

О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертацию
Булысовой Людмилы Александровны
«Численное моделирование при испытаниях и наладке
малоэмиссионных камер сгорания», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы
и агрегаты**

Диссертационная работа Л.А. Булысовой посвящена разработке малоэмиссионных камер сгорания ГТУ. В работе представлены результаты компьютерного моделирования рабочих процессов в камерах сгорания, использующих для снижения вредных выбросов технологию гомогенного сжигания предварительно перемешанной топливовоздушной смеси. Полученные результаты проверены экспериментальными исследованиями на стенде ОАО «ВТИ».

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы, включающего 87 наименований и содержит 163 страницы основного текста, 126 рисунков, 33 таблицы.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.14.14 - Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

1. Актуальность темы диссертации

Одной из важнейших проблем современного газотурбостроения является разработка и создание малоэмиссионных камер сгорания. Эта проблема особенно актуальна для российских камер сгорания, поскольку на сегодняшний момент ни одна из них не удовлетворяет нормативам по выбросам оксидов азота NO_x . В последние годы в качестве малоэмиссионных камер сгорания во всем мире применяют в основном гомогенные камеры с предварительным перемешиванием топлива и воздуха. Благодаря тому, что сжигание такой предварительно подготовленной топливовоздушной смеси происходит с избытками воздуха $\alpha = 2-3$, температуры в зоне горения существенно ниже, чем при диффузионном

сжигании, что заметно снижает эмиссию термических оксидов азота. Камеры сгорания ГТУ с предварительным смешением топлива с воздухом находят широкое применение в энергетике. К их достоинствам, по сравнению с другими типами малоэмиссионных камер сгорания, относятся, в первую очередь, более низкие потери давления и отсутствие подачи в камеру специально подготовленной воды. Гомогенные малоэмиссионные камеры сгорания широко применяются в ГТУ таких известных фирм, как Сименс, Альстом, Дженерал Электрик, Мицубиси Хэви Индастриес и других. Несмотря на то, что в России разными организациями ведется большая работа по созданию современных малоэмиссионных камер сгорания, серийной камеры сгорания, удовлетворяющей действующему ГОСТ 29328-92 для стационарных энергетических ГТУ по выбросам NO_x , еще не создано.

Проблема обостряется тем, что при переходе от диффузионного к гомогенному сжиганию в камере сгорания увеличивается вероятность возникновения колебаний газовой среды, в том числе возникновение режимов вибрационного горения, которое характеризуется значительной амплитудой пульсаций. Доводка по этому параметру связана со значительными затратами, так как в настоящее время еще не разработаны надежные методы расчета и прогнозирования нестационарных процессов в камерах сгорания. Экспериментальная доводка требует уникальных мощных стендов высокого давления и сложных систем сбора и обработки данных, что удорожает и затягивает доводку установки в целом.

В этой связи диссертационная работа Булысовой Л.А., посвященная расчетным и экспериментальным исследованиям гомогенных камер сгорания, является несомненно актуальной.

2. Научная новизна основных положений диссертации

Основное достоинство работы состоит в проведении комплексных многопараметрических исследований камер сгорания в диапазоне основных параметров цикла, соответствующем современному уровню развития ГТУ. В результате выполненных автором комплекса расчетных и

экспериментальных исследований получены следующие результаты, имеющие научную новизну.

В диссертации впервые применительно к малоэмиссионным камерам сгорания показана взаимосвязь стационарных полей скоростей и температур с виброгорением. По результатам обработки экспериментальных данных предложен критерий, связывающий дивергенцию скорости течения и градиент температуры газов и позволяющий прогнозировать склонность к виброгорению.

Следует также отметить рассмотренное в работе распределение амплитуд пульсаций давления по объему жаровой трубы, что позволяет по-новому интерпретировать данные, получаемые замерах пульсаций на стенке жаровой трубы.

3. Обоснование и достоверность основных выводов и результатов диссертации

Достоверность выводов представленной диссертационной работы обосновано:

- применением в численном эксперименте современных расчетных методик и вычислительных комплексов и верификацией данных;
- использованием при проведении стендовых испытаний измерительных приборов и систем, прошедших государственную поверку;
- использованием проверенных методов обработки полученных результатов, тщательным анализом и обобщением результатов расчетных и экспериментальных исследований;
- удовлетворительным качественным и количественным совпадением расчетных и экспериментальных результатов.

