



Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-563865, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-563865, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора

по научной работе и инновациям

Национального исследовательского

Томского политехнического университета

кандидат химических наук, доцент

Р.В. Оствальд

« 07 » _____ 06 _____ 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертацию Верещетина Владимира Артуровича на тему «Совершенствование низкоэмиссионных газогорелочных устройств котлов ТЭС», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»

Актуальность темы работы определяется направленностью на охрану воздушного бассейна путем снижения выбросов оксидов азота в атмосферу при сжигании природного газа на тепловых электростанциях. Это связано, во-первых, с тем, что согласно «Энергетической стратегии России до 2030 года» доля природного газа, потребляемого для выработки электрической энергии, по-прежнему будет значительной. Во-вторых, оксиды азота являются основным вредным компонентом в продуктах сгорания природного газа. В-третьих, действует тенденция законодательного ужесточения требований к ограничению вредных выбросов от топливосжигающих установок.

Тема диссертации находится в рамках приоритетного направления развития науки, технологии и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и полностью соответствует критическим технологиям РФ «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

Немаловажным аспектом работы, определяющим ее актуальность, является то, что в центре внимания диссертационного исследования находятся процессы, которые позволили выработать рекомендации по совершенствованию т.н. низкоэмиссионных горелочных устройств, обеспечивающих сравнительно низкий уровень капитальных и эксплуатационных затрат. Это в полной мере соответствует экономическим условиям, сложившимся в России, позволяя продлить срок эксплуатации значительной части действующих котлоагрегатов тепловых электростанций и газовых котельных.

Изложенное выше позволяет констатировать несомненную актуальность рассматриваемой диссертационной работы.

Цель и задачи исследований. Цель работы сформулирована конкретно и обозначена как создание методических основ, разработка и обоснование рекомендаций по проектированию газогорелочных устройств с низким выходом NO_x . Для достижения поставленной цели выдвинуты и решены следующие задачи: выявить тенденции и выделить применительно к данной работе пути совершенствования низкоэмиссионных газовых горелок; провести стендовые исследования влияния конструктивных особенностей горелок и режимных факторов на эмиссию вредных выбросов; провести вычислительный эксперимент по установлению влияния конструкций и режимов работы горелок на внутрифакельные процессы; обобщить экспериментальные и расчетные исследования и выработать на этой основе рекомендации по проектированию низкоэмиссионных горелок; разработать, внедрить и исследовать низкоэмиссионные горелки на действующих котлах.

Структура, объем и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и изложена на 131 странице машинописного текста, включая одну таблицу и 52 рисунка.

Во введении дано обоснование актуальности избранной темы, поставлены цель и задачи работы, охарактеризованы признаки научной новизны и практической значимости полученных результатов, доказательства их достоверности и личного вклада автора, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 выполнен аналитический обзор литературных источников, посвященных исследованиям в области методов снижения образования оксидов азота, показаны основные тенденции совершенствования конструкций горелочных устройств. На основании анализа и обобщения отечественного и зарубежного опыта использования низкоэмиссионных газогорелочных устройств для снижения образования NO_x показано, что усовершенствование их конструкции связано с организацией ступенчатого сжигания собственно в факеле горелки и балластированием подаваемого окислителя путем рециркуляции дымовых газов в горелки. Определен перечень конструктивных и режимных параметров, которые необходимо исследовать, и обоснованы требования к принципам постановки исследования.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям при сжигании природного газа на стендовой установке. Исследовались особенности образования NO_x в зависимости от конструктивных отличий горелки, условий смесеобразования, наличия или отсутствия внутренней рециркуляции дымовых газов. В результате стендовых исследований получены зависимости концентрации NO_x от коэффициента избытка воздуха как при диффузионном, так и при кинетическом режиме горения. На различных моделях газогорелочных устройств исследовано влияние ступенчатого сжигания и внутренней рециркуляции дымовых газов на выход NO_x .

В главе 3 представлены результаты численного исследования образования NO_x в пламени горелки в зависимости от применяемых конструктивных элементов горелки, конфигурации амбразуры и внешней рециркуляции дымовых газов. С использованием программного комплекса ANSYS CFX разработана и протестирована математическая модель горения газообразного топлива в вихревой двухпоточной по воздуху горелке с двумя независимыми вводами природного газа. Выявлены особенности протекания процессов в факеле и уровни генерации NO_x в зависимости от различных условий смесеобразования в горелке и способов балластирования окислителя дымовыми газами. Установлено, что с точки зрения снижения NO_x наиболее предпочтительной из рассмотренных является амбразура диффузорного типа.

В главе 4 изложены рекомендации по созданию низкоэмиссионных газогорелочных устройств и результаты промышленных испытаний низкоэмиссионных горелочных устройств на действующих котлах, в которых реализованы предложенные рекомендации. Показано, что даже частичная реализация разработанных рекомендаций позволяет улучшить сбалансированность таких характеристик горелки как надежность воспламенения и устойчивость горения, полнота выгорания топлива и удовлетворение экологических нормативов. Многолетний опыт эксплуатации горелок, разработанных и изготовленных с учетом предложенных рекомендаций, на котлах ТГМП-314, Е-160-3,9-440 ГМ и КВГМ-50 показал, что удалось добиться снижения выбросов NO_x до требуемых нормативов с сохранением при этом основных технико-экономических и надежности показателей горелки и котла в целом.

В заключении диссертации представлены основные выводы по результатам приведенных исследований.

Автором изучен достаточно большой объем литературы, подробно охарактеризованы источники и механизмы образования оксидов азота, показана их специфика применительно к сжиганию природного газа. На этой основе систематизированы основные пути, а также методы для снижения образования NO_x . Убедительно показаны преимущества технологических методов подавления механизмов генерации оксидов азота и, как наиболее перспективного направления среди них, – использования низкоэмиссионных горелочных устройств. Исходя из опыта исследования и эксплуатации низкоэмиссионных горелок, намечены направления поисков по их совершенствованию. В основу постановки задач работы легло многократно проверенное положение о том, что конструкция горелочного устройства, отдельных его элементов и их сочетания во многом определяет условия, влияющие на образование NO_x . В частности, к таким условиям относятся интенсивность воспламенения факела, смесеобразование топлива с воздухом и в конечном итоге максимальный уровень температуры в ядре горения. Диссертант логично и справедливо определил, что, изменяя конструкцию горелки, можно влиять на эти параметры и в итоге ставить задачу добиться снижения образования NO_x без ухудшения процесса горения. Принципиально важно, что при этом капитальные и эксплуатационные затраты находятся на достаточно низком уровне по сравнению с другими методами.

Такой подход закономерным образом обусловил комплексный характер диссертационного исследования, сочетающего теоретические обоснования, численное моделирование, физические эксперименты на стендовой установке и промышленные испытания в натуральных условиях действующих котлоагрегатов ТЭС. Комплексная методология проведения исследований предопределила получение важных результатов в виде расчетных и экспериментальных зависимостей образования оксидов азота от условий смесеобразования при стадийном сжигании природного газа для изучаемых конструкций газовых горелок. Это позволило выявить роль конструктивных особенностей основных типов горелочных амбразур, установить количественные параметры использования в горелках внутренней и внешней рециркуляции продуктов сгорания. Завершением совокупности результатов комплексных исследований являются рекомендации по конструктивному оформлению и режимам работы низкоэмиссионных горелок, реализованные в устройствах, прошедших промышленные испытания на ряде действующих котлов тепловых электростанций.

Анализ содержания диссертации и полученных результатов показал, что поставленные автором и перечисленные выше задачи в целом **решены** в соответствии с

тенденциями развития природоохранных технологий в теплоэнергетике, а поставленная в работе цель достигнута.

Значимость для науки полученных результатов определяется наличием признаков их научной новизны, которые в целом можно охарактеризовать как разработку основных научных положений для проектирования низкоэмиссионных газогорелочных устройств. К ним относятся упомянутые выше при анализе содержания диссертации: зависимость образования NO_x от условий смесеобразования при реализации стадийного сжигания применительно к исследованным газогорелочным устройствам, от осуществления в горелках внутренней и внешней рециркуляции дымовых газов; установление и количественные оценки влияния конструктивного оформления амбразур газовых горелок на особенности процессов в факеле и генерацию оксидов азота.

Значимость для производства полученных результатов заключается в том, что выработанные рекомендации по проектированию низкоэмиссионных горелок могут быть применены и уже в достаточной мере подготовлены для разработки и реконструкции горелочных устройств, сжигающих газообразные топлива, что доказано проверкой в условиях эксплуатации ряда котлов ТЭС. Разработанные рекомендации и представленные в работе результаты промышленных исследований будут способствовать повышению экологичности работы энергетических котлов на газе. Результаты исследований использованы при разработке отраслевых стандартов методических указаний, внедрены на котлах трех тепловых электростанций ОАО «Мосэнерго», использованы в проектах реконструкции котлов четырех электростанций и при проектировании нового котлоагрегата.

Достоверность результатов исследований достаточно доказательно обоснована автором (в автореферате и в вводной части диссертации): применением проверенных методик испытаний и аттестованных измерительных средств; использованием современных вычислительных программных продуктов, апробированных математических моделей и методов вычислений при численном моделировании, а также при обработке результатов экспериментов; удовлетворительным согласованием экспериментальных и расчетных данных, а также их согласованием с имеющимися данными других авторов.

Опубликование и апробация результатов работы проведены в полной мере. По теме опубликованы 22 научные работы, из них 10 публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на девяти представительных конференциях, в том числе международных.

