

9. Simeiko K. Thermal influence of microdischarge plasma on the process of receiving of quartz sand encapsulated by pyrocarbon. *Proceedings of the National Aviation University*. 2014, No. 2, pp. 131–135.
12. Simeiko K.V. Ispolzovanie elektrotermicheskogo psevdoozhizhenogo sloya v kachestve vneshnego narevatelnogo elementa reaktora [Efficiency of electrothermal fluidized bed applying as the outer heating element of reactor]. *Energotehnologii i Resursozberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2015, No. 1. pp. 58–64. (Rus.)
13. Pat. 117157 Ukraine, B 01 J 8/18 (2006.01), B 01 J 8/42 (2006.01), B 01 J 19/14 (2006.01), C 01 B 33/021(2006.01), C 01 B 33/021 (2006.01), C 30 B 25/10(2006.01), C 30 B 28/14 (2006.01), C 30 B 31/12 (2006.01). Reaktor dlja visokotemperaturnih procesiv u psevdoozhizhenomu shari [The reactor for high temperature processes in fluidized bed] / K.V. Simeiko, B.I. Bondarenko, O.P. Kozhan, V.M. Dmitriev; Applicant and patent holder: Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. № a201506499; publ. date: 26.06.2017, Bull. No. 12. (Ukr.)
14. Mahorin K.E., Pikashov V.S., Kuchin G.P. Teplobmen v vysokotemperaturnom kipjashhem sloe. [Heat transfer in a high-temperature fluidized bed]. Kiev : Naukova Dumka, 1981. 148 p.
15. Davydov V.I., Gamrekeli M.N., Dobrygin P.G. Termicheskie processy i apparaty dlja poluchenija okislov redkih i radioaktivnyh metallov [Thermal processes and apparatus for the production of oxides of rare and radioactive metals]. Moscow : Atomizdat, 1977, 208 p.
16. Mahorin K.E., Tishhenko A.T. Vysokotemperaturnye ustanovki s kipjashhim sloem [High-temperature installations with fluidized bed]. Kiev. *Tehnika [Technique]*, 1966. 194 p.
17. Baskakov A.P., Berg B.V., Ryzhkov A.F., Filipovskij N.F. Processy teplo- i massoperenosa v kipjashhem sloe [Processes of heat and mass transfer in the fluidized bed]. Moscow: Metallurgija. 1978. 248 p.

Received July 26, 2018

УДК 681.536.6

Крыжановский К.С., канд. техн. наук

Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, Киев
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: krizhanovskiy2011@yandex.ua

Система автоматического регулирования горения в газосжигающих установках по корректирующему параметру

В условиях непрерывной эксплуатации тепловых агрегатов, когда изо дня в день и от лета к зиме сильно колеблется температура воздуха на горение, его влажность, теплота сгорания газа и атмосферное давление, при вводе в эксплуатацию этих агрегатов приходится задавать такие настройки, чтобы при возникновении неблагоприятных внешних условий всегда было достаточно кислорода для полного сгорания газа. Это может быть достигнуто за счет повышения эффективности работы системы автоматического регулирования соотношения компонентов горения и температурных параметров агрегата по оптимальному режиму для каждого конкретного технологического процесса. Для достижения поставленной цели использованы результаты исследований химических процессов взаимодействия продуктов горения с помощью средств измерения электрических параметров пламени, основанных на физических методах ионизационного контроля процесса горения. Установленные особенности и полученные результаты позволили осуществить разработку устройства контроля ионизационных свойств процесса горения, качественную их зависимость и разработку на их основе системы автоматического регулирования горелок для промышленных тепловых агрегатов. *Библ. 7, рис. 3.*

Ключевые слова: оптимальный режим обжига, система автоматического регулирования, качество сжигания газообразного топлива, газовые горелки.

Задачей автоматизации технологических процессов тепловых агрегатов, отапливаемых природным газом, является повышение безопасности эксплуатации и эффективности их работы. В современных условиях создание эффективных систем регулирования температуры и состава газовой атмосферы для поддержания заданных технологических параметров специальных технологий затруднительно в связи с большими объемами рабочего технологического пространства печей, наличием большого количества газовых горелок, большой инерционностью объектов, необходимостью решения задач регулирования состава газовой атмосферы, малой эффективностью существующих средств и методов регулирования, работающих на базе серийной аппаратуры.