4. Практическая ценность полученных результатов

Разработанный подход к моделированию процессов в камере сгорания составляет основу для проектирования и доводки устойчивости камер сгорания, что позволит повысить надежность и эффективность их работы.

Показано, что для создания предварительно перемешанных топливовоздушных смесей ввод топлива должен быть согласован с неравномерностью воздушного потока. Исследовано влияние геометрических характеристик канала (длина, пережим, угол расположения отверстий) на качество топливовоздушной смеси.

Проверена и обоснована возможность применения модели URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) простой k - ϵ модели турбулентности с умеренными компьютерными и временными возможностями для расчетов крупномасштабной турбулентности, для чего ранее использовалась LES (Large Eddy Simulation) модель, требующая больших ресурсов.

Предложен критерий в виде произведения производных по радиусу осевой скорости и температуры ($dv_x/dr * dt/dr$), который характеризует вероятность возникновения режима вибрационного горения в камере сгорания.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при создании малоэмиссионных камер сгорания ГТУ.

5. Оценка содержания диссертации, замечания по оформлению диссертации и автореферата

В целом содержание и оформление диссертации и автореферата соответствуют существующим требованиям. Основные результаты работы в полной мере отражены в публикациях автора и автореферате. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

В то же время по их оформлению имеются следующие замечания.

Список сокращений и условных обозначений следовало привести в начале диссертации перед «Введением», а не в конце. Это упростило бы работу с диссертацией.

В тексте диссертации имеются опечатки, в ряде случаев отсутствуют знаки препинания, не всегда указаны размерности, в некоторых формулах и рисунках отсутствуют условные обозначения.

6. Замечания по работе

1. Несмотря на большую экспериментальную часть в работе не приведены описание методики проведения эксперимента и оценки погрешностей измерений различных физических величин и концентраций примесей в продуктах сгорания. В этой ситуации проводить сравнение опытных и расчетных величин не вполне корректно.

2. В работе (стр. 33) для кинетической модели горения для «перемешанной до молекулярного уровня смеси топлива и окислителя» взяты константы скорости реакции из литературного источника [69] (Волков Э.П., Кукдрявцев Н.Ю. Инженерно-физический журнал, 1989, т. 56, №6, с. 885-894), в которой рассматривается моделирование образования оксидов азота в турбулентном диффузионном факеле.

3. На стр. 34 диссертации без всякого обоснования для брутто-реакции горения топлива в качестве окислителя принята смесь ($7,569 \text{ N}_2 + 2\text{O}_2$), а в качестве продуктов сгорания – смесь ($7,569 \text{ N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$). Такой выбор следовало обосновать.

4. На рис. 2.5 (стр. 46 диссертации) ошибочно указано значение безразмерного расхода воздуха на стенке $G_i/G_{\max} = 0,1$. Известно, что в пограничном слое скорость среды на стенке равна нулю, следовательно, и расход на стенке при r_i/R также равен нулю.

5. В работе ничего не говорится о том, как автор предполагает экспериментальные результаты, полученные на стенде при давлении 400 кПа, распространять на камеры сгорания с давлением среды свыше 1,5 МПа.

6. Выводы по работе носят аннотационный характер и не отражают реальные и очень значимые результаты численных и натурных экспериментов.

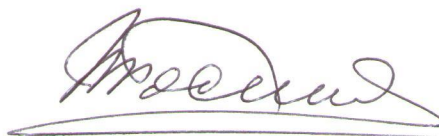
Указанные замечания, однако, не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

7. Заключение по диссертации

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация Л. А. Булысовой представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественных газотурбинных энергетических установок. Результаты диссертационной работы представляют научную ценность для фундаментального исследования нестационарных процессов в камерах сгорания ГТУ, а рассмотренные технические решения элементов конструкции камер имеют практическую значимость.

Диссертация Л.А. Булысовой соответствует требованиям пункта 8 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Булысова Л.А. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

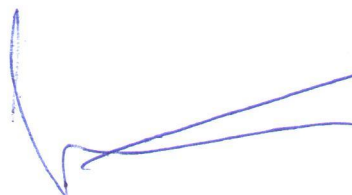
Официальный оппонент,
Зав. кафедрой ПГС НИУ «МЭИ»
докт. техн. наук профессор



П.В. Росляков

Подпись д.т.н. профессора П.В. Рослякова заверяю:

Ученый секретарь
Ученого Совета МЭИ
к.т.н. доцент



И.В. Кузовлев