

УДК 004:53.083.91

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Берг И.А., Худяков П.Ю., Ощепкова В.Ю.

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: berg77777@gmail.com*

Системы сжигания топлива, использующие пульсационный метод горения, реализуют ступенчатое сжигание в рамках каждого горелочного устройства, что позволяет значительно уменьшить образование оксидов азота. Для оценки целесообразности применения пульсационного сжигания был разработан автоматизированный измерительный комплекс, состоящий из экспериментальной установки и системы автоматизации. Экспериментальная установка состоит из вертикальной стальной трубы, закреплённой в нижней части эжекционной горелки, работающей в пульсационном режиме, с помощью установленного на линии подвода газового топлива электромагнитного клапана, и свободным выходом продуктов сгорания сверху. Система автоматического измерения и сбора данных реализована в программной среде LabVIEW. В статье представлены первичные результаты экспериментов, полученные при проведении исследований на автоматизированном измерительном комплексе, свидетельствующие о целесообразности использования пульсационного режима горения.

Ключевые слова: автоматизация, измерительная система, пульсационное горение, газовый анализ, импульсный клапан, подавление оксидов азота, химический недожог

AUTOMATION OF ANALYTIC COMPLEX FOR THE INVESTIGATION OF PULSATING COMBUSTION

Berg I.A., Khudyakov P.Yu., Oshepkova V.Yu.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg,
e-mail: berg77777@gmail.com*

The fuel combustion systems that use method of pulsating combustion, implement the staged combustion in each burner, which significantly reduces the formation of nitrogen oxides. Purpose of this work is the development of measurement system and automation system for experimental verification of the possibility of reducing of nitrogen oxides, by stage combustion method in the each burner, based on the pulsating burner mode. Developed system of pulsating combustion investigation consist of the experimental facility and automation system. The experimental facility consists of a vertical steel pipe, ejection burner, fastened on the bottom of the pipe and operating in pulsating mode, by using the gas fuel supply solenoid valve, and the free exit of exhaust gases from the top. Automatic measurement and data acquisition system accomplished in LabVIEW system-design platform and make possible to avoid manual operations. The article presents the initial results of experiments, obtained by automated measuring complex, which shows the feasibility of using pulsating combustion mode. For current facility burner positive effect of the reducing of nitrogen oxides is achieved at a frequency 4–6 Hz.

Keywords: automation, measurement system, pulsating combustion, gas analysis, pulse valve, reducing of nitrogen oxides, incomplete combustion

На сегодняшний день существуют и применяются различные технологии для глубокого подавления оксидов азота – ступенчатое сжигание, восстановление оксидов азота в топке, снижение общего избытка воздуха в топке, принудительная рециркуляция дымовых газов в факел, ввод влаги в топку и др. [4]. Следует отметить, что применение большинства из этих технологий напрямую связано с возможным ухудшением качества сжигания и появлением недожога, поэтому при разработке новых конструкций горелочных устройств конструкторы и исследователи должны решать и задачи полноты сгорания топлива.

Одним из вариантов ступенчатого сжигания является перераспределение воздуха (топлива) по ярусам горелок с использова-

нием экспериментального характера зависимости выхода оксидов азота от избытка воздуха [5]. Отклонение избытка воздуха в различных группах горелок по обе стороны от экстремального значения, соответствующего максимальному выходу оксидов азота, приводит к уменьшению выбросов NO_x в каждой группе горелок и в целом по котлу. Обычно этот способ реализуется перераспределением вторичного воздуха по ярусам в котлах с многоярусным расположением горелок.

При пульсационном способе сжигания реализуется ступенчатое сжигание газового топлива в каждой горелке. При полностью открытом регулирующем органе на линии подачи газа в горелку в топку подаётся переобогащённая смесь, с коэффициентом

избытка воздуха ниже единицы и, соответственно, экстремального значения по образованию оксидов азота. Эта фаза работы горелочного устройства аналогична работе горелок нижнего яруса, при обычной схеме организации ступенчатого сжигания [3], в которые также подаётся топливо с коэффициентом избытка воздуха значительно ниже единицы.

В момент кратковременного прекращения подачи топлива в горелку, при сохранении постоянного расхода окислителя, в топку поступает обеднённая смесь, образованная окислителем и небольшим объёмом газа, оставшимся в топливоподводящем канале сразу после закрытия регулирующего органа. При последующем открытии регулирующего органа в топку снова подаётся переобогащённый объём топливоздушный смеси, который прогревается и воспламеняется от топочных газов.

