

УДК 621.181.001.24

В.С. Беднаржевский, Г.Б. Добротина,  
И.В. Левкин., С.Ю. Поздеев, А.А. Романов

**Применение информационных технологий  
при компьютерном моделировании паровых котлов**

В условиях конкуренции с западными фирмами возрастают требования к качеству продукции, в том числе к выполнению расчетных и чертежных работ. Компьютерное моделирование является одним из наиболее быстро развивающихся направлений научно-технического прогресса, современные темпы которого обуславливают необходимость повышения качества и сокращения продолжительности проектирования новых видов продукции.

Моделирование энергетических котлов относится к классу сложных задач ввиду их единичного производства и, как следствие, при алгоритмизации такого вида задач возникают определенные трудности. Эта проблема может быть решена на основе широкого использования средств вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования (САПР). Программные средства (см. табл.) должны соответствовать нормативным документам [1–7]. На рисунке 1 изображена структурная схема информационных потоков при проектировании котлоагрегата (номер вида расчета соответствует номеру расчета в таблице) [8].

Конструирование начинается с эскизного проекта, где с помощью конструктивного теплового расчета определяются основные конструктивные характеристики поверхностей нагрева. На стадии технического проекта выполняются остальные расчеты. При рабочем проектировании осуществляется детальная проработка всех узлов и выпускаются рабочие чертежи. Исходными данными для проекта котлоагрегата являются паропроизводительность, вид топлива, температура и давление перегретого пара, температура питательной воды, уходящих газов и воздуха. В результате конструктивного теплового расчета получаем конструктивные характеристики поверхностей нагрева, расположение и диаметр труб.

На основании данных конструктивного теплового расчета проводят поверочный тепловой расчет, в результате получают значения средних скоростей и температуры потока. Также проверяется работа котла при изменении топлива, нагрузки и т.д. Разработано программное обеспечение для графического диалога с тепловым расчетом котлоагрегата. Работа на-

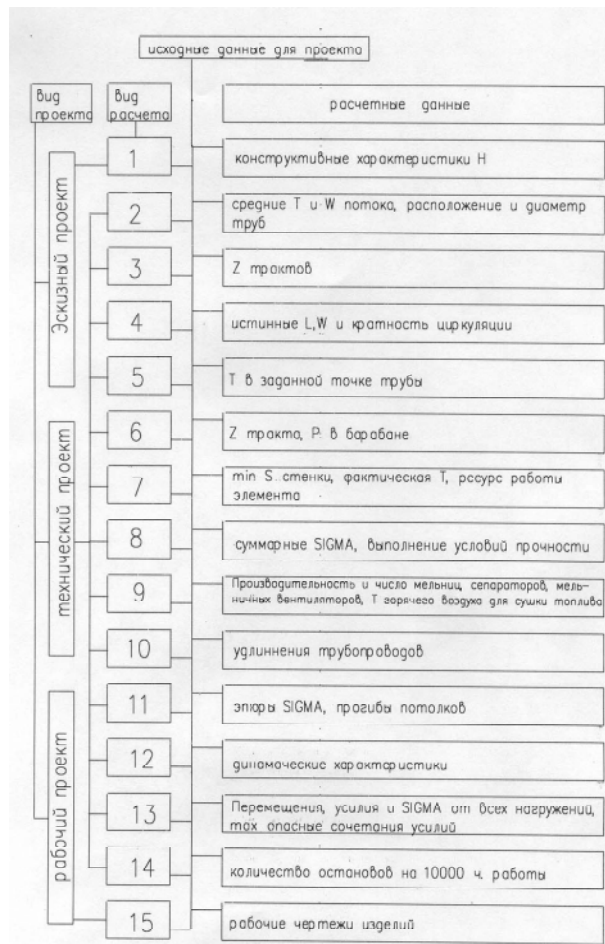


Рис. 1. Структурная схема информационных потоков: T – температура; w – скорость; L – расход; Н – поверхность нагрева; s – толщина стенки; z – сопротивление; p – давление; SIGMA – напряжение

чинается с формирования расчетной схемы котла. С дисплея вводится число ступеней ширмового и конвективного пароперегревателей. В результате теплового расчета на графический дисплей выводятся пароводяная и газозоудшная схемы с результатами расчета. На пароводяной схеме до и после каждого участка на дисплей выводится температура рабочей среды, на газозоудшной схеме на выходе из топки, а также до и после каждой поверхности нагрева – температура топочных газов. На рисунке 2 [9] показаны результаты расче-

Перечень расчетов, применяемых при автоматизированном проектировании котлоагрегатов

Номер расчета	Тип расчета
1	Конструктивный тепловой
2	Поверочный тепловой
3	Аэродинамический
4	Гидравлический
5	Расчет температуры металла стенки трубы
6	Расчет перепада давления по паровому тракту
7	Расчет на прочность элементов котла
8	Расчет на прочность цельносварных экранов
9	Расчет системы пылеприготовления
10	Расчет на самокомпенсацию трубопроводов
11	Расчет на прочность цельносварных газоплотных потолков
12	Расчет динамических характеристик
13	Расчет каркаса котла
14	Расчет надежности работы поверхностей нагрева
15	Автоматизированное проектирование коллекторов, труб
16	Графика на AutoCAD'e

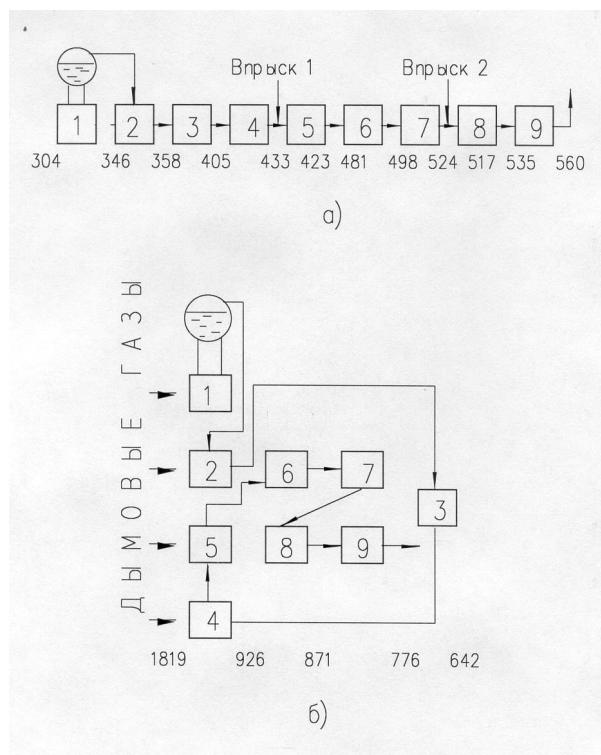


Рис. 2. Результаты теплового расчета котла БКЗ 420-140-9, выведенные на графопостроитель: схемы парового (а) и газоздушного (б) трактов; 1-9 – расчетные участки

та котла БКЗ 420-140-9, выведенные на графопостроитель.

Входной информацией для аэродинамического расчета являются значения средних температур и скорости потока, расположение и диаметр труб. На выходе получаем сумму сопротивлений трактов, по которой выбираются дымососы и вентиляторы. Исходной информацией для гидравлического расчета являются конструктивные характеристики, другие данные теплового расчета. В результате получаем истинный расход, действительную скорость, кратность циркуляции, осуществляется проверка на опрокидываемость.

При расчете температуры металла стенки трубы на основании температуры пара и конструктивных характеристик получаем температуру в заданной точке трубы, по которой подбирается металл пароперегревателя. Перепад давления по паровому тракту рассчитывается по конструктивным характеристикам труб и скоростям пара (на входе), на выходе получаем суммарное сопротивление тракта и давление в барабане.

Расчет на прочность элементов котла (коллекторов, труб, переходов, днищ и др.) ведется по методу предельных нагрузок [10]. Ис-

ходной информацией являются внутренний диаметр и давление в сосуде, допустимое напряжение, коэффициент прочности, учитывающий наличие отверстий, сварных швов и т.д. Результаты расчета: толщина стенки сосуда, выполнение условий прочности, фактическая температура, которую выдерживает элемент данной марки стали, фактический ресурс работы элемента.

При расчете на прочность цельносварных экранов задаются конструктивные характеристики, тепловой поток, коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, температура среды. Проводится расчет напряжений от теплового потока, от хлопка в топке, от внутреннего давления, от весовых нагрузок. Определяются суммарные напряжения и сравниваются с допустимыми.

При расчете системы пылеприготовления необходимо знать количество, вид и характеристики топлива. В результате получим производительность и число мельниц, сепараторов, мельничных вентиляторов, температуру горячего воздуха для сушки топлива. При расчете на самокомпенсацию трубопроводов необходимы конструктивные характеристики и данные теплового расчета, выходные данные – уд-

линии трубопроводов. При расчете на прочность цельносварных газоплотных потолков следует иметь схему нагрузок и конструктивные данные, в результате получим эпюры напряжений и прогибы потолков.

Исходные данные для расчета динамических характеристик получают на основании расчетов циркуляции, теплового режима, температуры металла стенки пароперегревателя, перепада давления по паровому тракту. Составляется математическая модель котла как объекта регулирования. Полученную систему уравнений решают совместно. В результате получают зависимости давления, температуры, расхода во времени при различных возмущающих воздействиях (изменение расхода подачи топлива, воздуха, температуры впрыска и т.д.).

Расчет каркаса котла осуществляется методом конечных элементов: каркас разбивается на отдельные элементы, а затем напряженно-деформированные состояния этих элементов сопрягаются между собой так, чтобы удовлетворялись условия совместимости деформаций и равновесия. Для каждого элемента задаются площадь, момент сопротивления поперечного сечения, момент инерции, нагрузка. Осуществляется расчет на устойчивость и прочность балок каркаса. Результаты расчета – характеристики напряженно-деформированного состояния системы и схемы загрузений, выведенные на графопостроитель.

При расчете надежности работы поверхностей нагрева определяют параметр потока отказов по каждой поверхности, а также характеристики потока вынужденных остановов на 100 000 ч работы. Входной информацией является количество прямых участков, сгибов труб, контактных сварных стыков, бесштуцерной приварки змеевиков к камерам.

Необходимо отметить, что расчеты на стадии эскизного и технического проектов выполняются по несколько десятков раз. Тепловой расчет одного котла на заводе выполняется до 100 раз. Однако основное время конструктора (до 90%) тратится на изготовление рабочих чертежей. Для полностью автоматического выпуска чертежей используют AutoLISP-системы, функционирующие непосредственно в среде AutoCAD. Высокий уровень автоматизации удается обеспечить путем специализации системы на определенный тип изделия, такой, например, как коллекторы котлоагрегата. Предварительно необходимо провести параметризацию [11] коллекторов; т.е. дать такое представление их, которое позволяет авто-

матически получать рабочий чертеж путем задания параметров (длины, диаметра, толщины стенки, количества отверстий в ряду и штуцеров, размеров). Многие задачи имеют по несколько решений и существует множество экземпляров чертежа конкретного коллектора.

Один и тот же коллектор можно построить различными способами. На первом этапе параметризации необходимо выбрать экземпляр чертежа-образца. Принцип выбора должен удовлетворять ряду свойств. Пусть по чертежу  $E^0$ , который будет использоваться в качестве образца параметризованного чертежа и которому соответствуют значения размеров построена модель

$$\bar{r}^0 = (r_1^0, \dots, r_n^0), \quad MP = \{E^0, G, R\},$$

состоящая из трех множеств:  $E$  – геометрические элементы,  $G$  – геометрические отношения и  $R$  – размерные отношения. Для любого набора значений процедура выбора должна определять из конечного множества экземпляров, удовлетворяющих модели  $MP$ , единственный экземпляр  $E^1$ , о котором будем говорить, что он похож на образец  $E^0$ , либо сообщать, что похожего экземпляра нет. Процедура выбора задает на множестве экземпляров, удовлетворяющих модели  $MP$ , бинарное отношение «похож», обозначаемое далее  $\approx$ . Пользователю было бы очень трудно работать в системе параметризации, в которой принцип выбора не удовлетворял бы следующим свойствам.

