

О т з ы в

официального оппонента на диссертационную работу Дорж Даваацэрэна "Газодинамика и теплообмен при соударении закрученных газовых струй", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14- теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Дорж Даваацэрэна "Газодинамика и теплообмен при соударении закрученных газовых струй" посвящена изучению процессов взаимодействия закрученных неизотермических встречных струйных потоков. Автор рассмотрел два класса встречных струй: низкотемпературные струи и высокотемпературные струи-факелы. Для обеих постановок проведен комплекс экспериментальных исследований на основе применения тепловизионной техники и современных методов статистической обработки экспериментальной информации. Значимую часть работы составляет описание практической реализации полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во **введении** автор обосновывает актуальность выбранной темы исследования, формулирует цели и задачи работы, излагает основные положения, выносимые на защиту, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

Первая глава посвящена литературному обзору, на основании которого автор делает вывод о недостаточной изученности процессов соударения закрученных неизотермических струй и об отсутствии данных по основным механизмам такого взаимодействия. Сформулированы основные задачи исследования, сводящиеся к необходимости установления газодинамических условий интенсивного теплообмена при соударении закрученных струй, модернизации существующих методик экспериментального исследования таких процессов, получения исчерпывающего объема экспериментальных данных с их углубленной обработкой. Кроме того, одной из сформулированных задач исследования являлось создание общей концепции автоматизированного управления структурой, локализацией зоны соударения закрученных струй, а также защиты от возможных явлений срыва факелов в промышленных агрегатах.

Во **второй главе** приведены схемы используемых в работе экспериментальных установок, соответственно, для низкотемпературных и высокотемпературных струйных потоков. Описаны методы исследования, процедуры обработки получаемых экспериментальных данных. В качестве основного метода использован тепловизионный

метод, для обработки массивов температурных данных использовались фурье-анализ, вэйвлет-анализ и метод главных компонент (МГК).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию зоны соударения низкотемпературных струй и факелов. На основе анализа термограмм и результатов статистической обработки изучена структура зон соударения струй, сделаны выводы о наличии зон интенсивной перемежаемости в области столкновения струй. Автор выделил два основных режима взаимодействия струй, определяющим параметром в этом разделении является термомеханический параметр крутки.

В четвертой главе изучены вопросы, связанные с закономерностями теплообмена в области взаимодействия струй. Проведена количественная оценка интенсивности теплопереноса с применением среднего коэффициента теплового взаимодействия и безразмерной интенсивности теплового взаимодействия. Автором получено критериальное уравнение для оценки теплообмена при соударении встречных закрученных низкотемпературных струй и выражения для локального коэффициента теплонапряженности для инжекционного режима и режима принудительной подачи воздуха в вихревую горелку.

Пятая глава посвящена описанию результатов внедрения результатов исследования в реальные энергетические технологии. Автор разработал методику управления расположением зоны взаимодействия встречных закрученных факелов в рабочем пространстве топочной камеры, а также алгоритм и схмотехническое решение для двухпараметрической системы защиты при срывах факела.

По полученным результатам опубликовано одиннадцать печатных работ, в том числе три статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень научных рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК, а также три патента.

К работе имеются следующие замечания:

1. В обзоре автор приводит (стр. 23) два основных, известных из литературы, определения степени крутки, основанных на геометрических параметрах лопаточных завихрителей, а также другие определения, применяемые для закручивающих устройств с тангенциальным подводом. В то же время в диссертации не упоминаются альтернативные определения параметров крутки, известные из зарубежной литературы (как, например, определения Сайреда (Syred) для лопаточных завихрителей и тангенциальных камер). Кроме того, отсутствует основное гидродинамическое определение, рассчитываемое на базе распределений осевой и тангенциальных компонент скорости. Поскольку это литературный обзор, автору следовало бы привести информацию из большего количества первоисточников. Альтернативные определения необходимы, так как расчет параметра крутки для принципиально различных конструкций завихрителей нельзя производить по одним и тем же формулам. Автор хоть

и упоминает некоторые из них в обзоре, но далее, во 2-ой главе, при описании конструкции аксиального завихрителя, разработанного для изучения высокотемпературных потоков, и не имеющего центральной втулки, продолжает рассчитывать параметр крутки на основе формулы для завихрителя с центральным телом, полагая его диаметр равным нулю. Такой подход представляется не совсем корректным с точки зрения последующего возможного сравнения режимов течения, реализованных на различных установках, но с близкими значениями параметра крутки. Далее по тексту диссертации анализируется конструктивно-режимный параметр крутки и рассчитанный на его основе термомеханический параметр крутки, но остается неясным, каким образом он оценивался.

2. В целом, литературный обзор является не вполне исчерпывающим, поскольку из 126 наименований в списке литературы, только около десятка являются оригинальными статьями зарубежных авторов.

3. В тексте много опечаток и орфографических неточностей. Кроме того, есть совсем некорректные выражения, например «...коэффициентом кинематической вязкости служит температура воздуха перед завихрителем» (стр. 24). Очевидно, что автор имел в виду вязкость при температуре перед завихрителем, однако текст диссертации следовало бы более тщательно выверить на предмет опечаток, грамматики и неточностей. Еще один пример выражения, смысл которого трудно понять (стр. 14): «Вследствие крупных вихрей исследуемых струй турбулентные струи образуют зоны вихрей в себе...»

4. Во второй главе при описании метода главных компонент МГК (PCA – Principal Component Analysis) автор ссылается, как на первоисточники, на две работы: кандидатскую диссертацию П.Ю. Худякова 2013 г. и совместную с ним статью в журнале «Электрические станции». Справедливости ради, следовало бы указать работу Pearson 1901 года, где этот метод был впервые предложен и монографию Jolliffe (1986). Кроме того, следовало бы упомянуть современное расширение этого метода, а именно – Proper Orthogonal Decomposition (POD), предложенное изначально Karhunen (1946) и Loeve (1948) (KLD – Karhunen-Loeve Decomposition) и в начале 1990-х Lamley для анализа турбулентных течений. Вывод автора о том, что вэйвлет анализ и метод главных компонент нецелесообразно применять по отдельности (стр. 47), является дискуссионным: любые методы анализа, в том числе не только эти два упомянутых, применяемые как совместно, так и по отдельности, являются взаимодополняющими и расширяют возможности интерпретации полученных экспериментальных данных. Собственно говоря, в другой части диссертации, в 3-ей главе (стр.82), автор приходит к подобному выводу.

5. При описании тепловизионного метода (раздел 1.3 первой главы и раздел 2.1 второй главы) упоминается ряд работ, в которых метод термовизуализирующей сетки

успешно применялся ранее. Однако в диссертационной работе, которая является квалификационной, следовало бы подробнее самому автору проанализировать погрешности измерений данным методом и область его применимости. Анализ погрешностей, приведенный в Приложении 4, представляется не вполне достаточным в этом смысле.

На стр. 35 и 37 автор пишет о методах измерения характеристик потока «перед завихрителем» – пульсаций давления и степени турбулентности с помощью термоанемометра. Имеется ли ввиду – измерение на выходе из завихрителя?

6. В третьей главе (стр. 54) автор вводит понятие «гетеровидные структуры». Такой термин оппоненту до этого момента не встречался, поэтому необходимо пояснение.

7. Раздел 3.5 диссертации посвящен идентификации структуры течения при соударении высокотемпературных встречных газовых струй. Автор применяет метод главных компонент и вэйвлет преобразование для анализа ансамбля температурных полей. На рисунках 3.24–3.29 и 3.38–3.43 под буквой «б» приведены распределения первой компоненты разложения МГК. По мнению оппонента, автор ошибочно называет это дисперсией и сравнивает со средним распределением, констатируя подобие этих распределений. На самом деле первая компонента разложения обычно и представляет собой среднее распределение – по определению МГК (POD). Иногда это – нулевая мода, иногда – первая – в зависимости от особенностей нумерации той или иной численной реализации метода. Соответственно, остальные моды, также по определению метода МГК, – это убывающие по «энергосодержанию» (в смысле отклонения от среднего) моды и сумма соответствующих им собственных значений разложения равняется полной дисперсии. Искать физический смысл в структурах на этих распределениях не имеет смысла, и автор, видимо, поэтому, не найдя адекватного объяснения, отмечает трудность интерпретации данных структур.

В целом, автор выполнил поставленные в работе задачи, проявил свою квалификацию как исследователя. работа выполнена на высоком научном уровне, методически грамотно. Работа обладает необходимой степенью **актуальности** и **новизны**, **достоверность** полученных результатов подтверждается использованием современной приборной базы и сравнением с данными других авторов на тестовых экспериментах. **Практическая значимость** работы подтверждается наличием нескольких патентов и актом о запланированном внедрении результатов на Улан-Баторской ТЭС-2 (Монголия).

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты работы **опубликованы** в рецензируемых изданиях, **апробированы** на всероссийских и международных конференциях.

Изложенные выше замечания не снижают благоприятного отношения к работе и ее **положительной** оценки.

Диссертация «Газодинамика и теплообмен при соударении закрученных газовых струй» является законченной научно-исследовательской работой, имеет научно-техническое значение и перспективы практического использования. Работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Дорж Даваацэрэн заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
Профессор, член-корреспондент РАН,
Заместитель директора по научной работе
Института теплофизики СО РАН, Новосибирск, 630090,
пр. ак. Лаврентьева, 1, тел. (383)3309040
e-mail: dmark@itp.nsc.ru

Д.М. Маркович
(Маркович Дмитрий Маркович)

Подпись Д.М. Марковича заверяю:
Ученый секретарь Института теплофизики
СО РАН, д.ф.-м.н.



П.А. Куйбин

17 ноября 2015 г.