При постоянной пульсации расхода газообразного топлива от минимального до максимального горелочное устройство формирует «полосатый факел», состоящий из последовательно чередующихся зон с коэффициентами избытка воздуха выше и ниже экстремального по образованию оксидов азота. Далее по ходу газозадушного тракта эти зоны перемешиваются вследствие процессов продольного тепломассопереноса в факеле. Таким образом происходит перемешивание и доокисление продуктов сгорания. В результате после перемешивания продукты сгорания имеют стехиометрический коэффициент избытка воздуха (или заданный оптимальный, для конкретной котельной установки). Частоту колебаний расхода газа следует выбирать исходя из условий наиболее эффективного снижения образования оксидов азота и недопущения обрыва факела, вследствие задания слишком низкой частоты.

Таким образом, целью данной работы является разработка измерительного комплекса и системы автоматики для экспериментальной проверки возможности подавления оксидов азота путём реализации ступенчатого сжигания топлива в одной горелке, основанного на пульсационном режиме работы горелки.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка выполнена из вертикальной стальной трубы с внутренним диаметром 30 мм, толщиной стенки 1 мм (рис. 1). Отрезок трубы высотой 700 мм закреплён вертикально, в нижней части установлена эжекционная горелка, в верхней части – свободный выход. Эжекционная горелка имеет осевой подвод газа,

подвод же воздуха в данной конструкции осуществлялся через отверстия внизу самой горелки и через кольцевой зазор между горелкой и трубой.

В районе устья горелки выполнено технологическое отверстие с резьбой для ввода запальника, которое запыралось болтом во время проведения замеров для исключения лишнего подсоса воздуха. Таким образом, данная конструкция обладала естественной тягой, за счёт высокой температуры металлической трубы – естественной конвекцией, и за счёт эжекции воздуха в результате работы горелки. Нижняя часть установки помещалась в специальную ёмкость, чтобы исключить колебания расхода воздуха, связанные с естественной циркуляцией воздуха в помещении, в котором проводились эксперименты.

На расстоянии 550 мм от устья горелки выполнено отверстие для ввода зонда газоанализатора. При введении зонда в установку, он запирал отверстие собственным уплотняющим конусом, что способствовало устранению попадания воздуха снаружи установки. Забор пробы газа производился на уровне центральной оси установки. Место для пробоотбора было выбрано таким образом, чтобы исключить конденсацию паров и, следовательно, резкое изменение концентраций газов в продуктах сгорания, с одной стороны, и из условия безопасной и надёжной работы газоанализатора, с другой, чтобы температура отбираемых газов не превышала 500 °С.

Для регистрации давления и его колебаний при пульсационном горении были выполнены точки замера давления – в районе устья горелки и на расстоянии 200 мм от этой точки, после видимого факела. Импульсные линии были изготовлены из стальных трубок, с последующим сочленением с силиконовой трубкой, которая присоединялась к заводскому штуцеру на датчике. Импульсные линии были изготовлены таким образом, чтобы среда успела охладиться и не повредить датчики, в соответствии с требованиями по защите манометров. Нижняя петля помещалась в ёмкость с водой, для более интенсивного охлаждения.

В качестве газоанализатора использовался прибор – анализатор дымовых газов с сенсорами Longlife, модели Testo 330-2, который позволял измерять концентрации CO , NO_x , CO_2 , O_2 в дымовых газах, а также температуру газов в зоне пробоотбора и коэффициент избытка воздуха. Прибор самостоятельно пересчитывал концентрации в мг/м^3 при приведённом коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,4$, однако при обработке данных имели место реальные концентрации, измеряемые в ppm. В качестве газа