В условиях непрерывной эксплуатации тепловых агрегатов, когда состояние окружающей среды изменяется изо дня в день и от лета к зиме, это становится проблемой. Особенно сильное влияние оказывают колебания температуры воздуха на горение, его влажность, теплота сгорания газа и атмосферное давление. Эти теплофизические изменения непосредственно влияют на факел горелки и состав продуктов горения, что требует при вводе в эксплуатацию теплового агрегата задавать такие настройки, чтобы при возникновении неблагоприятных внешних условий всегда было достаточно кислорода для полного сгорания газа. Эта настройка традиционно неизменна и базируется на технологических требованиях и предположении, что все неблагоприятные условия наступят одновременно. В большинстве случаев такая настройка не оправдывает себя. При этом на факел подается больше кислорода, чем нужно. Например, базовый режим содержания кислорода в продуктах горения (дымовых газах) котельных агрегатов ТЭЦ поддерживается на уровне 4 %.

Систему регулирования топливно-воздушной смеси осуществить достаточно просто. Система измерения и регулирования O_2 учитывает фактическое содержание кислорода в дымовых газах и обеспечивает оптимальное регулирование соотношения топливо : воздух во всем диапазоне изменения тепловой нагрузки котла. Дополнительный компонент традиционной системы регулирования по расходу состоит из кислородного датчика вместе с прибором для обработки измерений. При этом датчик, устанавливаемый в канале отходящих газов, постоянно анализирует остаточное содержание кислорода и передает этот сигнал в систему управления горелкой, которая при необходимости подрегулирует количество воздуха, подаваемое для сжигания топлива.

Таким образом, решение задачи повышения эффективности использования газообразного топлива и регулирования состава газовой атмосферы неразрывно связаны с постоянным решением вопроса оптимизации теплового режима. Это может быть достигнуто за счет повышения эффективности работы системы автоматического регулирования соотношения компонентов горения и температурных параметров агрегата по оптимальному режиму для каждого конкретного технологического процесса.

Для достижения поставленной цели использованы результаты исследований химических процессов взаимодействия продуктов горения с помощью средств измерения электрических параметров пламени, основанных на физических методах ионизационного контроля процесса горения, а также его электрических амплитудно-частотных характеристик, которые проводились в Институте газа АН Украины [1].

Установленные особенности и полученные результаты позволили осуществить разработку устройства контроля ионизационных свойств процесса горения, качественную их зависимость и разработку на их основе системы автоматического регулирования горелок для промышленных тепловых агрегатов [2].

Экспериментальные исследования ионизационных свойств газо-воздушного пламени показали наличие эффекта полупроводимости факела, величина и значение которого зависит от величины коэффициента аэрации (соотношения газ : воздух) α . При этом было установлено [3], что увеличение коэффициента аэрации приводит к изменению коэффициента выпрямления факела по экстремальной кривой: от минимума — в начале воспламенения газо-воздушной смеси, до максимума — при стехиометрическом соотношении, как это показано на рис.1.

Максимум значения коэффициента выпрямления достигается при оптимальном значе-

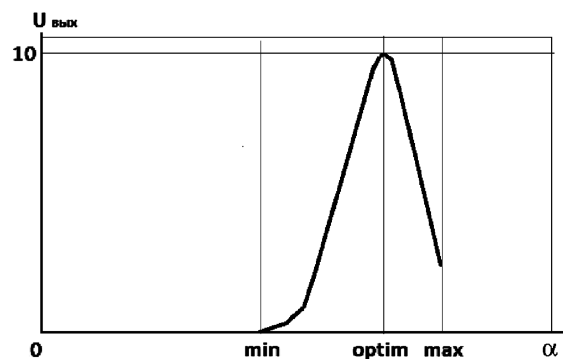


Рис.1.

нии процесса горения. При этом в продуктах сгорания отсутствуют химический недожог и излишки кислорода. Колебания флуктуаций полупроводимости факела в значительной степени зависят от пульсаций и размеров газо-воздушных корпускул (качества подготовки смеси), которые в некоторых случаях являются определяющими и зависят от характеристик газовой горелки. Выходной измеряемый сигнал зоны горения может быть представлен в виде зависимости

$$I_{\beta} = \sum_i^N A_i f_i, \quad (1)$$

где I_{β} — выходной параметр измерительного устройства; $\sum_i^N A_i$ — сумма амплитудных составляющих колебательного процесса; f_i — спектр частотных характеристик.

Исследования зависимости экстремума амплитудно-частотной характеристики проводимости зоны горения в системе координат $\alpha - I_{\beta}$ показали целесообразность и эффективность измерения сигнала факела в зоне его максимальной ионизации — корне факела.

