

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента по диссертации Хаустова Сергея Александровича на тему «Совершенствование конструктивных схем жаротрубных котлов на основе численного моделирования процессов горения и тепломассообмена» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

### **Актуальность темы**

Целью диссертационной работы определено совершенствование конструктивных схем жаротрубных котлов на основе многофакторной компьютерной оптимизации газодинамики, направленное на повышение их энергоэффективности. В последние годы в РФ на рынке теплогенерирующего оборудования малой мощности наблюдается большой спрос на водогрейные жаротрубные котлы, поставляемые из-за рубежа. В основе их широкого распространения – высокая автоматизация, доступность для ремонта, а также поставка котла заказчику в виде единого изготовленного на заводе блока, что значительно упрощает монтаж оборудования на месте эксплуатации. Хотя стоимость импортных котлов выше стоимости отечественных аналогов по мощности, тем не менее заказчики при комплектации автономных индивидуальных и промышленных котельных чаще приобретают продукцию известных зарубежных производителей. Научная проработка вопроса конструирования жаротрубных котлов должна повысить конкурентоспособность отечественной продукции. По этой причине можно согласиться с автором в обосновании актуальности поставленной цели.

### **Методы исследования**

В последнее время численное моделирование стало обязательным компонентом не только научной, но и инженерно-конструкторской практики. Автор диссертации применяет его наряду с натурными испытаниями для изучения и совершенствования конструкций промышленных жаротрубных

котлов. Мощным инструментом математического моделирования являются коммерческие программные продукты, допускающие высокопроизводительные многопроцессорные вычисления. В диссертации с использованием современного программного обеспечения ANSYS FLUENT, а также эффективных моделей трехмерной неізотермической аэродинамики, турбулентного горения и теплообмена многокомпонентной смеси произведено 750 расчетов различных вариантов камер сгорания жаротрубных котлов в широком диапазоне изменения их конструктивных характеристик.

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (190 наименований) и четырех приложений, содержит 159 страниц, 3 таблицы и 39 рисунков. Основное содержание диссертации отражено в 23 научных работах, включая 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и 6 статей в журналах, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science, и обсуждено на научно-технических конференциях различного уровня. Автором получен 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание работы.

В первой главе автор анализирует существующие конструктивные схемы жаротрубных котлов и имеющийся опыт их проектирования и делает вывод, что расчет теплообмена в конвективных поверхностях нагрева жаротрубных котлов для отечественной практики проектирования является в достаточной мере решенной задачей. В то же время наиболее сложными и наименее освещенными в литературе остаются вопросы конструирования жаровых труб с факелом реверсивного типа. Автор отмечает работы отечественных исследователей и использование их результатов на практике. Наряду с этим в диссертации выполнен обзор большого количества зарубежных источников. На основании проведенного анализа заключено, что без методов виртуального

прототипирования и эволюционного поиска оптимальных конструкторских решений отечественным разработкам неперспективно конкурировать в сфере промышленной теплоэнергетики, и закономерно сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе произведена физико-математическая постановка задачи, в которой автор приводит уравнения математических моделей, которые адекватно воспроизводят газодинамику, перемешивание, горение и теплообмен в многокомпонентной смеси, и предлагает корректные способы их численного решения. Для верификации выбранной математической модели автор сравнил полученные им экспериментальные значения температуры дымовых газов в поворотной камере на выходе из топки действующего котла прототипа с результатами расчета этих же параметров на модели.

В третьей главе представлены результаты математического моделирования процессов в реверсивном факеле, установлен перечень параметров камеры сгорания, изменение которых позволяет влиять на эффективность работы котельной установки, выявлены условия, при которых зависимости критериев эффективности от меняющихся параметров монотонны и не имеют исключительных точек. Научные результаты приведенного в третьей главе исследования получены на основе квалифицированного анализа закономерностей газодинамики реверсивного факела.

В четвертой главе диссертации произведена систематизация полученных результатов математического моделирования и предложена усовершенствованная конструктивная схема камеры сгорания, реализующая применение нового метода управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла. Метод управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла заключается в варьировании доли дымовых газов в рециркулирующем потоке путем изменения проходного сечения канала рециркуляции с помощью регулирующей заслонки. Рециркулирующий поток дымовых газов, направляясь в канал рециркуляции, контактирует с устьем факела, отдавая при этом за счет теплопроводности и диффузии часть тепла

поступающей воздушно-топливной смеси. В результате появляется возможность интенсификации воспламенения и протекания реакции горения. Кроме того, техническим результатом предложенного конструктивного решения является возможность регулировки температуры и дальнобойности факела. Увеличение доли рециркулирующего потока через канал рециркуляции приводит к повышению уровня турбулентности, росту турбулентной скорости реакции, что дополнительно снижает дальнобойность факела и позволяет уменьшить активный объем камеры сгорания и, следовательно, металлоемкость устройства.

Заключение в полной мере отражает основные результаты диссертационного исследования. И хотя последовательность изложения выводов определена логикой построения диссертационного исследования, однако, выводы 4, 5 и 6 являются механическим перечислением произведенных работ. Следует отметить, что текст заключения не является прямым дублированием поставленных задач, в то же время выводы полностью соответствуют поставленным цели и задачам.

