона и сравним ее с эффектом, обусловленным интенсифицирующим действием.

Сначала определим требуемое количество озона для успешной интенсификации горения топлива,

а затем вычислим энергозатраты на его получение тем или иным способом, принимая во внимание возможность его применения в производственных условиях. В качестве примера возьмем один из серийных газовых водогрейных котлов малой мощности, используемый для отопления жилых домов в РФ. Это может быть любой котел из линейки популярных моделей АГВ, АОГВ, Vaillant atmo ТЕС, Лемакс Премиум, Alpine Air WL и им подобных с тепловой мощностью от 7 до 30 кВт. В соответствии с паспортными данными [6, 7, 8] потребление газа в этих котлах в среднем колеблется от 0,8 до 3,2 м³/ч. Для последующего расчета примем средний расход газа в объеме 2,0 м³/ч.

Известно, что природный газ содержит примерно 94% метана (СН₄), 2% этана (С₂Н₆), 1% бутана (С₄Н₁₀), 2% пропана (С₃Н₈), 0,5% азота (N₂) и 0,5% углекислого газа (СО₂) [9]. При этом в процессе горения азот и углекислый газ участия не принимают. Уравнения реакций горения имеют вид:



Горению будут подлежать следующие объемы газов: метана – $2 \times 0,94 = 1,88 \text{ м}^3$, этана – $2 \times 0,02 = 0,04 \text{ м}^3$, бутана – $2 \times 0,01 = 0,02 \text{ м}^3$ и пропана – $2 \times 0,02 = 0,04 \text{ м}^3$.

На этом этапе принимаем во внимание, что объемы газов пропорциональны количеству вещества этих газов, т.е. числу молей. Из уравнений реакций следует, что для полного сгорания метана требуется кислорода в два раза больше, чем составляет объем самого метана: $1,88 \times 2 = 3,76 \text{ м}^3$. Аналогично для сгорания этана необходимы $0,04 \times 3,5 = 0,14 \text{ м}^3$ кислорода, для сгорания бутана – $0,02 \times 6,5 = 0,13 \text{ м}^3$ кислорода и для сгорания пропана – $0,04 \times 5 = 0,2 \text{ м}^3$ кислорода.

Общая потребность в кислороде определяется суммой:

$$3,76 + 0,14 + 0,13 + 0,2 = 4,23 \text{ м}^3.$$

Для нормальной работы анализируемого котла в течение часа потребуются $4,23/0,21 = 20,1 \text{ м}^3$ воздуха, поскольку содержание в нем кислорода не превышает 21%. Если воздух заменить на чистый озон, то последнего для достижения того же результата потребуется очень мало, так как окислительные свойства озона значительно превышают тот же показатель кислорода. Вопрос количественного превышения интенсифицирующей способности озона по отношению к кислороду остается весьма спорным. Если считать, что способность к интенсификации горения зависит только от окислительно-восстановительного потенциала, то сравнению должны подлежать значения 0,8...1,2 В (для кислорода) и 2,17 В (для озона). Как видим, эти показатели между собой различаются более, чем в два раза. Однако на самом деле интенсифицирующая

способность озона гораздо выше. Объяснить такое явление можно следующим образом.

Известно, что скорость любого процесса, в основе которого лежит химическое взаимодействие веществ, зависит от химической подготовки молекул к вступлению в реакцию, а также от вероятности их случайного контакта и активности взаимодействия. Из кинетической теории газов мы знаем, что количество активных столкновений молекул определяется выражением

$$N = N_0 \exp^{-S_a/KT}, \quad (1)$$

где N_0 – общее количество молекул, способных к столкновению; S_a – энергия активации молекул; K – постоянная Больцмана; T – температура газовой смеси.

Из выражения (1) следует, что количество активных столкновений молекул повышается за счет снижения их энергии активации. И действительно: экспериментально установлено, что энергия активации окисления бутана в обычном состоянии равна 43 ккал/моль, а в присутствии 2,5% озона она снижается до 31 ккал/моль.

Однако последующее за этим увеличение количества активных столкновений приводит к увеличению температуры. Эта температура входит в знаменатель показателя степени того же выражения (1). Легко заметить, что с увеличением температуры интенсифицирующий эффект также возрастает. Происходит лавинообразная интенсификация горения. Кроме того, при взаимодействии с углеводородами озон образует реакционно способные (с повышенной окислительной активностью) озониды – промежуточные перекисные соединения, быстро разрушающиеся с выделением атомарного кислорода. Под влиянием атомарного кислорода горение еще более активизируется.