Проведенные исследования позволили разработать способ контроля качества сжигания газообразного топлива не зависимо от его калорийности и химического состава. Для регулирования процесса горения в газосжигающих установках малой и средней производительности разработано устройство контроля, принцип действия которого основан на измерении и использовании экстремальной проводимости факела [4].

При приложении к измерительному электроду и корпусу горелки переменного электрического поля определенной несущей частоты на входе прибора вырабатывается амплитудно-модулированный сигнал пульсаций проводимости факела, закон преобразования входного многотонального сигнала которого выражается следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}} = [m K_{\text{устр}} / (m + 1)^2] \sum_i^n A_i f_i, \quad (2)$$

в котором m — коэффициент согласования устройства, равный отношению сопротивления входа устройства к сопротивлению зоны горения; $K_{\text{устр}}$ — коэффициент усиления измерительного устройства; A_i — амплитуда входного сигнала i -й частоты.

Выходной сигнал устройства представлен такой зависимостью:

$$U_{\text{вых}} = U_{\Gamma} K_{\text{устр}} \{K_1 \alpha^3 K_z (\alpha - 0,6) \times [2 - (\alpha - 0,6) K_z] / 2 \exp(10/W) \times \{R_{\text{зг}} + \sum R_{\text{зг}} f_1 / 4\}, \quad (3)$$

где U_{Γ} — амплитуда выходного сигнала генератора несущей частоты; $R_{\text{зг}}$ — сопротивление входной цепи измерителя; α — коэффициент аэрации.

К преимуществам разработанного способа следует отнести высокую точность контроля качества сжигания газа (до $\pm 0,01 \alpha$), осуществление простого и безынерционного способа измерения, высокую надежность, одновременный контроль наличия процесса горения для автоматики защиты горения, унифицированный выходной сигнал 0–10 В.

Для регулирования соотношения газ : воздух по экстремальной кривой процесса горения используем систему экстремального регулирования автоколебательного типа [7]. В данном случае мы рассматриваем условия, когда объект безынерционный, и динамика автоколебаний носит характер, представленный на блок-схеме рис.2. (ЭЛД — элемент логического действия).

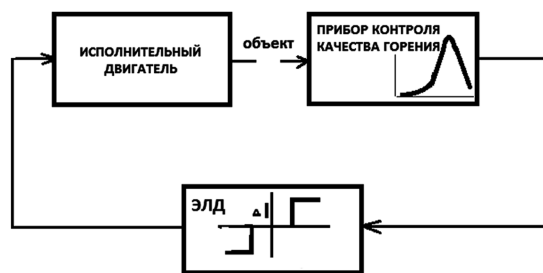


Рис.2.

Эти колебания осуществляются с периодом T , при этом потери на поиск могут быть представлены так:

$$P = \frac{T}{2} \int_0^i I dt, \quad (4)$$

где t_u — длительность переходного процесса; ΔI — зона поиска

Представим, что исполнительный двигатель обеспечивает обработку воздействий M с постоянной скоростью v :

$$M = v t. \quad (5)$$

При выполнении условия, что выходная характеристика прибора представляет собой па-

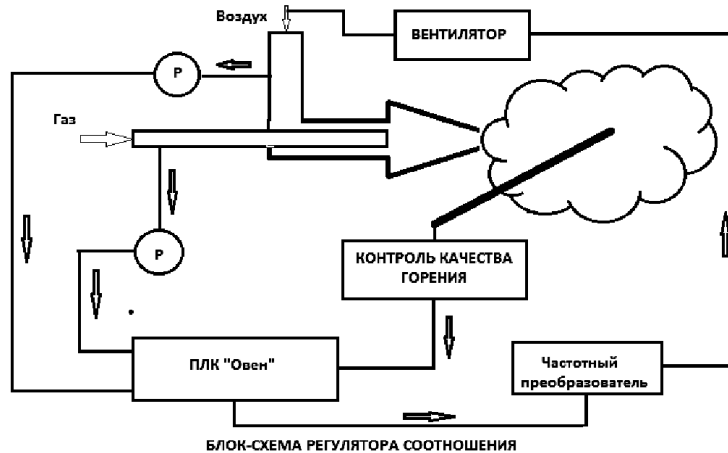


Рис.3.

работу с коэффициентом a , выходной сигнал управления прибора будет

$$\Delta I = a (v t)^2$$

или

$$\Delta I = (a V^2 T^2) / 4. \quad (6)$$

Если известна (задана) зона поиска ΔI , крутизна характеристики и период T , то можно определить скорость V исполнительного механизма:

$$V = (2/T) (\Delta I / a)^{1/2}. \quad (7)$$

При этом потери на поиск экстремума составят

$$P = \Delta I / 3. \quad (8)$$

Задача регулирования значительно упрощается, если в качестве исполнительного механизма использовать частотный преобразователь управления оборотами двигателя вентилятора, подающего воздух на горение. Блок-схема системы регулирования по оптимальному коэффициенту аэрации представлена на рис.3.

Главными элементами системы регулирования являются такие приборы: прибор контроля качества горения с установленным в зоне горения контрольным электродом; контроллер, осуществляющий роль логического устройства и преобразователя входных сигналов; прибор контроля качества горения; датчики давления воздуха и газа на горение; система управления расходом воздуха на горелку через частотный преобразователь оборотов двигателя дутьевого вентилятора подачи воздуха на горение.

Регулирование тепловой нагрузки агрегата по температуре осуществляется контуром управ-

ления подачи газа на горение через газовый клапан. Для обеспечения повышенного режима безопасности сжигания топлива в замкнутых топочных пространствах контроль процесса горения осуществляется дополнительно с помощью датчиков давления газа, воздуха и пламени. Оптимальный режим сжигания достигается за счет поддержания максимального (оптимального) значения выходного параметра прибора контроля качества.

Оптимальное положение контрольного электрода в факеле горелки выбирается в процессе пуско-наладки для типового режима рабочей тепловой нагрузки. Сферой применения данных систем регулирования являются тепловые агрегаты, оснащенные газовыми горелками мощностью от 0,5 Гкал/ч и более. Они имеют высокую эффективность в случае применения в тепловых агрегатах, сжигающих различные смешанные виды топлива с неконтролируемой калорийностью [5].

Выводы

В результате использования инновационных методов повышения эффективности процесса сжигания газообразного топлива с помощью автоматического регулирования тепловой нагрузки и состава газовой атмосферы, предложено практическое решение вопроса оптимизации теплового режима на базе новых методов и технических средств.

Для достижения поставленной цели использованы результаты исследований химических процессов взаимодействия продуктов горения с помощью электронных средств измерения электрических параметров пламени, основанных на физических методах ионизационного контроля процесса горения. Полученные результаты позволили осуществить разработку устройств контроля и регулирования режима работы газовых горелок промышленных тепловых агрегатов, обеспечить высокую эффективность их работы. Особое значение это приобретает в тепловых агрегатах, сжигающих смешанные виды топлив неконтролируемой калорийности.

Предложенный способ поиска оптимального режима горения имеет существенные преимущества перед существующими способами обеспечения оптимального соотношения. А именно, инерционность предложенной САР на несколько порядков ниже существующих систем, за

счет непосредственного контактного контроля электрических характеристик пламени. В существующих способах реализации САР с коррективкой по показанию газоанализатора, точка отбора пробы датчика выносятся на выход топочного устройства, за счет чего получают интегральную составляющую показателя качества сжигания топлива в горелочных устройствах, и при этом, увеличивается инерционность и транспортное запаздывание системы. Также следует отметить, что стоимость газоанализатора и средств системы автоматизации традиционного типа намного выше, в сравнении с широко используемыми электродами контроля пламени. При этом, показатель электронной оценки процесса горения не зависит от физико-химических свойств сжигаемых компонентов и значительно повышается качество регулирования.

Список литературы

1. Крыжановский К.С. Экспериментальные исследования некоторых электрических характеристик турбулентного пламени при сжигании метана.

Использование природного газа в промышленности. 1976. Вып. 3. С. 32–39.

2. Крыжановский К.С. Устройство контроля процесса горения газосжигающих установок малой производительности. *Использование природного газа в промышленности*. 1976. Вып. 3. С. 110–115.
3. А.с. 463838, МКИ F 23 n 1/02. Способ контроля качества горения топлив / К.С.Крыжановский. — Оpubл. 15.03.75, Бюлл. № 10.
4. А.с. 551478, МКИ² F 23 N 5/12. Устройство контроля качества горения / К.С.Крыжановский. — Оpubл. 25.03.77, Бюлл. № 11.
5. Крыжановский К.С. К вопросу реализации систем автоматического управления горением в газовых радиационных трубах малой и средней производительности. *Расчет, конструирование и применение радиационных труб в промышленности*. Киев : Ин-т газа АН УССР, 1976. С. 136–139.
6. Алексеев В.М., Галеев Е.М., Тихомиров В.М. Сборник задач по оптимизации. Теория. Примеры. Задачи. Учеб. пособие. Москва : Физматлит, 2005. 256 с.
7. Афанасьев В.Н. Оптимальные системы управления. Аналитическое конструирование. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2011. 168 с.

Поступила в редакцию 20.07.18

Крижановський К.С., канд. техн. наук
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ
 просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: krizhanowskiy2011@yandex.ua

Система автоматичного регулювання горіння у газоспалювальних установках по коригуючому параметру

В умовах безперервної експлуатації теплових агрегатів, коли день у день та від літа до зими сильно коливаються температура повітря на горіння, його вологість, теплота згоряння газу та атмосферний тиск, при введенні в експлуатацію цих агрегатів доводиться задавати такі настройки, щоб при виникненні несприятливих зовнішніх умов завжди було досить кисню для повного згоряння газу. Це може бути досягнуто підвищенням ефективності роботи системи автоматичного регулювання співвідношення компонентів горіння та температурних параметрів агрегату по оптимальному режиму для кожного конкретного технологічного процесу. Для досягнення поставленої мети використані результати досліджень хімічних процесів взаємодії продуктів горіння за допомогою засобів виміру електричних параметрів полум'я, ґрунтованих на фізичних методах іонізаційного контролю процесу горіння. Встановлені особливості та отримані результати дали можливість здійснити розробку пристроїв контролю іонізаційних властивостей процесу горіння, якісні їх залежність та розробку на їх основі системи автоматичного регулювання пальників для промислових теплових агрегатів. *Бібл. 7, рис. 3.*

Ключові слова: оптимальний режим випалення, система автоматичного регулювання, якість спалювання газоподібного палива, газові пальники.

Kryzhanovskiy K.S., Candidate of Technical Sciences
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev
37, Peremohy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: krizhanovskiy2011@yandex.ua

The System of Automatic Combustion Control in Gas-Burning Plants by Corrective Parameter

The wide application of gaseous fuels in technology and energy, its high cost, pose the task of improving the quality of its use. The task of automation of technological processes of thermal units heated by natural gas is to increase the safety of operation and the efficiency of their operation. This problem is especially acute in conditions of continuous operation of thermal units, when the state of the environment varies from day to day and from summer to winter. The temperature of the air for combustion, its humidity, the heat of combustion of the gas and the atmospheric pressure fluctuate particularly sharply. In these conditions, when putting into operation the heat unit, it is necessary to set such tinctures that, in the event of unfavorable external conditions, there always was enough oxygen to completely burn the gas. This can be achieved by increasing the efficiency of the automatic control system of the ratio of the combustion components and the temperature parameters of the unit, according to the optimal regime for each particular technological process. To achieve this goal, we used the results of research into the chemical processes of interaction of combustion products using means for measuring the electrical parameters of a flame based on physical methods of ionization control of the combustion process. The established features and obtained results made it possible to develop a device for monitoring the ionization properties of the combustion process, on their basis, automatic control systems of burners for industrial heat x aggregates. *Bibl. 7, Fig. 3.*

Key words: Optimum firing mode, automatic control system, quality of burning of gaseous fuel, gas burners.

References

1. Kryzhanovsky K.S. [Experimental studies of some electrical characteristics of a turbulent flame during the combustion of methane]. [*The use of natural gas in industry*]. 1976. Iss. 3. pp. 32–39.
2. Kryzhanovsky K.S. [The device of the control of process of burning of gas-burning installations of small productivity]. [*The use of natural gas in industry*]. 1976. Iss. 3. pp. 110–115.
3. A.c. 463838, MCI F 23 n 1/02. Kryzhanovskiy K.S. [A way to control the quality of combustion of fuels]. Publ. 15 March 1975, Bull. 10.
4. A.c. 551478, MCI² F 23 N 5/12. Kryzhanovskiy K.S. [Combustion quality control device]. Publ. 25 March 1977, Bull. 11.
5. Kryzhanovskiy K.S. [On the issue of the implementation of automatic combustion control systems in gas radiation tubes of small and medium capacity]. [*Calculation, design and application of radiation pipes in industry*]. Kiev : The Gas Institute AN USSR, 1976. pp. 136–139.
6. Alekseev V.M., Galeev E.M., Tikhomirov V.M. [Collection of problems on optimization. Theory. Examples. Tasks]. Moscow : Fizmatlit, 2005. 256 p.
7. Afanasyev V.N. [Optimal control systems. Analytical design]. Moscow : Izdatelstvo Moscovskogo Universiteta, 2011. 168 p.

Received July 20, 2018