В приложениях приведены результаты численных исследований газодинамической структуры факела, подтверждающие обоснованность выбранной модели, чертежи объекта исследования, акты об использовании результатов.

### **Основные научные и практические результаты.**

*Научная новизна* работы заключается в следующем.

– Автор выявил новые особенности турбулентной аэродинамики реверсивного факела и обнаружил, что при достижении значения параметра крутки 1,4 происходит срыв потока с центральной оси горелки.

– Автор получил аналитические зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления камеры сгорания и эжекции горелочной струи от конструктивных параметров тупиковой камеры сгорания.

– Автором разработан метод для проектирования жаротрубных котлов с учетом характеристик процессов вихревого сжигания газообразного топлива.

– Автором предложен новый метод управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла, позволяющий учитывать конструктивные и режимные параметры, тепломассообмен рециркуляцией, влияние крутки потока на эжекционную способность и дальнобойность факела.

*Практическая значимость* результатов работы, состоит в том, что примененный метод исследования и полученные сведения о закономерностях аэродинамики реверсивного факела могут быть использованы в теплотехнических расчетах широкого класса энергоустановок, таких как котлы, камеры сгорания турбинных установок, отопительные и металлургические печи и др. Полученные результаты исследования и предложенный метод численного анализа могут применяться при проектировании, модернизации и реконструкции жаротрубных котлов. Разработанные конструктивные схемы пригодны к практической реализации в промышленной теплоэнергетике.

Результаты выполненных исследований используются в ЗАО «СМП-95» (г. Томск) и ООО «Инженерный центр «Теплоуниверсал»» (г. Томск) и включены в образовательную практику по направлению «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете.

**Обоснованность и достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованием расчетов с экспериментальными данными других авторов, а также результатами испытаний, проведенных в экспериментальных цехах фирм-производителей, апробацией работы на различного уровня конференциях, публикацией в рецензируемых журналах, соответствующих тематике исследований.

### **Замечания.**

1. На 32 странице диссертации при формулировке физико-математической постановки в качестве рабочей модели излучения рассмотрено только P1-приближение в методе сферических гармоник, использование которого оправданно для сред, характеризующихся значительной оптической толщиной излучающего слоя. В то же время в программном продукте Ansys Fluent наряду с P1-приближением представлен ряд более точных математических моделей лучистого теплообмена.

2. Исследованию сжигания метана в цилиндрических камерах с вихревыми горелками посвящено много экспериментальных и теоретических работ, представляющих детальную информацию об аэродинамике, турбулентной структуре, распределении температуры и концентраций компонент смеси, тепловых потоках на поверхности камеры. Целесообразно было бы использовать их для демонстрации адекватной настройки вычислительной модели изучаемого процесса. В связи с этим непонятно, какова ошибка при моделировании одного варианта расчета и всего поиска оптимального решения в целом.

3. На стр. 62 указывается, что протекающие в топке процессы в усреднении по Рейнольдсу симметричны относительно оси горелки. Почему в таком случае задача оптимизации параметров камеры сгорания жаротрубного котла (750 вариантов расчетов) не решалась в осесимметричной постановке, которая менее требовательна к ресурсам компьютера?

4. По тексту диссертации встречаются «неточности»: на стр. 32 говорится о несжимаемом многокомпонентном газе, хотя на следующей странице приводятся уравнения для переменной плотности; на стр. 40 скорость горения метана в соответствии с принятой моделью Eddy Break Up должна определяться как минимальная из диффузионной и кинетической скоростей, а не корень квадратный из их квадратов; стр. 45 - задание на выходе из вихревой горелки равномерных по сечению профилей скорости не есть хорошее

приближение (см. [87]); стр. 45 – «условие не прилипания (no slip)» - no slip переводится – нет скольжения, т.е. есть условие прилипания.

### **Заключение.**

Рецензируемая диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную по актуальной тематике и обладающую научной новизной и практической значимостью. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных результатов.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты. Работа изложена ясным, технически грамотным и доступным языком, с логически выстроенной структурой и взаимосвязью между поставленными задачами и их решением. В диссертации решена задача совершенствования конструктивных схем жаротрубных котлов с учетом характеристик процессов вихревого сжигания газообразного топлива, имеющая существенное значение для развития децентрализованного теплоснабжения, а также повышения конкурентоспособности отечественного энергетического оборудования малой мощности. Предложенные решения в достаточной мере аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

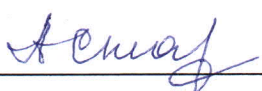
Рассматриваемые в диссертации вопросы соответствуют формуле и области исследований (оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах; разработка теоретических аспектов и методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах) паспорта специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., № 842, а её автор, Хаустов Сергей Александрович, достоин присуждения учёной степени

кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Официальный оппонент -

Старченко Александр Васильевич, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования, д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.



Старченко Александр Васильевич

Тел. (3822) 529-740,

starch@math.tsu.ru

05.12.2016



Подпись А.В. Старченко заверяю: