

УДК 697.326-5/325:543.272.61/32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ СО И NO_x ПРИ НАЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ НАПРЯЖЁННОСТИ НА ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ

Кочева М.А., Суворов Д.В.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,
Нижегород, e-mail: teplo@gde.ru

Настоящая статья посвящена исследованию влияния внешнего электрического поля, введённого в зону факела, на содержание вредных выбросов СО и NO_x в дымовых газах. Проведены практические эксперименты на лабораторной установке, собранной на базе горелки Бунзена и генератора постоянного электрического тока отрицательного напряжения. В качестве топлива использовался природный газ с диффузионным смешением в горелке. Электрическое поле генерировалось при помощи кольцевого электрода из нержавеющей проволоки, расположенного выше факела пламени. Горелка в опытах была заземлена, дымовые газы охлаждались при помощи химического холодильника до температуры сравнимой с температурой уходящих газов в котельной установке. По показаниям газоанализатора построены графики зависимости снижения СО и NO_x от приложенного напряжения на электроде. Под воздействием электрического поля 6 кВ содержание оксидов углерода снижается до порога обнаружения. Механизм изменения содержания NO_x более сложный, график имеет пик снижения на -5 кВ, после чего последовал подъём к исходным значениям. Неожиданным образом зафиксирован рост коэффициента избытка воздуха, пропорционально повышению напряжения, что отображает потенциал для снижения избытка воздуха в котельных установках ниже 1 для полноценного сгорания топлива.

Ключевые слова: воздействие электрического поля на факел пламени, снижение вредных выбросов СО и NO_x в котельной, газовый анализ, коэффициент избытка воздуха

EXPERIMENTAL INVESTIGATION TO REDUCE EMISSIONS OF CO AND NO_x WHEN APPLYING AN ELECTRIC FIELD OF NEGATIVE VOLTAGE TO FLAME

Kocheva M.A., Suvorov D.V.

Nizhny Novgorod State Architectural and Construction University, Nizhny Novgorod, e-mail: teplo@gde.ru

This article is devoted to the study of the influence of an external electric field imposed in the area of torch for harmful emissions of CO and NO_x in the flue gas. Conducted practical experiments on the laboratory setup assembled on the basis of a Bunsen burner and the electric current generator up to 6 kV DC negative voltage. The fuel used is natural gas with diffusive mixing in the burner. The electric field was generated using ring electrode of stainless steel wire located above the flame. The burner in the experiments was the protection function is Lena, the flue gases are cooled by means of chemical refrigerator to a temperature comparable to the temperature of the flue gas in the boiler plant. The analyzer plots of the reduction of CO and NO_x from applied voltage on the electrode. Under the influence of an electric field of 6 kV, the content of carbon oxides is reduced to the detection threshold. The mechanism of changes in the content of NO_x is more complex, the graph has peak reduction by -5 kV, followed by a rise to their original values. Unexpectedly recorded an increase of the excess air ratio in proportion to the increase in voltage that otobrazit the potential to reduce excess air in boiler plants below 1 for complete combustion.

Keywords: influence of an electric field on the flame, reducing emissions of CO and NO_x in the boiler room, the gas analysis, the excess air ratio

Современная экологическая обстановка в мире ухудшается с каждым днём. Человечество не в силах отказаться от использования топливных ресурсов в пользу альтернативных и безвредных для окружающей среды источников энергии. Многие регионы Российской Федерации 2/3 времени в году нуждаются в теплоте вырабатываемой на котельных. Повышение экологической безопасности уже существующих источников теплоты является актуальной задачей. Так же на этот фактор влияют темпы роста развития человечества – с каждым годом число отапливаемых помещений, жилых домов, торговых центров только увеличивается. Пропорционально увеличивается число котельных для обеспечения теплотой этих зданий и сооружений.

Поднять эффективность сжигания топлива и снижение вредных выбросов ко-

тельной проще всего на этапе проектирования – когда проект ещё только утверждается и можно использовать все самые передовые методы оптимизации работы котельной с точки зрения снижения вредных выбросов, включая оптимальные горелки [1, 2]. Но остаётся открытым вопрос с уже существующими котельными в различных частях Российской Федерации. По данным ОАО «Газпром промгаз» в Нижнем Новгороде находится 445 котельных общей мощностью 6152,6 Гкал/ч [3]. Снижение вредных выбросов на стадии эксплуатации возможно при помощи строгого соблюдения режимных карт, а также их корректировки с определённой периодичностью работы котлов. При этом достигнутые в соответствии с режимной картой показатели невозможно снизить без существенной реконструкции котельной.