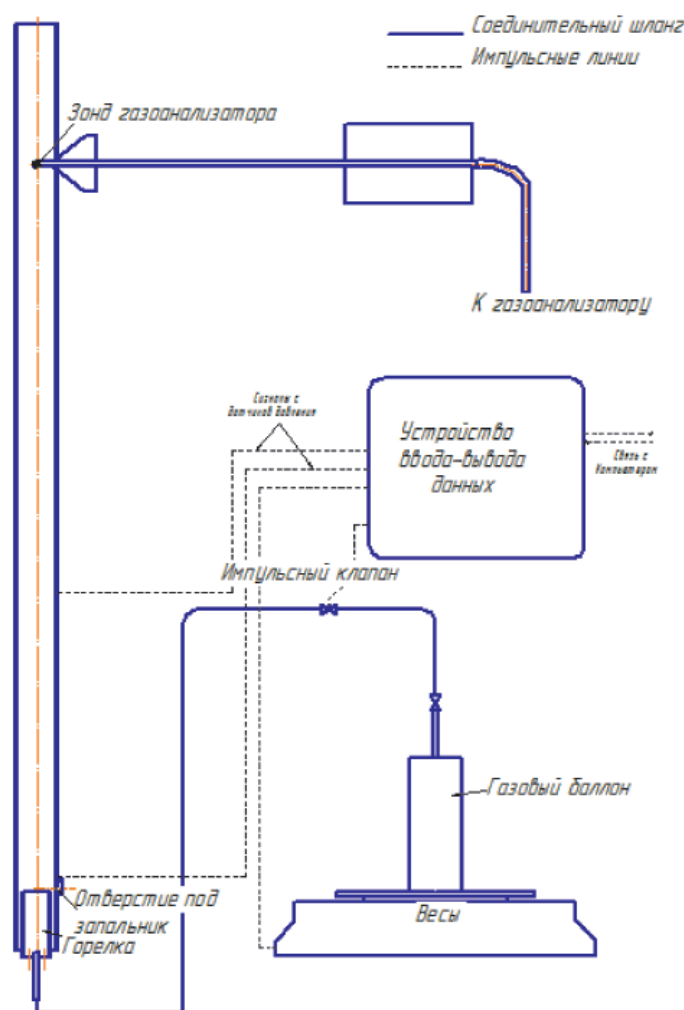


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

использовалась пропан-бутановая смесь в баллонах по 220 г. На баллон устанавливался клапан от горелки, которым задавалось давление и, соответственно, расход газа. Следующим по ходу газа устанавливался электромагнитный клапан, работающий в импульсном режиме с заданной частотой, или в ручном режиме (с указанием положения клапана). После импульсного клапана, изменяющего расход, газ подавался на горелку.

Таким образом, экспериментальная установка для исследования пульсационного горения включает в себя 2 регулирующих органа, 2 датчика давления, весы и газоанализатор. Для проведения экспериментов импульсный клапан должен работать в автоматическом режиме с заданной частотой, а сигналы со всех датчиков должны сохраняться синхронизированно, для получения полной картины об исследуемом процессе и возможности более детальной последующей обработки и анализа данных.

Система автоматизированного измерения комплекса

Для экспериментальной установки, описание которой приведено выше, была спроектирована и реализована система автоматического измерения. Она предполагает централизованную систему управления клапаном и сбора данных. В качестве устройства ввода данных была использована плата ввода-вывода PCI 6014 производства National Instruments, со своей клеммной коробкой и соединяющим их экранированным кабелем. Программа автоматики была реализована в среде NI LabVIEW (рис. 2).

В данной системе входными сигналами являлись: динамически изменяющийся сигнал с лабораторных весов, с трех датчиков давления и термопары. На линии сигнала с весов установлено дифференцирующее звено, которое позволяет вычислить расход газа. Применялись лабораторные весы марки KERN, связь с компьютером осуществлялась по COM-порту (RS-232). Для

приёма сигнала с COM-порта в программе NI Labview использовались специальные модули VISA.

Использовались датчики давления – MPX-510-GP, на тензосопротивлении. Три датчика располагались на собственной плате, на которую подавалось питание, сигнал с датчиков заводился в программу через клеммную коробку, в качестве изменяющегося напряжения на чувствительном элементе. Каждый датчик прошёл процедуру тарировки в соответствии с инструкцией.

Важно отметить что регулирующий орган, накладывающий пульсации по расходу газообразного топлива, управлялся периодическим сигналом прямоугольной формы (меандр), в отличие от ранее использовавшихся турбулизаторов [1] для изучения вибрационного горения, регулирующий орган которых управлялся синусоидальным сигналом. Полное прекращение подачи топлива необходимо для того, чтобы обеспечить максимальную разницу коэффициентов избытка воздуха в двух фазах работы горелочного устройства. Генерируемый в системе автоматического управления установкой сигнал подавался на электромагнитный клапан, который

накладывал пульсации по расходу газообразного топлива с заданной частотой.

