

Н.М. Оскорбин, В.С. Беднаржевский

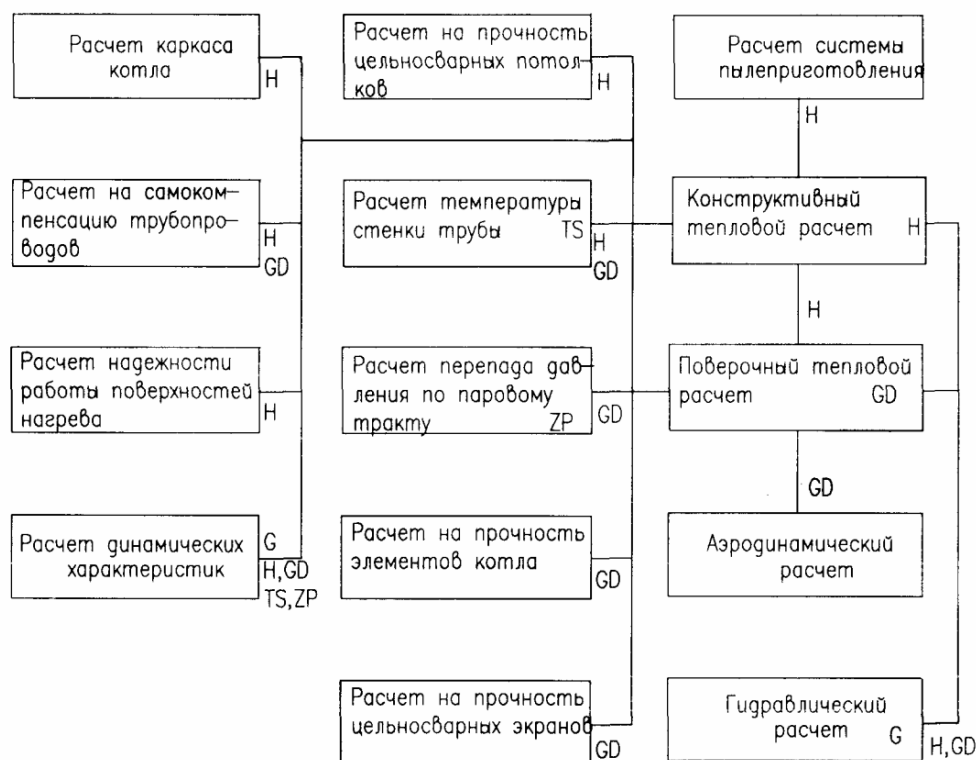
**Разработка пакетов и комплексов программ в теплоэнергетике**

Энергетические котлоагрегаты – класс сложных теплоэнергетических установок, функционирующих в статических и динамических режимах, состоящих из большого количества разнотипных и повторяющихся элементов, объединенных технологическими связями, отражающими движение материальных и энергетических потоков между элементами. В настоящее время существует множество САЕ-систем (САЕ – Computer Aided Engineering – компьютерная помощь в инженерных расчетах) для моделирования и проектирования теплоэнергетического оборудования [1]. Казалось бы, при таком обилии современных средств не нужно разрабатывать собственные пакеты, все можно выбрать из предлагаемых как зарубежных, так и отечественных. Однако САЕ-системы не обеспечивают моделирования и проектирования современных котлоагрегатов в соответствии с нормативными требованиями [2–8], хотя и охватывают такие области, как прочность, теплофизика, электромагнетизм, вычислительная

гидрогазодинамика, акустика, динамика и кинематика и др. (например, фирмы CAD-FEM GmbH, пакет ANSYS, сертификация ISO 9001, [www.cadfem.ru](http://www.cadfem.ru)).