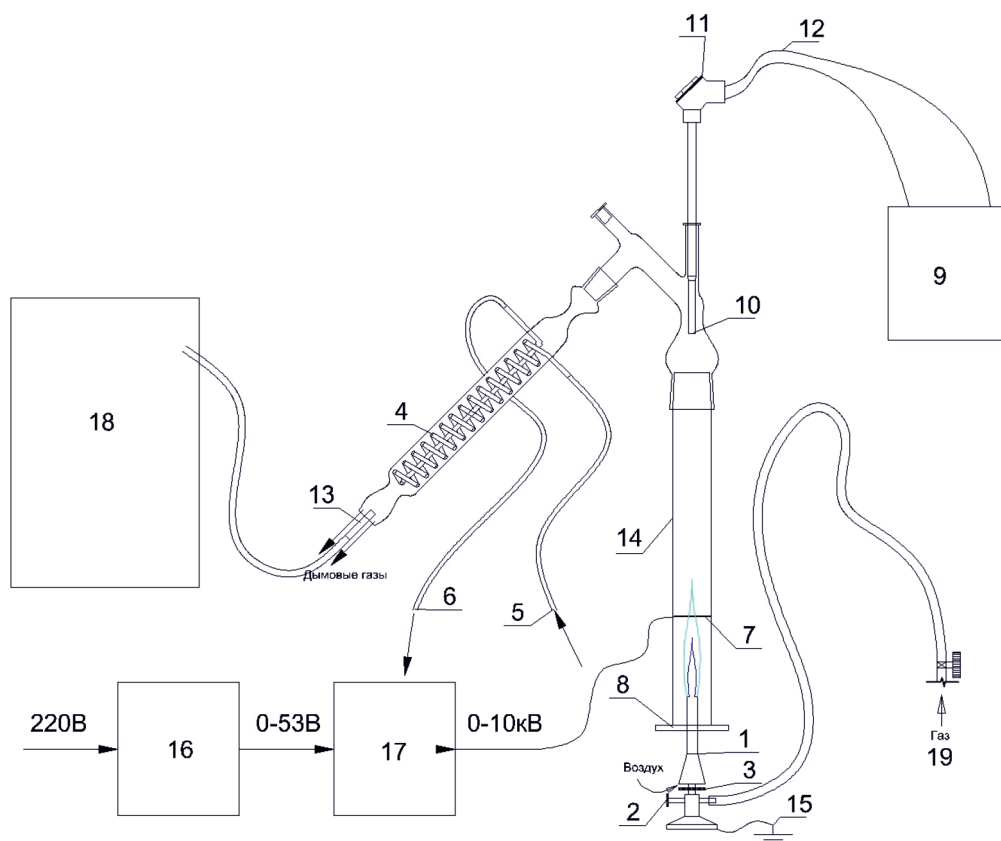


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Состав установки: 1 – горелка Бунзена; 2 – регулировка расхода газовой смеси; 3 – регулировка расхода воздуха на горение; 4 – химический холодильник; 5 – вход охлаждающей жидкости в химический холодильник; 6 – выход охлаждающей жидкости в слив; 7 – кольцевой электрод; 8 – уплотнительное кольцо; 9 – термометр; 10 – термопара хромель-алюмель; 11 – спай термопары и термокомпенсационных проводов; 12 – термокомпенсационные провода; 13 – пробозаборный зонд газоанализатора; 14 – кварцевая трубка; 15 – заземление горелки; 16 – генератор электрических сигналов ГЗ-56; 17 – умножитель напряжения; 18 – газоанализатор; 19 – подача газа из городской сети

Для снижения вредных выбросов на уже существующих котельных предлагаем обратиться к воздействию электрического поля на факел пламени [4]. В литературе встречаются исследования по интенсификации процесса горения при помощи наложения на факел пламени внешнего электрического поля [5, 6], влияя тем самым на скорость реакции и продукты горения. Цель данной статьи – продемонстрировать потенциал воздействия внешнего электрического поля на факел пламени в топке котельной с точки зрения снижения вредных выбросов в атмосферу. В большинстве котельных Нижнего Новгорода основным топливом является природный газ. При его сжигании основными видами вредных выбросов являются CO и NO_x. CO является продуктом неполного сгорания топлива. Новые горелки с закручиванием в котельной позволяют

