

3. Трёмбовля В. И., Фингер Е. Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М., «Энергия», 1977. — 296 с. : ил.
4. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. — М.: Машиностроение, 1966. — 398 с.: ил.
5. Эстеркин Р.И. Эксплуатация, наладка и испытание теплотехнического оборудования промышленных предприятий: учебник для техникумов / Р.И. Эстеркин. – 2-е изд., перераб, и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 288 с.
6. Мунц В.А. Энергосбережение в энергетике и теплотехнологиях. –Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. –136 с.

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ КАМЕР ГОРЕНИЯ ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

Е.К. Савченко, Е.И. Максимова, С.А. Хаустов  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ПГС и ПГУ

В XXI веке энергетическое машиностроение невообразимо без использования компьютерных технологий. Для визуального моделирования эргономики и дизайна конструируемых агрегатов, а также функциональной оценки их аэро- и гидродинамических характеристик особенно эффективна технология виртуального прототипирования, позволяющая на этапе проектирования производить предэксплуатационный анализ работоспособности продукции с меньшими трудозатратами.

Использование этой технологии в энергетике позволяет решать широкий круг инженерных задач, таких как конструирование энергоустановок и котельного оборудования. При виртуальном прототипировании есть возможность проанализировать весь механизм работы оборудования и заглянуть внутрь технологического процесса, что зачастую не представляется возможным посредством натуральных испытаний опытных образцов. Смоделированный производственный цикл будет иметь идеальный вид и позволит конструктору глубже вникнуть в детали отображаемых процессов и механизмов, скроет нежелатель-

ные элементы (например, непрезентабельный вид оборудования или недостаток освещения).

Очевидным достоинством виртуального прототипирования является наглядная визуализация технологических процессов, которая особенно полезна при компьютерном моделировании процессов гидро- [1] и газодинамики [2, 3]. Эта технология имеет целый ряд преимуществ, т. к. она позволяет наглядно демонстрировать все элементы и процессы, которые невозможно передать на чертежах. Это более естественный способ визуализации, нежели чертеж: выражение трехмерных объектов в двухмерной плоскости не наглядно и его восприятие требует развитого пространственного воображения. Кроме того из трехмерной модели легко можно выделить чертежи каких-либо компонентов или конструкции целиком.

Виртуальное прототипирование ведет к сокращению длительности технической подготовки серийного производства энергоустановок, а, следовательно, и к снижению себестоимости продукции.

В Томском политехническом университете разработан прикладной программный продукт (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012614067) для моделирования факельного сжигания газа в жаровых трубах котлов. Разработанный программный продукт является гибридной CAE/CAD-системой и позволяет в процессе конструирования производить оценку эффективности и экономичности возможных инженерных решений.

Реализованная в программном продукте квазиодномерная методика и алгоритм инженерного расчета теплообмена при вихревом сжигании в жаровых трубах котлов приведена в [4]. Оценка габаритов пламени, алгоритм которой подробно описан в работах [3, 5], производится на базе основного уравнения теории Я. Б. Зельдовича и Д. А. Франк-Каменецкого и строится на основании зависимости скорости распространения пламени от температуры в ядре горения. В [5] показано и проанализировано влияние на последнюю тепловосприимчивости экранирующих камер сгорания поверхностей нагрева.

На основе численного исследования камер горения жаровых труб котлов [1 – 3, 5] можно сформулировать следующие задачи оптимизации:

- в пределах объема топki должно обеспечиваться наиболее полное сгорание топлива;
- габариты факела должны исключать его наброс на экранирующие камеру горения поверхности нагрева во избежание недожога и оседания сажи на стенках топki;

- камера горения должна обладать высоким удельным тепловосприятием при минимальном аэродинамическом сопротивлении.

Были проанализированы существующие конструкции жаровых труб водогрейных котлов при сжигании чистого метана (табл.). На основе анализа заключено, что аэродинамика реверсивного факела способствует вихревому горению топлива при минимальном аэродинамическом сопротивлении. В свою очередь, удельное тепловосприятие жаровой трубы при реверсивной организации сжигания будет максимально при прямоточной подаче топлива, так как при этом ядро горения находится на максимальном удалении от выходного сегмента. Кроме того, по результатам численного эксперимента согласно математической модели, приведенной в [2], установлено, что при реверсивной организации сжигания с прямоточной подачей топлива создаются наиболее благоприятные условия для устойчивого горения и равномерного распределения тепловых потоков при минимальном аэродинамическом сопротивлении. Равномерное распределение тепловых потоков, в свою очередь, благоприятствует надежной работе котла по условиям накипеобразования и допускают эксплуатацию котла при меньших затратах на водоподготовку [1]. Задействованная мощность горелочного устройства при реверсивной организации сжигания может меняться в широком диапазоне без существенного изменения габаритов факела [5], что делает её удобным параметром оптимизации, а также позволяет расширить потенциальный диапазон регулирования нагрузки.

Табл. 1. Анализ конструкции камер горения водогрейных котлов

Конструктивные параметры камеры горения		Режимные характеристики топчного устройства при оптимальной организации сжигания				
Длина цилиндрической части жаровой трубы, мм	Внутр. диаметр жаровой трубы, мм	Диапазон тепловой мощности, кВт $Q_{min}..Q_{max}$	Удельное тепловосприятие жаровой трубы, МДж/м <sup>3</sup>		Аэродинамическое сопротивление топчного устройства, Па	
			при $Q_{min}$	при $Q_{max}$	при $Q_{min}$	при $Q_{max}$
1300	584	150..500	19,7	12,1	4,5	50,4
1550	884	300..350	19,7	12,4	18,2	182
1900	980	400..1200	19,9	12,9	32,3	290

Разработан программный продукт для виртуального прототипирования, позволяющий на этапе проектирования расчётным методом и

визуально оценить поведение котельного оборудования и энергоустановок в реальных условиях эксплуатации, а также произвести предэксплуатационную проверку работоспособности их основных узлов и агрегатов с меньшими трудозатратами.

Функционал разработанного программного продукта позволяет проектировщику в реальном времени прорабатывать различные агрегаты энергоустановок, проектировать их внешний вид, производить оптимизацию конструктивных элементов на основе математических расчетов.

На основе полученных результатов анализа конструкций существующих жаротрубных котлов российского производства можно дать оценку их экономичности и эффективности, а также выработать предложения по модернизации с целью повышения энергоэффективности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания НИР (тема 13.948.2014/К).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Хаустов С. А., Хаустов П. А., Максимова Е. И. Компьютерное моделирование гидродинамики жаротрубного котла с использованием конечно-элементного анализа [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2014 - №. 6. - С. 1-6. - Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/6/1519.pdf>
2. Хаустов С. А., Заворин А. С. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 5-9
3. Хаустов С. А., Заворин А. С. Численное исследование аэродинамики топочной среды в жаротрубном котле типа "Турботерм" // Промышленная энергетика. - 2014 - №. 1. - С. 11-14
4. Khaustov S. A., Zavorin A. S., Buvakov K. V., Zakharushkin N. A. Engineering method for thermal calculation of the vortex combustion in dead-end fire-tubes // MATEC Web of Conferences . - 2014 - Vol. 19. - Article number 01020.
5. Хаустов С. А., Заворин А. С. Дальнобойность факела в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. - 2014 - №. 10. - С. 16-20

Научный руководитель: С.А. Хаустов, ассистент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.