Информационное обеспечение компьютерного моделирования паровых котлов включает в себя комплекс [9–12], состоящий из семи пакетов прикладных программ (ППП) для проектирования котлоагрегата в режиме диалога: «тепловой расчет котлоагрегата»; «расчет температуры металла стенки трубы»; «расчет на прочность цельносварных газоплотных конструкций»; «аэродинамический расчет котлоагрегата»; «расчет теплофизических свойств теплоносителей»; «гидравлический расчет пароперегревателя»; «расчет надежности работы котлоагрегата». Взаимосвязь всех расчетов, применяемых в проектировании котлоагрегатов, и потоки информации между ними приведены на рисунке.

Методика проектирования современного котлоагрегата предполагает выполнение мно-



Взаимосвязь расчетов при проектировании котлоагрегатов

говариантных расчетов для выявления оптимальных характеристик агрегатов. Ключевое место здесь занимает тепловой расчет.

На котлостроительных заводах, в научно-исследовательских и проектных организациях существует большой опыт создания теплового расчета для ЭВМ [13–18]. Созданные программы имеют различное функциональное применение: конструктивно-поверочный, конструктивный, поверочный тепловой расчет котлоагрегата. По режимам «диалога» – пакетный, графический, диалог.

Таганрогский завод «Красный котельщик» разработал собственную версию [14]. Алгоритм позволяет рассчитывать котлы практически любого типа с различной компоновкой поверхностей нагрева. Увязка поверхностей нагрева производится по энтальпиям рабочей среды.

На ЗИО (котельный завод им. Орджоникидзе) создан свой алгоритм [15]. Программа позволяет рассчитывать барабанные и прямоточные котлы. Автоматически подбирается величина регулирующего параметра. Обе версии в основе алгоритма имеют прямое решение уравнения  $Q_t = Q_6$  итерационным путем. При этом температурный напор  $\Delta t$  участвует в явном виде, а коэффициент теплопередачи рассчитывается по фактическим температурам дымовых газов и рабочей среды.

В ЦНИИКА реализован алгоритм [16], который имеет трехуровневую структуру с горизонтальными и вертикальными связями. Задачей нижнего уровня является расчет отдельно взятых теплообменников и топки – осуществление увязки параметров рабочих сред на стыке смежных теплообменников по всем трактам. На верхнем уровне обеспечивается стабилизация значений параметров рабочих сред на выходе из котла или в заданных реперных точках трактов путем подбора воздействий в управляющих контурах.

Дальнейшее развитие алгоритм [16] получил в НПО ЦКТИ [17]. Новая версия позволяет выполнять расчеты котлов нетрадиционных конструкций – с вихревой топкой и ширмо-конвективными поверхностями нагрева в конвективной шахте, а также высоконапорных котлов с форсированной топкой и конвективными пакетами. Последние версии пакета обеспечивают выполнение одновременно до десяти вариантов расчетов, отличающихся друг от друга нагрузкой и конструктивными характеристиками. При этом программно формируется значительное число параметров, которые в ранних версиях пакета нужно было задавать в исходных данных. В результате на треть удалось сократить объем исходной информации.

В НПО ЦКТИ также создана версия для расчета котлов-утилизаторов, энерготехнологических, водогрейных и промышленных котлов [18].

При проектировании котлоагрегат последовательно проходит стадии эскизного, технического и рабочего проектов. На каждой стадии удобнее применять определенные режимы и алгоритмы расчета. Например, на стадии эскизного проекта рекомендуется применять конструктивный расчет в режиме «диалога», на стадии технического проекта удобнее использовать конструктивно-поверочный расчет в «графическом диалоге», на стадии рабочего проектирования, когда основные расчетные решения приняты, лучше вести поверочный расчет в «пакетном» режиме для документирования принятых решений. Особо хочется отметить автоматический режим, после запуска программы он не требует вмешательства человека, алгоритм однозначно оптимизирует результаты расчета [19].

**Оптимизация проектирования и моделирования энергетических котлоагрегатов.** Повышение производительности труда при проектировании котлоагрегатов диктует внедрение вычислительной техники. Проектирование котлов на котлостроительных заводах почти полностью происходит при помощи ЭВМ, в классическом понимании оно включает в себя технические средства, системное программное обеспечение (ПО), прикладное (пользовательское) ПО, работу самого конструктора.

Под оптимизацией проектирования котлоагрегатов подразумевается сокращение цикла конструирования котла по всем четырем составляющим: замена оборудования на более производительное, обновление системного ПО, разработка и оптимизация прикладного ПО, обучение пользователей ЭВМ.

Оптимизация по техническим средствам идет по пути использования персональных ЭВМ.

Применяются системное ПО и языки программирования: AutoCAD, NCAD, Glisp, ABASE, PASCAL, C, FORTRAN-77, AutoLISP и др. Необходимо обучение конструктора как пользователя IBM PC, ознакомление с диалогом ЭВМ-пользователь в графической системе AutoCAD.

Постановка задачи оптимизации автоматизированного проектирования сводится к задаче нахождения  $(n + k + m)$  переменных  $t$ , минимизирующих данную целевую функцию:

$$T = T_1 \left\{ \sum_{i=1}^n t_i \right\} + T_2 \left\{ \sum_{j=1}^k t_j \right\} + T_3 \left\{ \sum_{l=1}^m t_l \right\}, \quad (1)$$

где  $T$  – время цикла проектирования котла;

$T_1$  – функции времени построения и решения динамической математической модели;  $T_2$  – функции времени выполнения расчетных работ;  $T_3$  – функции времени выполнения чертежных работ;  $t_i, t_j, t_l$  – время соответственно построения и решения уравнений в динамической математической модели котла, выполнения вида стационарного расчета на ЭВМ, вычерчивания рабочего чертежа со спецификацией;  $n, k, m$  – количество соответственно уравнений в динамической математической модели котла, видов стационарного расчета котла, рабочих чертежей. Чаще всего оптимальное решение единственно, однако возможны случаи, когда оптимальных решений несколько десятков.

Рассмотрим последовательно функции  $T_1, T_2, T_3$  и ограничения, накладываемые на них.

Прикладное ПО является одним из самых трудоемких в цепочке задач проектирования и моделирования. Проектирование котлоагрегатов можно представить как определенную последовательность функционирования программных модулей. Одни программы функционируют на стадии эскизного проекта, другие – на стадии технического и рабочего проектов. Каждый расчет представлен как функция определенных значений:

- конструктивный тепловой  $H = f(P)$ ;
- поверочный тепловой  $GD = f(H)$ ;
- аэродинамический  $Z = f(GD)$ ;
- гидравлический  $G = f(H, TT)$ ;
- температуры стенки трубы  $TS = (TP, K)$ ;
- перепада давления по паровому тракту  $ZP = f(K, W)$ ;
- элементов котла на прочность  $SM = f(K, TT, SI)$ ;
- цельносварных экранов на прочность  $SIG = f(K, TT)$ ;
- системы пылеприготовления  $TN = f(NT)$ ;
- цельносварных газоплотных потолков на прочность  $DL = f(K, Q)$ ;
- каркаса котла  $UP = f(PR)$ ;
- трубопроводов на самокомпенсацию  $L = f(K, TT)$ ;
- надежности работы поверхностей нагрева  $WW = f(NS)$ .

В уравнениях приняты следующие условные обозначения:  $H$  – конструктивные характеристики поверхностей нагрева;  $P$  – исходные данные для проекта котлоагрегата (паропроизводительность, вид топлива, температура и давление перегретого пара, температура питательной воды, уходящих газов и воздуха);  $GD$  – характеристики потока газов и диаметры труб;  $Z$  – сопротивление газоздушных трактов;  $G$  – характеристики потока пароводяной смеси (истинный расход, действи-