отображать в режимных картах значения 0, при этом реальные замеры всегда будут содержать низкий порог CO. Для котлов находящихся в длительной эксплуатации это значение может составлять 5–40 ppm, в уже отрегулированном режиме работы. Внешнее электрическое поле влияет на интенсификацию процесса горения и полноту диссоциации водяных паров, содержащихся в топливно-воздушной смеси, что должно положительно сказываться на полноте сгорания газа и снижению выбросов угарного газа в атмосферу. Выбросы оксидов азота более сложные по происхождению. Чаще всего рассматривают три механизма [7] образования оксидов азота:

- **термический** – непосредственное окисление азота кислородом в высокотемпературных зонах. Механизм является преобладающим в традиционных камерах

сгорания с отдельной подачей топлива и окислителя.

● **быстрый** – образуется в начальной зоне разложения углеводородных топлив, реакции образования обладают небольшой энергией активации и возможны при температурах около 1000 К;

● **N₂O механизм или топливный** – через реакции с образованием N₂O как промежуточного вещества.

Физико-химические процессы в топке котельной сопровождаются различного рода неравновесными эффектами [8]. Важнейшее значение среди них имеет неравновесное изменение состава газовой фазы рабочего тела, обусловленное конечными скоростями химических реакций. Внешнее электрическое поле будет выступать катализатором для ряда промежуточных реакций при сжигании газа, за счёт нахождения большого количества свободных электронов в зоне реакции. Предположительно, внешнее электрическое поле, расположенное в топке, будет повышать оксиды азота за счёт термического механизма ввиду повышения температуры факела и будет снижать оксиды азота, образованные быстрым механизмом ввиду увеличения скорости реакции окисления топлива. Так же будет оказывать влияние ориентация диполей в электрическом поле, так как одна степень свободы движения ионов будет ориентирована в направлении линий прохождения электрического поля.

Для исследования влияния электрического поля на продукты горения собран лабораторный стенд, моделирующий работу котельной с минимальным перемешиванием газовой смеси, для исключения влияния степени перемешивания газа на зависимость вредных выбросов от прикладываемого напряжения на кольцах электродов (рис. 1). Тип электрода выбран кольцевым и расположен над пламенем, соответствующим расположению электрода на дальней стенке топки в котельной. Вместо кольцевого электрода заземления использовался заземлённый корпус горелки. В качестве горелки использовалась горелка Бунзена с подачей воздуха на горение из помещения работы установки. Природный газ подавался из сети газоснабжения города Нижнего Новгорода. Регулировка газа осуществлялась клапаном, расположенным на горелке, а регулировка воздуха – винтом предусмотренным конструкцией горелки. Охлаждение продуктов сгорания осуществлялось водопроводной водой с температурой + 10 °С. Нагретая вода сливалась в канализацию.

Стенд закреплён на столе химическими штативами. Он предусматривает отдель-

ную регулировку газа и воздуха, подаваемого на горение. Кольцевой электрод выполнен из нержавеющей проволоки диаметром 0,6 мм и установлен через отверстие в стенке кварцевой трубки диаметром 2 мм. Источник питания позволяет генерировать постоянное напряжение в диапазоне 0-(-15кВ) и силой тока до 0,3 мкА. В ходе эксперимента изменялось напряжение и фиксировались уровни вредных выбросов в ppm при помощи газоанализатора, установленного на выходе из химического холодильника. Ход эксперимента: поджигался факел, горелка поднималась в кварцевую трубку, при этом плотно прижимался уплотнитель. После чего осуществлялся прогрев горелки и стабилизация факела с калибровкой соотношения газ/воздух до уровня CO = 50–60 ppm (газоанализатор при изменении CO имеет достаточно длительную задержку до стабилизации уровня CO – 2–4 минуты). Значение CO намеренно устанавливалось завышенным, для наглядного отображения влияния электрического поля на полноту сгорания, исходя из неоптимальных режимов регулировки горелки. После стабилизации показаний CO подавалось напряжение на электроды и фиксировались изменения CO, NO_x а также температура продуктов горения. Значения при каждом напряжении снимались трижды со сбросом электрического поля на 0. После проведения всех экспериментов по полученным данным производилось построение графиков, представленных на рис. 2–5.