Помимо управления режимом горения автоматизированная система включает в себя возможность синхронной записи значений массы газового баллона, расхода газа на горелку, давления с каждого датчика и концентраций в зоне пробоотборной точки CO, NO_x, O₂, CO₂ и температуры газов. Использование этой системы позволило выполнять серии экспериментов в автоматическом режиме, исключая необходимость выполнения ручных операций, кроме розжига горелки в первый раз, что значительно повысило точность экспериментов и скорость их проведения. Все записанные во время проведения экспериментов значения с датчиков сводились в единую базу данных для последующей обработки.

Первичные результаты экспериментов

С использованием разработанного автоматизированного измерительного комплекса были проведены эксперименты для выявления эффективности подавления оксидов азота в зависимости от частоты пульсаций расхода газового топлива, результаты аппроксимации которых приведены ниже, для двух различных режимов.

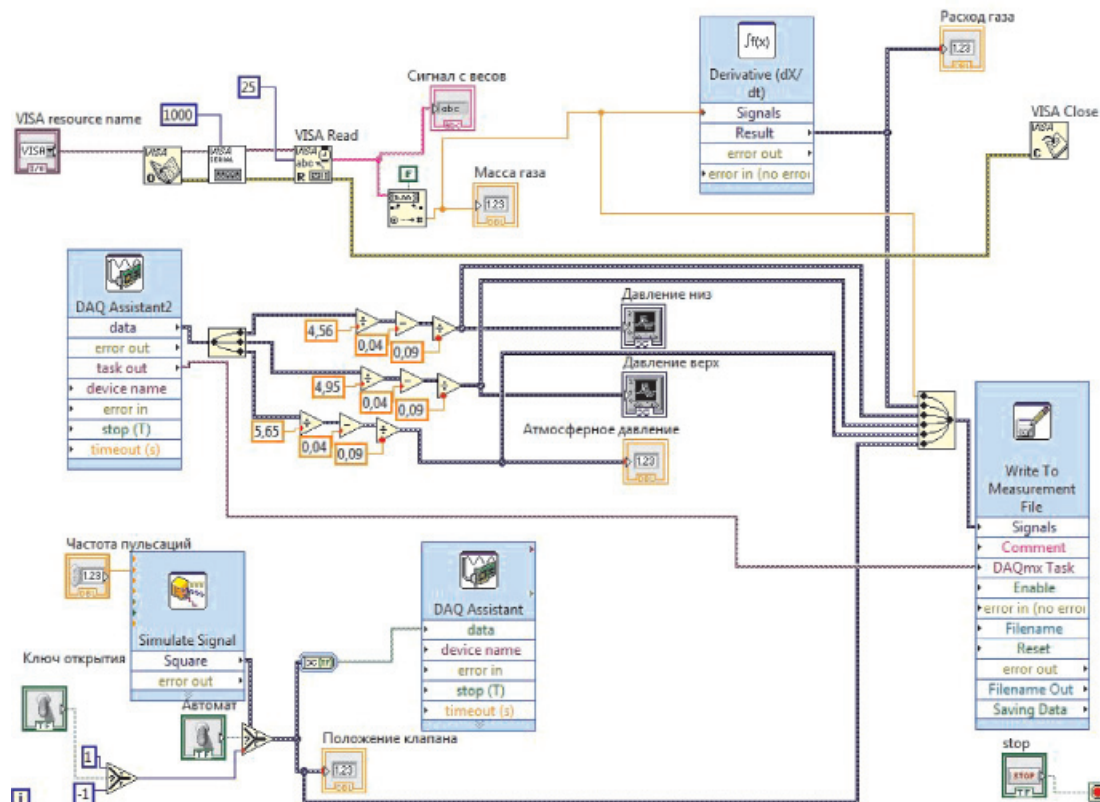


Рис. 2. Блок-схема системы автоматического измерения экспериментальной установки пульсационного горения, выполнена в программной среде LabView.