тельная скорость, кратность циркуляции);  $TT$  – теплотехнические данные теплового расчета;  $TS$  – температура стенки трубы;  $TP$  – температура пара;  $K$  – конструктивные характеристики трубы (диаметр, толщина стенки);  $ZP$  – сопротивление тракта и давление среды;  $W$  – скорость пара;  $SM$  – минимальная толщина стенки трубы;  $SI$  – допустимые напряжения;  $SIG$  – суммарные напряжения;  $TN$  – температура горячего воздуха и производительность мельниц, сепараторов и т.д.;  $NT$  – вид и количество топлива;  $DL$  – прогибы потолков и эпюры напряжений;  $Q$  – нагрузки;  $UP$  – устойчивость и прочность балок каркаса;  $PR$  – прочностные характеристики элементов (площадь, момент сопротивления поперечного сечения, момент инерции, нагрузка);  $WW$  – параметр потока вынужденных остановов;  $NS$  – количество стыков, прямых участков сварных труб;  $L$  – удлинения трубопроводов.

Из формул видно, что результаты одних функций являются аргументами для других функций. Нетрудно проследить информационные потоки при функционировании расчетов. В нашем случае текущие оптимальные значения функций заранее неизвестны, известны лишь данные для проекта котлоагрегата  $P$ . Каждый расчет в зависимости от функциональных задач выполняется в пакетном режиме, режиме диалога, графического диалога, автоматическом режиме и их комбинаций. Если построить целевые функции режимов, то минимальное значение они будут принимать для графического диалога и автоматического режима. Время выполнения вида стационарного расчета, вне зависимости от режима, можно охарактеризовать длительностью и частотой. В пакетном режиме частота выполнения расчета будет максимальной, в автоматическом – минимальной. Длительность расчета будет максимальной в режиме диалога, что зависит от времени ответов конструктора на запросы, частота расчета будет минимальной.

При автоматизированном проектировании необходимо создавать динамическую математическую модель котла, используемую для вычисления параметров настройки регуляторов систем автоматического регулирования, анализа опасных отклонений температуры перегрева пара и других параметров, оптимизации тепловой схемы котла. Котлоагрегат разбивается на расчетные участки (обычно по поверхностям нагрева): циркуляционный контур – участок с двухфазной средой (уравнения (2)–(6)), ступени пароперегревателя

(ПП) – участки с однофазной средой (уравнения (7)–(11)). Укрупненно уравнения можно представить в следующем виде.

Двухфазный участок:

уравнение материального баланса

$$\Delta\lambda = f(\varphi_P, \frac{d\varphi_h}{dt}, \frac{d\varphi_\lambda}{dt}); \quad (2)$$

уравнение теплового баланса

$$f(\frac{d\varphi_P}{dt}, \frac{d\varphi_h}{dt}, \frac{d\lambda}{dt}) = f(\Delta\lambda, \varphi_P, \theta, \psi); \quad (3)$$

уравнение расхода

$$\lambda = f(\varphi_P, \theta); \quad (4)$$

уравнение газозвоздушного тракта

$$\psi = f(\mu_B, L, \varphi_{\theta_L}) \quad (5)$$

уравнение изменения температуры газов на выходе из топки

$$\varphi = f(\mu_B, L, \varphi_{\theta_L}). \quad (6)$$

Однофазный участок:

уравнение теплового баланса

$$f(\frac{d\varphi_P}{dt}, \frac{d\varphi_\theta}{dt}) = f(\Delta\lambda, \psi, \Delta\varphi_P, \theta); \quad (7)$$

уравнение расхода

$$\lambda = f(\Delta\varphi_P, \theta); \quad (8)$$

уравнение теплообмена

$$\psi = f(\Delta\varphi_{\theta, \theta, P}, \mu_B, L); \quad (9)$$

уравнение теплового баланса газозвоздушного тракта

$$\psi = f(\Delta\varphi_{\theta}, \mu_{B, L}); \quad (10)$$

уравнение материального баланса

$$\Delta\lambda = f(\frac{d\varphi_P}{dt}, \frac{d\varphi_\theta}{dt}), \quad (11)$$