График изменения температуры дымовых газов (рис. 4) отображает повышение температуры при напряжении более 1 кВ. Рост температуры хорошо согласуется с предыдущими исследованиями авторов статьи, в которых наглядно было показано изменение температур в объёме факела при помощи тепловизионной съёмки [9]. При наложении – 3 кВ изменение температуры оказалось минимальным. Так как уровень CO (рис. 6) остаётся стабильным до – 3 кВ, то можно говорить об изменении температур за счёт диссоциации водяного пара, находящегося в воздухе, подаваемом на горение, т.к. повышения полноты сгорания не происходит. Выбросы CO имеют резонансный пик при – 3,5 кВ, после чего следует снижение уровня выбросов CO вплоть до 50% от первоначального значения. Показатели при напряжённости – 6кВ сложно брать в расчёт, так как при превышении этого напряжения происходил пробой через пламя. Коэффициент избытка воздуха растёт при росте напряжения на электроде (рис. 5). Это хорошо согласуется с исследованиями по стабилизации горения

пламени при коэффициенте избытка воздуха существенно ниже 1, однако кроме механизма диссоциации водяных паров предположения о росте α отсутствуют. Снижение CO_2 (рис. 3) происходит с пиком на -3 кВ

и стабильным снижением при превышении этого порога. Механизмы воздействия на NO_x более сложные и обладают стабильностью результатов до -3 кВ с последующим снижением до 40% от исходного значения.