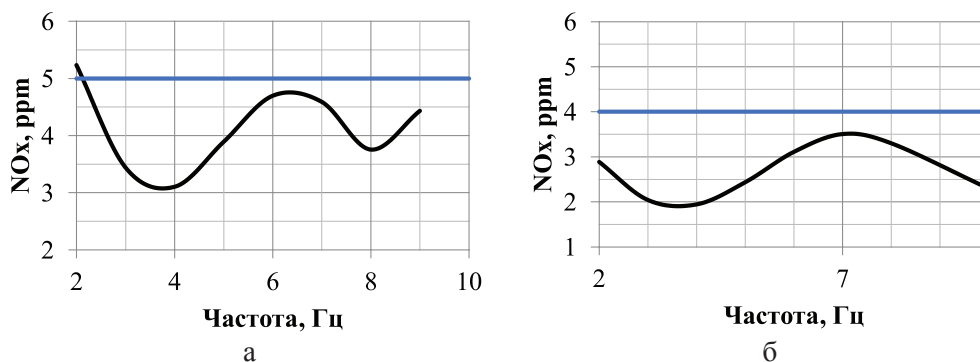


Рис. 3. Зависимость концентрации оксидов азота от частоты колебаний клапана в зоне пробоотборной точки:
 а – среднее значение коэффициента избытка воздуха $\alpha = 2,6$; б – среднее значение $\alpha = 3,2$.
 Горизонтальная линия показывает концентрацию оксидов азота при отсутствии колебаний расхода топлива

Результаты измерений показывают, что пульсации расхода газа действительно подавляют выход оксидов азота (рис. 3), то есть имеется положительный результат, можно выделить характерные экстремумы (которые сохраняются и при других избытках воздуха). В данной конфигурации экспериментальной установки наиболее эффективной частотой с точки зрения снижения образования оксидов азота оказался диапазон частот 4–6 Гц. Отметим, что вероятнее всего, каждой горелке будет соответствовать своя характерная частота, при которой подавление оксидов азота происходит наиболее эффективно, причём её значение может быть и не постоянной величиной, а являться функцией от нагрузки или другого параметра.

Также следует отметить, что при наложении пульсаций по расходу газа практически на любых частотах наблюдается появление химического недожога, причём характер зависимостей различается для различных режимов работы. Это объясняется тем, что при вышеописанном пульсационном режиме горения формируется «полосатый» факел, состоящий из взаимодействующих друг с другом турбулентных структур, имеющих разный химический состав и температуру. Вследствие того, что при движении внутри экспериментальной установки продукты сгорания полностью не успевают перемешиваться, то есть процесс окисления не успевает пройти полностью, регистрируется наличие СО в уходящих газах.

Заключение

В представленной статье приведено описание экспериментальной установки и системы автоматизации измерительного комплекса для изучения пульсационного горения. Первичные результаты проведённых экспериментов показывают, что применение пульсационного горения действительно приводит к снижению выхода оксидов азота. Возможности разработанного автоматизи-

рованного комплекса позволяют подробно изучать различные режимы работы пульсирующего факела, создаваемого различными горелками и насадками, в зависимости от конфигурации экспериментальной установки. Также разработанная система позволяет выполнить комплексный анализ поля температур пульсирующего факела с последующей математической обработкой [2], что позволит получить данные о внутренней структуре «полосатого» факела.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00479 мол а.

Список литературы

1. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. – Л.: Энергия, 1978. – 216 с.
2. Дорж Д.Ж., Худяков П.Ю., Берг И.А., Жилкин Б.П. Особенности термомеханического взаимодействия встречных газовых струй // современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=12978> (дата обращения: 10.05.2016).
3. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции; под ред. В.Я. Гиршфельда. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
4. Шульман В.Л. Методические основы природоохранной деятельности ТЭС. – Екатеринбург: Изд-во Уральского Университета, 2000. – 447 с.
5. Шульман В.Л. Применение в отрасли технологических методов снижения выбросов окислов азота: методические рекомендации. – Свердловск: Уралтехэнерго, 1989. – 43 с.

References

1. Vulis L.A., Yarin L.P. Aerodynamics of the torch. [Aerodynamics of the torch]. Leningrad, Energiya, 1978. 216 p.
2. Dorzh D. Zh., Khudyakov P.Yu., Berg I.A., Zhilkin B.P. Special features of thermal-mechanical interaction between gas counterjets – Modern problems of science and education. 2014, no. 2. available at: <http://www.science-education.ru/en/article/view?id=12978>.
3. Rizhkin V.Y. Teplovye ehlektricheskie stancii [Heat power plants]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 328 p.
4. Shulman V.L. Metodicheskie osnovy prirodoohrannoy deyatel'nosti TES [Methodical bases of environmental activities HPP]. Ekaterinburg: izdatel'stvo Uralskogo Universiteta, 2000. 447 p.
5. Shulman V.L. Primenenie v otrasli tekhnologicheskikh metodov snizheniya vybrosov okislov azota. Metodicheskie rekomendacii [Application of the industry's technological methods of reducing of nitrogen oxides emissions. Guidelines]. Sverdlovsk: Uraltechenergo, 1989. 43 p.