где  $\lambda, \mu_{B, L}, \varphi_{\theta}, \varphi_{\theta_L}, \varphi_P, \psi, \varphi_h$  – относительные значения соответственно расхода пара, топлива, воздуха; температуры газов, пара, воздуха; давления, тепловосприятия, уровня воды в барабане.  $\Delta\lambda, \Delta\varphi_{\theta, \theta, P}$  – разность i-го и i-1-го участков соответствующих величин. Используя уравнения (2)–(11), можно качественно проанализировать влияние одних переменных на другие.

В настоящее время в ОАО «Сибэнергомаш» применяются две технологии построения чертежей на ПЭВМ: использование AutoCAD'a и AutoLISP'a в среде Auto-CAD'a [20]. Развитой интерфейс между AutoCAD – AutoLISP позволяет корректировать чертежи независимо от технологии их создания. Применяя AutoCAD, пользователь создает чертежи вручную на магнитном носителе, при черчении чертежей по AutoLISP-программе способ создания чертежа – автоматический графический диалог,

поэтому технология с использованием AutoLISP'a является оптимальной, так как  $t_{AutoCAD} \gg t_{AutoLISP}$ . Для написания программ на AutoLISP'e необходим аппарат параметризации [21]. Под параметризацией понимается такое представление некоторого класса геометрических объектов, которое позволяет автоматически получать конкретный объект (экземпляр класса) путем задания значений параметров.

В практике компьютерного проектирования средства параметризации позволяют получать полностью автоматический выпуск конструкторских чертежей. Высокий уровень автоматизации удается обеспечить за счет специализации системы на определенный тип узлов и деталей котлоагрегата. Разрезы и виды на чертеже целесообразнее выполнять, используя параметризацию по размерам. В ее основе лежит известный факт, что геометрия разреза (вида) может быть построена по эскизу и значениям нанесенных на эскизе размеров. В таком эскизе должны определяться состав геометрических элементов, размерные отношения (в виде размерных обозначений) и наглядные геометрические отношения. В чертежной практике наглядными считаются следующие геометрические отношения: принадлежность (инцидентность) точки линии; параллельность и перпендикулярность прямых; касание окружностей и окружности с прямой; отношение точка – центр окружности; симметрия.

Для чертежей, состоящих из нескольких проекций (видов), этот набор расширяется проекционной связью. Совокупность геометрических и размерных отношений при заданном наборе элементов образует систему ограничений, достаточную для расчета геометрии вида (разреза). Далее строится модель параметризованного чертежа, состоящая из двух частей: параметрической и топологической, по которым, соответственно, рассчитывается геометрия для заданных значений размеров и строится экземпляр чертежа. Параметрическая модель МР состоит из трех множеств: E – геометрических элементов, G – геометрических отношений и R – размерных отношений.  $MP = \{E, G, R\}$ .

Топологическая модель задает соответствие между элементами чертежа и геометрическими элементами параметрической модели. По топологической модели строится экземпляр чертежа. Формирование модели МР происходит непосредственно в ходе построения образца. На образец накладываются ограничения. Ограничениями могут быть любые G и R, которые образуют меню построений. В начале параметризации необходимо составить клас-



сификацию групп узлов котлоагрегата, которые чертят с помощью AutoLISP-программы: коллекторов, водо- и пароперепускных труб, цельносварных газоплотных панелей, экранов топки и конвективной шахты, экономайзеров, ширм, микроблоков ПП, боковых, фронтowych, задних блоков топки и др. Описанная методика реализована на ЭВМ в виде программы [22].

**Заключение.** Разработаны и внедрены алгоритмы и комплексы программ для проекти-

рования и моделирования энергетических котлоагрегатов. Это программное обеспечение применялось при конструировании паровых котлов БКЗ 420-140-9, БКЗ 420-140 ПТ-2 и ряда других производства ОАО «Сибэнерго-маш», а также использовалось при курсовом и дипломном проектировании на кафедре котло- и реакторостроения Алтайского государственного технического университета.

## Литература

1. Беднаржевский В.С., Оскорбин Н.М. Обзор САД/САМ/САЕ для автоматизированного проектирования теплоэнергетического оборудования // Тяжелое машиностроение. 2002. №4.
2. Тепловой расчет котлов: Нормативный метод. СПб., 1998.
3. Гидравлический расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. М., 1978.
4. Аэродинамический расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. Л., 1977.
5. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. Л., 1971.
6. ОСТ 108.031.08-85 – ОСТ 108.031.10-85. Котлы стационарные и трубопроводы пара и горячей воды: Нормы расчета на прочность. Л., 1987.
7. РТМ 108.031.107-78. Котлы стационарные паровые и водогрейные: Расчеты на прочность цельносварных газоплотных конструкций. Л., 1985.
8. РТМ 108.031.101-84. Котлы барабанные: Расчет динамических характеристик. Л.: НПО ЦКТИ, 1986. 80 с.
9. Беднаржевский В.С. Разработка прикладных компьютерных программ для автоматизации расчета (проектирования) энергетических котлоагрегатов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. №1-2.
10. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003611541. Тепловой расчет котлоагрегата по поверхностям нагрева (Терпо) / Беднаржевский В.С. (RU). Заяв. 12.05.2003. Зарег. 27.06.2003.
11. Беднаржевский В.С., Добротина Г.Б. Программный комплекс для расчетного моделирования паровых котлов // Отраслевой фонд алгоритмов и программ: Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 2539. Зарег. 24.04. 2003. Номер гос. регистрации: №50200300342.
12. Беднаржевский В.С., Добротина Г.Б. Расчет на прочность прямых и гнутых труб котлоагрегата // Отраслевой фонд алгоритмов и программ: Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №2542. Зарег. 24.04. 2003. Номер гос. регистрации: №50200300345.
13. Виленский Т.В. Тепловые конструкторские расчеты поверхностей нагрева парогенератора на ЭВМ // Известия вузов. Энергетика. 1985. №8.
14. Литвак Д.Б., Иванов Я.И., Известков В.И. Алгоритмизация теплового расчета котлоагрегатов на ЭЦВМ «Минск-22» // Энергомашиностроение. 1971. №5.
15. Слободян И.П. Программа теплового расчета котельных агрегатов на ЭЦВМ «Минск-22» // Теплоэнергетика. 1974. №9.
16. Хорьков Н.С., Михейкина И.Д., Сизова Т.Б. Пакет программ для моделирования парового котла на ЭВМ третьего поколения // Теплоэнергетика. 1981. №9.
17. Золотухин В.И., Каган Г.М., Баркан Н.Л. Реализация теплового расчета энергетических котлоагрегатов на ЕС ЭВМ // Труды ЦКТИ. 1984. Вып. 210.
18. ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов / В.Д. Терентьев, Ю.Н. Кузнецов, Б.Я. Певзнер, А.А. Костюченко // Труды ЦКТИ. 1984. Вып. 210.
19. Беднаржевский В.С. Автоматический тепловой расчет котлоагрегата на ЭВМ // Известия вузов. Энергетика. 1995. №1-2.
20. Беднаржевский В.С. Автоматизированное проектирование коллекторов энергетических котлов на ПЭВМ IBM PC // Тяжелое машиностроение. 1994. №11-12.
21. Коваленко В.Н., Ревякин Ю.Г., Хухлаев Е.В. Параметризация машиностроительных чертежей, основанная на поэлементном расчете // Программирование. 1992. №2.
22. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003611540. Параметрическое моделирование узлов котлоагрегата (Parametr) / Беднаржевский В.С. (RU). Заяв. 12.05.2003. Зарег. 27.06.2003.