Текст диссертации и автореферата изложен логично и доступным для читателей языком, с преобладанием доказательного стиля. Структура и логика представления материала в полной мере обоснованы в контексте раскрытия поставленной цели и соответствующих ей задач исследования. Обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Замечания по работе

1. Название диссертации и представленные в ней материалы позволяют в качестве одного из закономерных итогов работы предполагать патентование или иную регистрацию объектов интеллектуальной собственности. Однако это осталось нереализованным, хотя получение такого подтверждения технической новизны усилило бы впечатление об оригинальности диссертационной работы.

2. Во второй главе при анализе результатов экспериментальных исследований влияния конструктивных и режимных факторов на эмиссию оксидов азота во всех случаях

изменение концентрации NO_x объясняется среди прочего изменением температурного уровня. Но при этом не приводятся какие-либо данные по измеренным значениям температуры в соответствующей точке.

3. Отсутствует описание методики выполнения экспериментов на стендовой установке и порядка обработки результатов измерений с определением погрешностей.

4. При численном моделировании в качестве модели турбулентности принята « k - ϵ » модель. Следует отметить, что известно несколько модификаций « k - ϵ » модели турбулентности. Поэтому при проведении подобных численных исследований с закруткой потоков для получения адекватных результатов математического моделирования необходим обоснованный выбор той или иной модели турбулентности. В диссертации этому не уделено должного внимания.

5. Для полноценного применения результатов математического моделирования необходимо понимать, какие принимались начальные граничные условия. В тексте диссертации эти сведения упущены. Поэтому не ясно, учитывался ли теплообмен на внешней поверхности расчетного цилиндрического объема.

6. Материалы исследований на действующих котлах в главе 4 приведены в виде аннотированного резюме по итогам. Научная ценность и достоверность результатов этой части работы была бы более высокой, если бы были представлены данные из протоколов испытаний. Без нарушения требований к ограничению объема основного текста диссертации данные испытаний могли быть представлены в виде приложений к работе.

7. Концентрация NO_x , которую необходимо сравнивать по результатам разных исследований, на каком-то основании представлена не в единообразных единицах измерения: по итогам численного моделирования это моль/моль или кг/кг, а в испытаниях на реальном котле – мг/м³.

8. К сожалению, нельзя не отметить наличие огрехов в оформлении диссертации, в том числе некоторые:

- принята нумерация рисунков в пределах каждой главы, но при этом в главе 1 наличествует рис. 2.12;
- в третьей главе фраза «программный пакет ANSYS CFX широко используется во всем мире ...» сопровождается ссылками только на отечественных авторов;
- в пояснении к рис. 3.10 не дано определение «периферийная область», что затрудняет анализ приведенных результатов;
- поясняющая надпись на рис. 1.8 «более прохладный ... уменьшает тепловой NO_x » вызывает затруднение для понимания.

Выводы

1. Вышеприведенные замечания не являются доминирующими при оценке рецензируемой диссертационной работы. Она является целостным и самостоятельным, завершенным научно-квалификационным трудом, обладающим актуальностью, научной новизной, теоретической и практической значимостью, в котором содержится решение задачи по совершенствованию горелочных устройств для сжигания газа, в направлении сокращения вредных выбросов оксидов азота, имеющее существенное значение для тепловой энергетики.

2. Основные положения и выводы диссертационной работы рекомендуются для использования на тепловых электростанциях, работающих на газообразном топливе, а также в научно-исследовательских и проектных организациях для разработки низко-эмиссионных газогорелочных устройств нового поколения.

3. Кандидатская диссертация Верещетина В.А. «Совершенствование низкоэмиссионных газогорелочных устройств котлов ТЭС» соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пункт 9, абзац 2), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Верещетин Владимир Артурович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Отзыв на диссертацию и автореферат подготовлен в секторе энергетического машиностроения Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, рассмотрен и обсужден на теплоэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» 01 июня 2018 года, протокол № 1.

Председатель теплоэнергетической секции НТС
ИШЭ ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет»,

доктор физико-математических наук, профессор
Проспект Ленина, 30
Томск, 634050 (Россия)
E-mail: bvborissov@tpu.ru
тел.: 8 (3822) 606248

Борисов Борис Владимирович

Руководитель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», доктор технических
наук, профессор
Проспект Ленина, 30
Томск, 634050 (Россия)
E-mail: zavorin@tpu.ru
тел.: 8 (3822) 563910

Заворин Александр Сергеевич

Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», кандидат
технических наук
Проспект Ленина, 30
Томск, 634050 (Россия)
E-mail: angil@tpu.ru
тел.: 8 (3822) 563910

Гиль Андрей Владимирович

Подписи Борисова Б.В., Заворина А.С. и Гиль А.В. заверяю

Учёный секретарь
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



Ананьева Ольга Афанасьевна