

Отзыв

**на автореферат диссертации БУЛЫСОВОЙ Людмилы Александровны
«Численное моделирование при испытании и наладке камер сгорания»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты»**

Представленная на отзыв работа является своевременной и актуальной, поскольку, во-первых, ужесточение международных требований по ограничению выбросов вредных веществ, прежде всего оксидов азота, при сжигании углеводородных топлив и увеличение штрафных санкций за превышение этих ограничений привели к необходимости разработки новых низкоэмиссионных технологий сжигания топлив в камерах сгорания (КС). Использование новых низкоэмиссионных технологий сжигания топлив позволило снизить уровни выбросов оксидов азота в несколько раз по сравнению с традиционной диффузионной технологией, и довести их до значений 15-25 ppm (30 – 50 мг/м³).

Во-вторых, переход на новую низкоэмиссионную технологию сжигания топлив потребовал пересмотра основных составляющих частей рабочего процесса: схемы организации горения, системы охлаждения стенок жаровой трубы, системы регулирования режимов работы КС и газотурбинных установок (ГТУ) в целом. В настоящее время лидером среди низкоэмиссионных технологий сжигания топлива является технология горения заранее перемешанной бедной топливо-воздушной смеси (ТВС).

Для эффективной реализации горения заранее перемешанной бедной ТВС требуется высокое качество её подготовки (достижения

равномерности смешивания и заданного соотношения в ней топлива с воздухом), а также обеспечение оптимального заданного течения в зоне горения. Отклонение от требуемых параметров приводит к режимам виброгорения, разрушающего элементы камер сгорания, а также к проскокам пламени в смесители горелок, что приводит к перегреву и выгоранию элементов КС, к тяжелым авариям ГТУ. Для реализации процесса низкоэмиссионного сжигания ТВС в КС ГТУ требуется высокая точность регулирования горения на всех режимах, тщательная проработка и высокое качество исполнения конструкции КС. Все это делает малоэмиссионные камеры сгорания (МЭКС) сложными и дорогостоящими техническими изделиями.

Создание МЭКС требует реализации методов, основанных на сочетании численного моделирования и стендовых испытаний, которые взаимно дополняют друг друга, позволяя минимизировать технические риски и снижать затраты на разработку.

К сожалению, отечественная наука и промышленность приступили к разработке МЭКС позднее зарубежных фирм, что привело к отставанию в практическом опыте промышленного создания МЭКС. Таким образом, тема, относящаяся к развитию и практическому использованию методики численного моделирования при испытании и наладке МЭКС, которой посвящена диссертация, несомненно актуальна для отечественной науки и производства.

Автор справедливо подчеркивает отсутствие общих подходов к расчёту и проектированию МЭКС и, нужно добавить, некоторую разобщённость дорогостоящей стендовой доводки и натурных испытаний в составе ГТУ от математического моделирования с использованием мощных универсальных вычислительных комплексов. Необходимость

решения вопросов методического характера, таких как: правильность выбора модели, топологии и размерности расчётной сетки, размеров расчётной области и т.д., в практическом плане очевидна.

Целью представленной работы является использование трёхмерного численного моделирования на основе предварительно выбранных коммерческих программных продуктов для исследования и оптимизации основных характеристик рабочего процесса в МЭКС.

Для достижения поставленной цели автором:

1. Выполнен обзор имеющихся программных продуктов, которые можно использовать для расчёта процессов в КС, а затем выбор и оценка границ применимости методов численного моделирования.
2. Проведено исследование влияния конструктивного исполнения горелочных устройств (ГУ) на качество подготовки ТВС.
3. Проанализирована возможность использования URANS-моделирования, требующего умеренных компьютерных ресурсов при исследовании гидродинамической неустойчивости в объеме жарой трубы.
4. Предложено использование в анализе устойчивости процесса горения в КС URANS k-ε простой модели турбулентности и пульсационной модели горения.
5. Проведён анализ ряда режимных факторов (коэффициент избытка воздуха α , давление, доля пилотного газа ρ_{fr} , искусственная неравномерность на выходе из ГУ и распределение воздуха между основной и пилотной горелками) на тепловыделение по длине жаровой трубы.
6. Рассмотрена возможность численного моделирования при доводке полей температур на выходе из КС, выполненная в ходе стендовой отработки МЭКС ГТУ-6П.

Из представленных в работе результатов необходимо выделить основное:

- получены расчётные зависимости качества подготовки ТВС от конструктивных особенностей ГУ и картины тепловыделения работы КС от режимных факторов работы КС;

- показана возможность использования URANS k-ε простой модели турбулентности и пульсационной модели горения для качественного анализа устойчивости внутрикамерных процессов.

Стоит отметить неплохую сходимость полученных расчетным путем значений амплитудно-частотного спектра давления в КС с данными эксперимента. По принципам и методологии расчетов замечаний нет.

Личным вкладом автора является разработка методики численного анализа с использованием URANS-моделирования, подтверждённой экспериментальными данными. Автор является соавтором трёх патентов, относящихся к конструкции ГУ и КС.

В работе можно отметить следующие недостатки:

1. Как общий недостаток работы - отсутствие информации о практической реализации результатов.

2. При оценке угла установки лопаток завихрителя основной горелки не анализируется такой важный параметр, как перепад давления.

3. Не указаны возможные причины расхождения расчётного тепловыделения и экспериментально замеренной пульсации светимости ($\alpha=1,9$, $pfr=20\%$). Не совсем понятна причина отсутствия расчётных данных в зоне, близкой к ГУ ($0,45 < \bar{X} < 0,55$) для варианта ($\alpha=1,9$, $pfr=20\%$).

4. Ошибка (возможно, техническая) в описании результатов эксперимента с двумя разными вариантами создания эпюры поля концентрации на выходе из основной горелки. В тексте автореферата на стр. 21 написано, что забогащение топливом к стенке (вариант 2) вызывает пульсации давления в 2,3 раза большие, чем при забогащении к оси (вариант 1). В таблице на стр. 20 - всё наоборот.

5. В критерии устойчивости в одном месте фигурирует $\text{div } V$, в другом случае $\text{grad } V$.

Несмотря на указанные недостатки, представленная на отзыв работа является законченным исследованием, выполненным на должном профессиональном уровне. Работа актуальна, имеет практическую значимость. Цель работы достигнута. Автор, Булысова Людмила Александровна, заслуживает присвоения искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Технический директор, д.т.н.
ООО «Сименс Технологии газовых турбин»



А.С. Лебедев