

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ ГОРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Максимова Е.И., Хаустов С.А.

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: khaustovsa@tpu.ru*

В работе приводится описание разработанного авторами программного продукта для виртуального прототипирования, позволяющего 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. Разработанный программный продукт является гибридной CAE/CAD-системой и позволяет в процессе конструирования производить оценку эффективности и экономичности возможных инженерных решений. С применением разработанного программного продукта были проанализированы существующие конструкции жаровых труб водогрейных котлов при сжигании чистого метана. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при разработке предложений по возможной модернизации рассмотренных конструктивных схем жаротрубных котлов, а также при конструировании новых котельных агрегатов.

Ключевые слова: теплоэнергетика, отопительные системы, жаротрубный котел, прототипирование, визуальное моделирование, жаровые трубы водогрейных котлов.

## ANALYSING THE COMBUSTION CHAMBER LAYOUT USING VIRTUAL PROTOTYPING AND VISUAL SIMULATION

Maksimova Y.I., Khaustov S.A.

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: khaustovsa@tpu.ru*

The paper describes the software developed by authors for virtual prototyping. The software allows to estimate boiler operation by visual and math tools in real conditions of operation on design stage. Moreover it performs pre-operational checks of efficiency of the main units and equipment with minimum effort. The designed software is hybrid CAE/CAD system and allows estimation of possible engineering solutions efficiency in the design process. Functionality of the developed software allows the designer to work out the different units of power plants in real time, to design its appearance, and, also, to make optimizations of structural elements based on mathematical calculations. With the use of the designed software existing layouts of water-heater fire tubes for burning methane were analyzed. The results of performed analysis can be used for modernization suggestions of the considered fire-tube boilers, as well as for new boiler units design.

Keywords: thermal engineering, decentralized heating, fire-tube boiler, prototyping, visual simulation, water-heater fire tubes.

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.

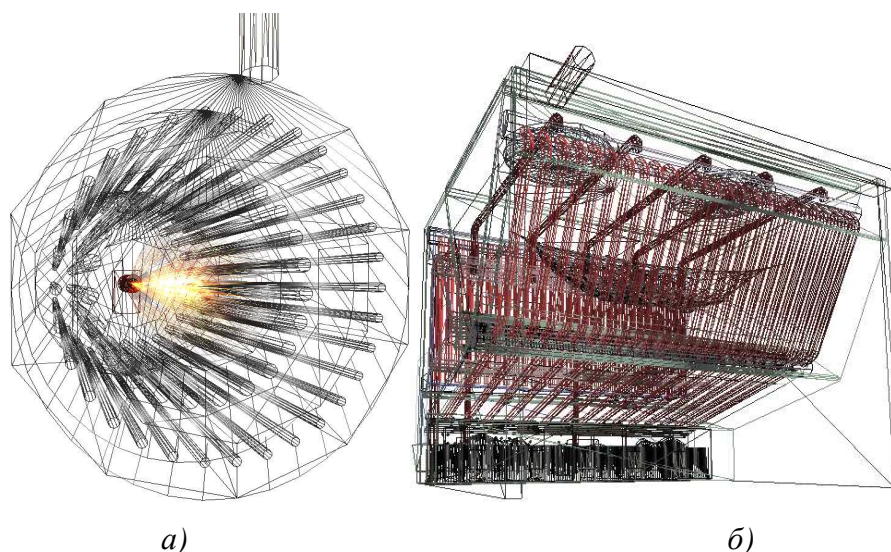
Использование этой технологии в энергетике позволяет решать широкий круг инженерных задач, таких как конструирование энергоустановок [1; 2] и котельного оборудования [4]. При виртуальном прототипировании есть возможность проанализировать весь механизм работы оборудования и заглянуть внутрь технологического 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 нежелательные 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- [5] и газодинамики [6; 7]. 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 двумерной 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.

**Инструмент исследования.** 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 (рис. 1а) [8] и технологических процессов переработки низкосортного топлива в промышленных установках (рис. 1б) [3]. Разработанный программный продукт является гибридной CAE/CAD-системой и позволяет в процессе конструирования производить оценку эффективности и экономичности возможных инженерных решений.



*Рис. 1. Визуальное моделирование с использованием разработанной программы:*

а) визуальное моделирование факельного сжигания газа в жаровой трубе котла; б) визуальное моделирование технологических процессов переработки низкосортного топлива в промышленных установках

Интегрированный графический редактор (рис. 2) позволяет создавать геометрические объекты любой сложности и изменять параметры их отображения.