Таким образом, даже если считать, что интенсифицирующие свойства озона всего лишь в два раза сильнее кислорода, то для сжигания 2 м³ природного газа потребуются примерно 2,1 м³ озона. Принимая во внимание плотность озона (2,1 кг/м³), легко рассчитать, что его масса составит 4,41 кг. Для получения такого внушительного количества озона с помощью современных электроозонаторов потребовалась бы энергия 250 кВт·ч. Затраты на производство озона в таком случае оказались бы абсолютно неоправданными, поскольку было бы проще обогреть то же помещение с помощью электронагревателей. Однако на практике чистый озон не используется. Какими бы идеальными ни были условия подачи озона в топочную камеру, часть озона успеет разложиться на обычный и атомарный кислород, не достигнув зоны горения. Часть озона вступит в окислительные реакции с элементами конструкции топки, горелки и воздухопроводов. Часть озона успеет выйти в атмосферу через дымоход. Наконец, часть исходного воздуха, прошедшего через озонатор, по разным причинам может таковым и остаться. В этом случае следует говорить не об озонотом наддуве, а о наддуве озонно-воздушной смеси. При этом горение газа будет происходить при участии как озона,

так и двухатомного кислорода, входящего в состав воздуха. Если считать, что на каждые 50 молекул двухатомного кислорода в озono-воздушной смеси будет приходится одна молекула озона, то масса озона, требуемого для интенсификации горения 2 м³ природного газа, составит 0,088 кг. Поскольку в озono-воздушной смеси остается большое количество двухатомного кислорода, масса требуемого озона окажется примерно в 25 раз меньше, т.е. 0,0035 кг, или 3,5 г. Для рассматриваемого в нашем примере котла такое количество озона необходимо подавать каждый час.

На сегодняшний день известны несколько способов получения озона. Если не останавливаться на некоторых «экзотических» приемах, то в основном это способы, основанные на электролитических, фотохимических, либо электросинтетических явлениях [10].

Электролитический способ реализуется в специальных электролитических емкостях. В качестве электролитов используются растворы кислот и их соли: например, H₂SO₄, H₄SiO₄, NaClO₄, KClO₄. Получение озона происходит за счет электролитического разложения и образования атомарного кислорода, который, присоединяясь к молекуле кислорода, создает озон и молекулу водорода. Такой способ позволяет получать большое количество озона, но является довольно энергоемким и нетехнологичным. При осуществлении электролитического способа необходимо располагать запасом химического сырья, последовательно выполнять ряд технологических операций и предусматривать дополнительные меры по охране труда и защите окружающей среды. Кроме того, электролитический способ реализуется при пониженном давлении (на уровне 0,1 атм), что также усложняет и удорожает процесс.

Фотохимический способ получения озона заключается в облучении воздуха или очищенного кислорода коротковолновым (ультрафиолетовым) излучением. При этом молекула кислорода диссоциирует на два атома, а затем происходит образование озона посредством слияния атома и целой молекулы кислорода. Этот способ широко применяется для озонирования сточных вод с целью обеззараживания, однако его производительность остается низкой.

Электросинтетический способ сочетает в себе возможность получения высококонцентрированных озono-воздушных смесей с большой производительностью и относительно невысокими энергозатратами. Электросинтетический способ может быть реализован тремя формами разряда: барьерным, поверхностным и импульсным. На сегодняшний день наибольшее распространение получил барьерный разряд, представляющий собой совокупность импульсных микрозарядов в газовом промежутке между двумя электродами, которые разделены диэлектрическими барьерами.

Заполняющий этот промежуток диэлектрический слой ограничивает ток разряда, стабилизирует его и придает равномерный характер. При синтезе озона непосредственно в газовых водогрейных кот-

лах можно использовать генераторы с промежутком 0,1...4,0 мм, диэлектрическими слоями толщиной 0,2...3,0 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 5...50 ед. [11]. В качестве материалов для диэлектрических слоев можно порекомендовать различные типы стекол, керамики или пластмасс. Материалом для изготовления электродов могут послужить нержавеющая сталь, алюминий или сплавы титана. Питание озонатора осуществляется от источника с напряжением 1...30 кВ и частотой 0,05...20 кГц. Давление кислородосодержащего газа может составлять 0,02...0,20 МПа при максимальной скорости потока 200 м/с. При этом характер течения газа должен быть ламинарным.

Активную электрическую мощность, развиваемую электроозонатором, при заданных напряжениях на электродах, а также в зависимости от прочих параметров озонатора можно рассчитать по формуле Мэйниля [12]. Также известно, что производительность озонатора пропорциональна этой мощности. Пользуясь этими известными закономерностями, нетрудно подсчитать мощность, развиваемую озонатором, а затем – затрачиваемую энергию. Однако проще воспользоваться техническими характеристиками современных озонаторов и сопоставить их с результатами расчетов для нашего примера.

Серийный отечественный озонатор воздуха ОЗОН-60П синтезирует озono-воздушную смесь с концентрацией озона 300 мг/м³ с производительностью 5 г/ч, потребляя электрическую мощность 100 Вт. У озонатора ОЗ-5ПМ эти показатели соответствуют 7...8 г/м³, 5 г/ч и 85 Вт, у озонатора ОЗ-3 – 5 г/м³, 5 г/ч и 80 Вт. Как видим, все перечисленные озонаторы вполне подходят по производительности (в нашем примере требуемая производительность по озону составляла 3,5 г/ч) и по концентрации озono-воздушной смеси (экспериментально установлено, что устойчивый положительный эффект интенсификации горения достигается при концентрации 90...200 мг/м³). Электрическая мощность, потребляемая озонаторами с такими характеристиками, не превышает 100 Вт, что примерно соответствует мощности, потребляемой бытовым телевизором или компьютером. Очевидно, что эта мощность не превышает 1,5% тепловой мощности (от 7 до 30 кВт) рассматриваемых котлов. Принимая во внимание эффективность интенсификации горения, заключающейся в повышении производительности котлов на 15...20%, можно сделать вывод о целесообразности применения озono-воздушного наддува.

Библиографический список

1. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. Раздел «Подготовка и сжигание топлива»: Учебно-методическое пособие / Е.А. Блинов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. 119 с.
2. Казаков О.Г. Теория горения и взрыва: Учебник и практикум / О.Г. Казаков и др.; Под общ. ред. А.В. Татая, О.Г. Казакова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2014. 245 с.

3. Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А. Ресурсосберегающее автономное теплоснабжение объектов АПК // Международный научный журнал. № 5. 2011. С.83–91.
4. Патент 2535296. Российская Федерация, МПК F24D3/12 (2006/01). Устройство для отопления / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Е.А. Петрова, Н.И. Гурецкий; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГАУ. № 2012151928, заявл. 04.12.2012, опубл. 10.06.2014; приоритет изобретения 04.12.2012.
5. Нормов Д.А. Разработка и исследование электроозонатора для повышения эффективности использования природного газа в котельных АПК: Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук, Краснодар: КГАУ, 1997. 148 с.
6. Аппарат отопительный газовый с водяным контуром АОГВ-71: Паспорт по эксплуатации. ТУ 4858-009-00872266-07. Липецк: ОАО «Боринское», 2008. 24 с.
7. Стальной газовый котел «ЛЕМАКС»: Паспорт и руководство по эксплуатации. ТУ 4931-01-24181354-2011. Таганрог: ООО «ЛЕМАКС». 28 с.
8. Параллельный газовый котел отопительный (АОГВ) или с контуром горячего водоснабжения (АКГ В) ALPINE AIR: Руководство по монтажу и эксплуатации. ГОСТ 20214-74. М., 2012. 42 с.
9. Бакулин В.Н. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: Справочник / В.Н. Бакулин, Н.Ф. Дубровин, О.Н. Фаворский. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 616 с.
10. Драгин В.А. Электроозонатор для повышения эффективности сжигания печного топлива в малых котельных АПК: Дис. ...канд. техн. наук / В.А. Драгин. Краснодар: КГАУ, 2001. 178 с.
11. Силкин Е. Синтез озона в электрических разрядах и повышение его эффективности. Часть 1 / Е. Силкин // Компоненты и технологии. 2008. № 6. С. 136–143.
12. Андреев С.А., Петрова Е.А. Ресурсосберегающий способ повышения эффективности газовых котлов // Опыт и проблемы управления модернизацией инновационной деятельности в социально-экономических и технических системах: Монография. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. С. 111.

Андреев Сергей Андреевич – к.т.н., доцент кафедры «Автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 123557, Москва, Большой Тишинский переулок, д.2, кв.61; тел.: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Петрова Елена Алексеевна – аспирантка кафедры «Автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 140614, Московская обл., Зарайский район, д. Мендюкино, д. 8, кв. 8; тел.: 8-903-557-41-22, e-mail: petrovalena_88@mail.ru.

ESTIMATION OF ENERGY DEMANDS FOR OZONE TREATMENT OF FURNACE VOLUME OF A BOILER

S.A. ANDREEV, E.A. PETROVA

Russian State Agrarian University – MAA named after K.A. Timiryazev

The progressive way to improve the efficiency of the boilers could be the burning of gas in the ozone-air environment. It is known that ozone gas pressurization reduces costs by 15...20% and improves the chemical composition of the combustion products. Ozone is an unstable substance, and it is not possible to accumulated it in advance. So ozone supply should be made directly in boilers. Since ozone requires energy the amount of this energy must be estimated.

The article describes the chemical reaction of combustion of natural gas components in oxygen and determines the necessary amount of oxygen required for boilers with a heat output 7...30 kW. High oxidative properties of ozone, as well as some other properties required for combustion gas, 3,5 g of ozone per hour boiler. On the basis of the analysis of modern methods of ozone producing it was concluded that the using of barrier electrical discharge is feasible. This method is efficient and environmental friendly. To create ozone-air environment with the required ozone concentration an ozonator must have the capacity of about 100 watts. This capacity is approximately 0,33, 1,5% of thermal power boilers. This demonstrates the feasibility of an ozone-air pressurization in the combustion chamber.

Key words: ozone, intensification of combustion, combustion chamber, boiler, power consumption for ozone.

References

1. Blinov E.A. Fuel and combustion theory. «Prepaning and burning fuel»: training complex (manual) / E.A. Blinov. SPb.: Publishing house SZTU, 2007. 119 p.
2. Kazakov O.G. The theory of combustion and explosion: tutorial and workshop / O.G. Kazakov etc; Under the total. Ed. A.V. Tataya, O.G. Kazakov. 2nd ed., rev. and add. M.: Publishing Yurayt, 2014. 245 p.
3. Andreev S.A., Sudnik Yu.A., Petrova E.A. Conservation autonomous heating facilities AIC // The International scientific journal № 5. 2011. P. 83–91.
4. Patent № 2535296. Russian Federation, IPC F24D3 / 12 (2006/01). Device for heating / S.A. Andreev, Yu.A. Sudnik, E.A. Petrova, N.I. Guretsky; applicant and patentee MSAU, № 2012151928, started. 04.12.2012, publ. 10/06/2014; 04.12.2012 priority of the invention.
5. Normov D.A. Development and research of electric ozonizer to improve the utilization of natural gas in boilers AIC: Diss. competition academic degree Candidate of Science. Krasnodar: KGAU. 1997. 148 p.
6. The device heating the gas with a water circuit AOGV-71, passport manual, TU 4858-009-00872266-07, JSC «Borinskaya», Lipetsk, 2008 24 .
7. Steel gas boiler «Lemax»: Passport and manual. TU 4931-01-24181354-2011. Taganrog: LLC «Lemax». 28 p.
8. Parapet gas boiler heating (AOGV) or hot water circuit (ACS In) ALPINE AIR: Installation and operation. GOST 20214-74. M., 2012. 42 p.
9. Bakulin V.N. Gas and fuel components. Properties, receipt, use, ecology: A handbook / V.N. Bakulin, N.F. Dubrovin, O.N. Favorsky. M.: Publishing House MEI, 2009. 616 p.
10. Dragin V.A. Elektroozonator to improve the efficiency of burning heating oil in small boilers AIC: Diss. Competition academic degree Candidate of Science / V.A. Dragin. Krasnodar: KGAU, 2001. 178 p.
11. Silkin E. Synthesis of ozone in the electric discharges and increase its effectiveness. Part 1 / E. Silkin // Components and technologies. 2008. № 6. P. 136–143.
12. Andreev S.A., Petrova E.A. Resource-saving way to improve the efficiency of gas-fired boilers // Experience and problems of modernization of management innovation in the social, economic and technical systems: Monograph. Penza: RIO PGSKHA, 2012. P. 111.

Andreev Sergey Andreevich – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after I.F. Borodin Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Moscow, Timiryazevskaya str., 49; tel.: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Petrova Elena Alekseevna – PhD student of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after I.F. Borodin Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Moscow, Timiryazevskaya str., 49; tel.: 8-903-557-41-22, e-mail: petrova-lena_88@mail.ru.