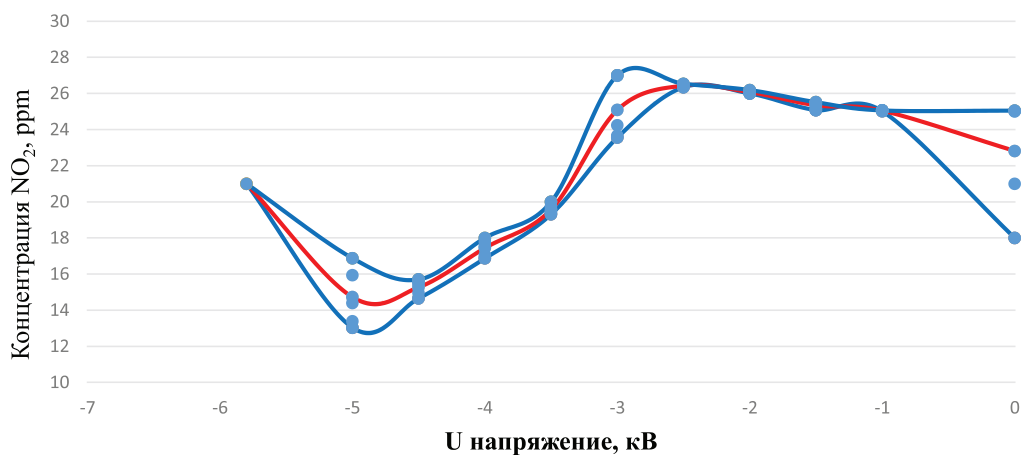


Рис. 2. Изменение выбросов NO_2 от напряжения, ppm

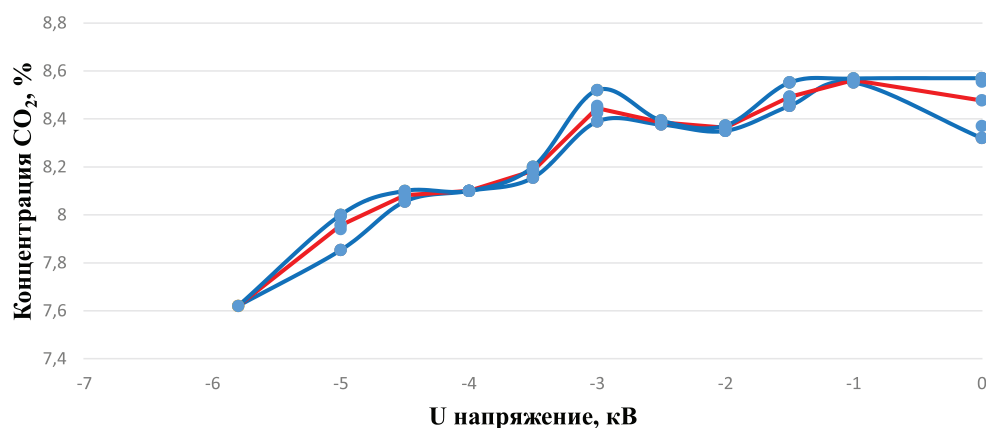


Рис. 3. Изменение выбросов CO_2 от напряжения на электродах

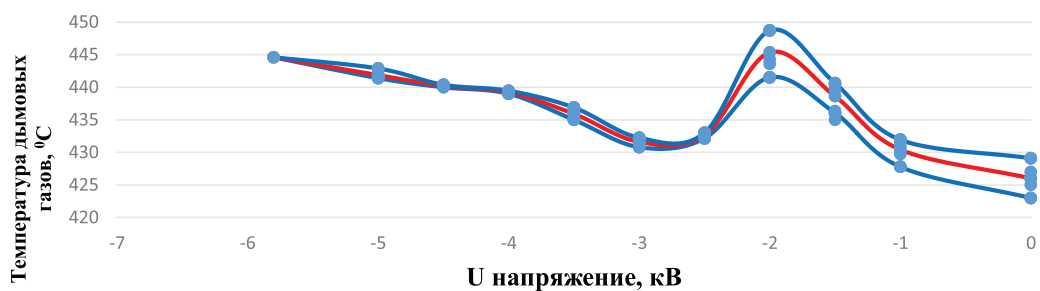


Рис. 4. Изменение температуры продуктов горения при наложении электрического поля на пламя

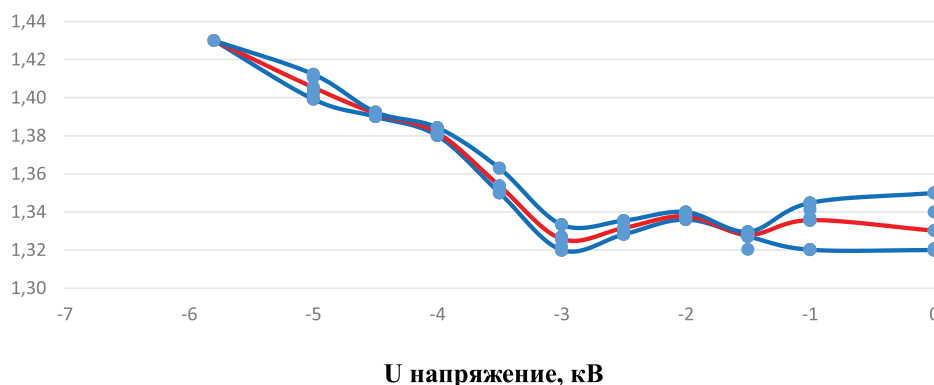


Рис. 5. Изменение коэффициента избытка воздуха в уходящих газах при наложении электрического поля на факел пламени

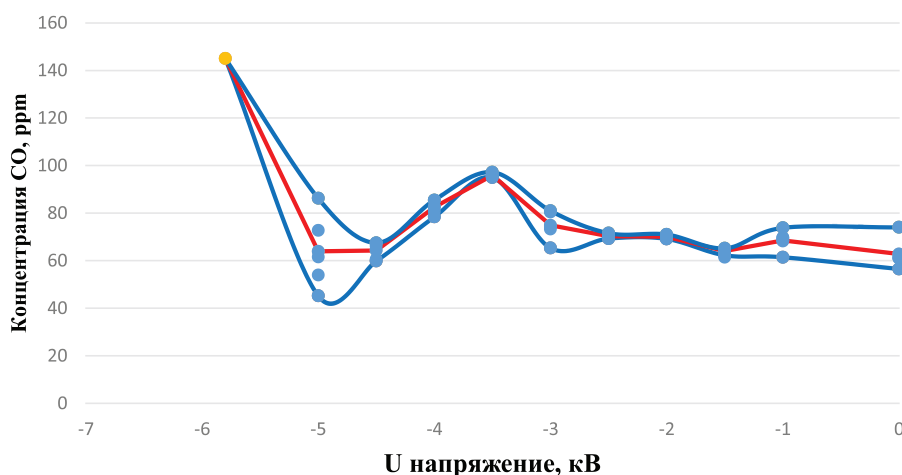


Рис. 6. Изменение выбросов CO от напряжения на электродах

По построенным графикам (рис. 2–3) можно разделить воздействие электрического поля отрицательной напряжённости на 3 этапа:

1. До -3 кВ имеет место слабая зависимость изменения CO и NO_x с локальным всплеском температуры^x на -2 кВ, что можно использовать на котельных для поднятия тепловыделения при сохранении уровня вредных выбросов и минимизации затрат электрической энергии на поддержание электрического поля. Графики на этом участке ровные без изменений, либо имеют вид близкий к виду функции параболы.

2. -3 кВ предположительно связано с каким-либо резонансным процессом, либо с изменением механизма воздействия. На всех графиках данное значение является точкой перегиба.

3. Свыше -3 кВ – значения на графиках коэффициента избытка воздуха и темпера-

туры уходящих газов отмечается рост, а на графиках вредных выбросов отмечается спад. В обоих случаях изменения пропорциональны росту напряжения.

Выводы

Воздействие внешнего электрического поля на факел пламени с точки зрения снижения вредных выбросов и внесения изменений в состав продуктов сгорания имеет высокий потенциал для применения в котельных установках. Экспериментально отображён рост температуры уходящих газов, и снижения уровня вредных выбросов при воздействии электрического поля на факел пламени в условиях сопоставимых с выработкой теплоты в котельных установках. На графиках представлены три зоны различного воздействия электрического поля на факел пламени с точкой перегиба -3 кВ, которая предположительно связана с каким-либо резонансом в меха-

низме воздействия. С точки зрения лёгкости реконструирования котельной и получаемых результатов данный метод имеет самое высокое соотношение. Размещение электродов возможно в любой топке существующей и вновь проектируемой котельной, без существенной реконструкции здания котельной и не затрагивая тепловой схемы котельной. Полученные данные отчётливо говорят о воздействии электрического поля на уровень вредных выбросов в продуктах сгорания газового топлива. Механизмы воздействия требуют дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Оптимизация расчёта горелок с принудительной подачей воздуха и шелевой камерой смешения / В.А. Яковлев // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 1(54). – С. 113–119.
2. Оптимизация воздухораспределительных систем газогорелочных устройств с принудительной подачей воздуха и шелевой камерой смешения методом математического моделирования / В.А. Яковлев, Г.П. Комина // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2(55). – С. 163–170.
3. Схема теплоснабжения города Нижнего Новгорода на период с 2012 года до 2027 года (проект ОАО «Газпром прогаз») [Электронный ресурс]. – URL: http://нижнийновгород.рф/upload/ср/af/11/files/sx_teplo/СХЕМА%20ТС%20НИЖНЕГО%20НОВОГОРОДА.pdf.
4. Electric Field Effects on Emissions and Flame Stability with Optimized Electric Field / F. Altendorfer, A. Sakhrieh, F. Beyrau [etc.] // Third european combustion meeting. – ECM. – 2007. – P. 1–6.
5. Электрокаталитическая интенсификация горения твёрдого и газообразного топлива / Г.С. Столяренко, В.Н. Вязовик, О.В. Водяник, Ю.Д. Марцинишин // Вестник ЧДТУ. – 2008. – № 1. – С. 165–169.
6. Исследование влияния электрического поля на сжигание мазута в промышленных установках [Электронный ресурс] / Д.П. Турлайс, В.П. Гривцов, Д.Е. Русов, М.Я. Пурмалис // Труды 4-й Российской национальной конференции по теплообмену. – 2006. – Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. – С. 327–328. – Режим доступа: <http://www.mkt.ru/year/2006/lib/3-327.pdf>.
7. Зельдович Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий // Изд-во АН СССР. – 1947. – 145 с.
8. Лопанов А.Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва: учебное пособие / А.Н. Лопанов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 149 с.
9. Суворов Д.В. изменения в температурных «слоях» диффузионного пламени при воздействии электрического поля / М.А. Кочева // Приволжский научный журнал. – 2016. – № 2. – С. 62–66.