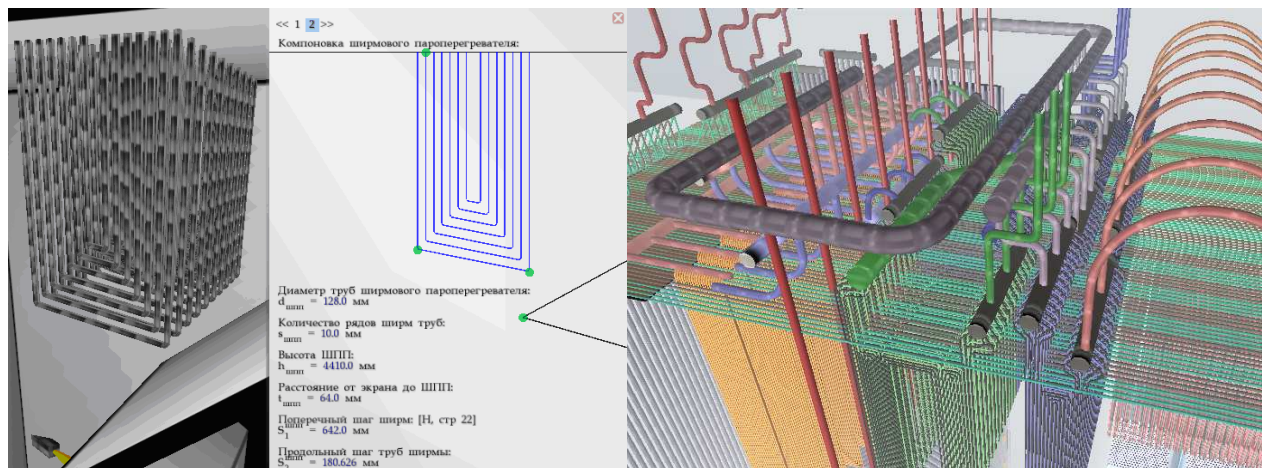


Рис. 2. Графический интерфейс встроенного редактора

Гибридное моделирование, реализованное в редакторе, позволяет сочетать каркасную, поверхностную и твердотельную геометрию, а также использовать комбинации жесткоразмерного (с явным заданием геометрии) и параметрического типов моделирования. Кроме того, предусмотрен ряд готовых решений для автоматизированного инженерного расчёта и параметрического конструирования стандартных поверхностей нагрева теплообменных аппаратов: змеевики пароперегревателей, пластины теплообменников, раздающие и собирающие коллектора, а также труб произвольного сечения и формы. Система интеллектуального трехмерного рисования редактора позволяет пользователю непосредственно во время презентации наносить произвольную графическую информацию на любую поверхность отображаемой сцены. Использование этой системы значительно упрощает процессы задания граничных условий, геометрических характеристик и сложных траекторий, а также облегчает восприятие физического смысла описываемых явлений и процессов.

**Методы и задачи исследования.** Инструментом исследования являлся разработанный программный продукт для виртуального прототипирования. Задача исследования – решение инженерных задач оптимизации конструкции энергоустановок и объектов малой энергетики: расчёта, анализа и компьютерной симуляции физических и технологических процессов на базе инструмента исследования и реализованных в нем квазиодномерных методов расчета.

Реализованная в программном продукте квазиодномерная методика и алгоритм инженерного расчета теплообмена при вихревом сжигании в жаровых трубах котлов

приведена в [9]. Оценка габаритов пламени, алгоритм которой подробно описан в работах [7; 8], 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 [8] показано и проанализировано влияние на последнюю тепловосприятости экранирующих камеру сгорания поверхностей нагрева.

На основе численного исследования камер горения жаровых труб котлов [5–8] можно сформулировать следующие задачи оптимизации:

- в пределах объема топки 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 топки;
- камера горения должна обладать высоким удельным тепловосприятием при минимальном аэродинамическом сопротивлении.

**Результаты.** Были проанализированы существующие конструкции жаровых труб водогрейных котлов при сжигании чистого метана (табл. 1). 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 [6], 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 допускает эксплуатацию котла при меньших затратах на водоподготовку [5]. Задействованная мощность горелочного устройства при реверсивной организации сжигания может меняться в широком диапазоне без существенного изменения габаритов факела [8], что делает её удобным параметром оптимизации, а также позволяет расширить потенциальный диапазон регулирования нагрузки.

**Таблица 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<br>$Q_{min}..Q_{max}$                            | 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           |

**Заключение.** 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.

**Список литературы**

1. Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Когенерационная энергоустановка с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 4. – С. 54–61.

2. Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б. Малая распределенная энергетика России: совместная выработка тепло- и электроэнергии // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4. – С. 13-18.
3. Табакаев Р.Б., Заворин А.С., Казаков А.В., Черемисин И.Г. Теплотехнология переработки низкосортного топлива в высококалорийные топливные брикеты // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 6. – С. 29–33.
4. Хаустов С.А., Заворин А.С. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. – 2014 – №. 2 (12). – С. 21-28. – Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/988>.
5. 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>.
6. 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.
7. Хаустов С.А., Заворин А.С. Численное исследование аэродинамики топочной среды в жаротрубном котле типа «Турботерм» // Промышленная энергетика. – 2014. – №. 1. – С. 11-14.
8. Хаустов С.А., Заворин А.С. Дальнобойкость факела в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. – 2014. – №. 10. – С. 16-20.
9. 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.

#### **Рецензенты:**

Субботин А.Н., д.ф.-м.н., профессор каф. парогенераторостороения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Спицын В.Г., д.т.н., профессор каф. вычислительной техники Института кибернетики ФГАОУ ВО «НИ ТПУ», г. Томск.