Свойство 1 (рефлексивность):

$$E \approx E$$

Выбор для значений размеров, совпадающих со значениями размеров образца  $E$ , должен дать сам образец  $E$ .

Свойство 2 (симметричность):

$$E^0 \approx E^1 \Rightarrow E^1 \approx E^0.$$

Если при использовании образца  $E^0$  с размерами среди экземпляров с размерами выбран экземпляр  $E^1$ , то при использовании образца  $E^1$  среди экземпляров с размерами должен быть выбран  $E^0$ .

Свойство 3 (транзитивность):

$$E^0 \approx E^1, E^1 \approx E^2 \Rightarrow E^0 \approx E^2.$$

Свойство 4 (однозначность):

$$E^1 \approx E^2, (E^1) = (E^2) \Rightarrow E^1 \Rightarrow E^2.$$

Здесь  $(E)$  обозначает вектор значения размеров для экземпляра  $E$ . Это свойство делает однозначным выбор при одинаковых значениях размеров. В частности, этим обеспечивается то, что, начиная с двух различных, но похожих образцов, при любых одинаковых значениях размеров мы получим один и тот

же экземпляра.

Свойство 5 (непрерывность). Образец и выбранный экземпляр должны отличаться друг от друга незначительно при близких значениях размеров.

На чертеж-образец коллектора котлоагрегата накладываются ограничения: до трех рядов отверстий; до трех штуцеров; длина коллектора не больше 4500 мм. Торцы могут быть: доньшко-доньшко; доньшко-доньшко со штуцером; доньшко-открытый торец с (без) кольцом для гидроиспытаний; доньшко-торец, обработанный под приварку доньшка; оба торца открыты, открытый торец-торец, обработанный под приварку доньшка; торец, обработанный для гидроиспытаний, – все вышеперечисленные комбинации. Разработан пакет программ, состоящий из 300 подпрограмм, по-

зволяющий чертить коллектор с тремя рядами отверстий, тремя штуцерами, двумя транспортировочными ушками. На чертеже могут быть нанесены виды: край коллектора с (без) кольцом для гидроиспытаний, край штуцера с узлом приварки кольца для гидроиспытаний, узел сварного шва доньшко-коллектор и др. Также вычерчиваются сечения и размеры коллектора, показывающие углы расположения рядов отверстий и штуцеров. На один котел класса БКЗ 420-140 идет 300... 500 камер.

Разработанная программа позволяет спроектировать 95% всех выпускаемых коллекторов. Развитый интерфейс между AutoCAK-AutoLISP позволяет конструктору вносить изменения в чертеж, полученный по программе. Нестандартные коллекторы, которые не охватываются чертежом-образцом, выполняются средствами AutoCAK.

## Литература

1. Тепловой расчет котлов: Нормативный метод. СПб., 1998.
2. Гидравлический расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. М., 1978.
3. Аэродинамический расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. Л., 1977.
4. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. Л., 1971.
5. ОСТ 108.031.08-85; ОСТ 108.031.10-85. Котлы стационарные и трубопроводы пара и горячей воды: Нормы расчета на прочность. Л., 1987.
6. РТМ 108.031.107-78. Котлы стационарные паровые и водогрейные: Расчеты на прочность цельно-сварных газоплотных конструкций. Л., 1985.
7. РТМ 108.031.101-84. Котлы барабанные: Расчет динамических характеристик. Л., 1986.
8. Беднаржевский В.С., Оскорбин Н.М. Автоматизированное проектирование энергетических паровых котлов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2002. №1-2.
9. Беднаржевский В.С. Графический вывод результатов теплового расчета котлоагрегата на автоматизированном рабочем месте конструктора // Экспресс-информ. М., 1991. Сер. 13-1. Вып. 3.
10. Беднаржевский В.С., Теренина Л.В. Комплекс программ для расчета на прочность элементов теплоэнергетических установок // Информ. сб. М., 1989. Сер. 9. Вып. 15.
11. Коваленко В.Н., Ревякин Ю.Г., Хухлаев Е.В. Параметризация машиностроительных чертежей, основанная на поэлементном расчете // Программирование. 1992. №2.