

УДК 621.181.681

Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А., Лифшиц В.Д.\*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРОВОГО КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
\*«Котлоэнегропроект»*

В отечественной и мировой энергетике в последние годы ведутся интенсивные разработки по проектированию, модернизации и реконструкции паровых и водогрейных котлов, использующих различные виды энергоносителей в качестве топлива.

Работы по проектированию современных котлов, а также по модернизации и реконструкции уже существующих котельных установок, предполагают решение сложных технических задач в виде выполнения многовариантных расчетов для определения оптимальных характеристик котельного оборудования. Эти технические задачи могут быть решены на основе широкого использования современной вычислительной техники, систем и методов автоматизированного проектирования. Известно, что автоматизированное проектирование является очень актуальным, стремительно развивающимся направлением научно-технического прогресса, поскольку позволяет существенно сократить сроки разработки новых котлов и модернизации эксплуатируемых, повысить их качество путем оптимизации конструкций и режимов эксплуатации.

Основу существующих САПР котельных установок составляют математические модели тепловых расчетов и реализующие их комплексы программ, включающие в себя современные методы многофакторной оптимизации [1].

В настоящее время разработано достаточно много версий моделей и программ тепловых расчетов котлов различных типоразмеров [1–8]. Эти математические модели и программы имеют различное функциональное назначение: некоторые из них предназначены для проведения конструктивных расчетов, другие – для выполнения поверочных или оптимизационных, диагностических расчетов и исследований.

В данной статье описана разработанная авторами математическая модель теплового расчета парового котла-утилизатора. Алгоритм и логико-структурная схема модели позволяют производить расчет всего многообразия элементов и схемных решений, применяемых для котлов-утилизаторов в условиях современного проектирования и изготовления.

Логическая блок-схема модели теплового расчета котла-утилизатора представлена на рис. 1. Реализованный в модели алгоритм состоит из 4-х иерархических уровней: 1-й уровень – управляющая программа; 2-й уровень – программы расчета теплового баланса; 3-й уровень – программы расчета основных конструктивных элементов; 4-й уровень – программы расчета термодинамических и теплофизических параметров теплоносителей и рабочих сред (воды, пара, воздуха и дымовых газов); программы расчета коэффициентов теплоотдачи для нагревательных, испарительных и пароперегревательных поверхностей для условий лучистого теплообмена в газовых потоках, а также для конвективного теплообмена при продольном и поперечном обтекании коридорных и шахматных пучков труб воздухом, дымовыми газами, водой, паром; программы расчета температурного напора для случаев прямого теплоносителей, противотока, последовательно-смешанного, параллельно-смешанного и перекрестного токов; программы расчетов коэффициента загрязнения поверхностей и поправок к нему.

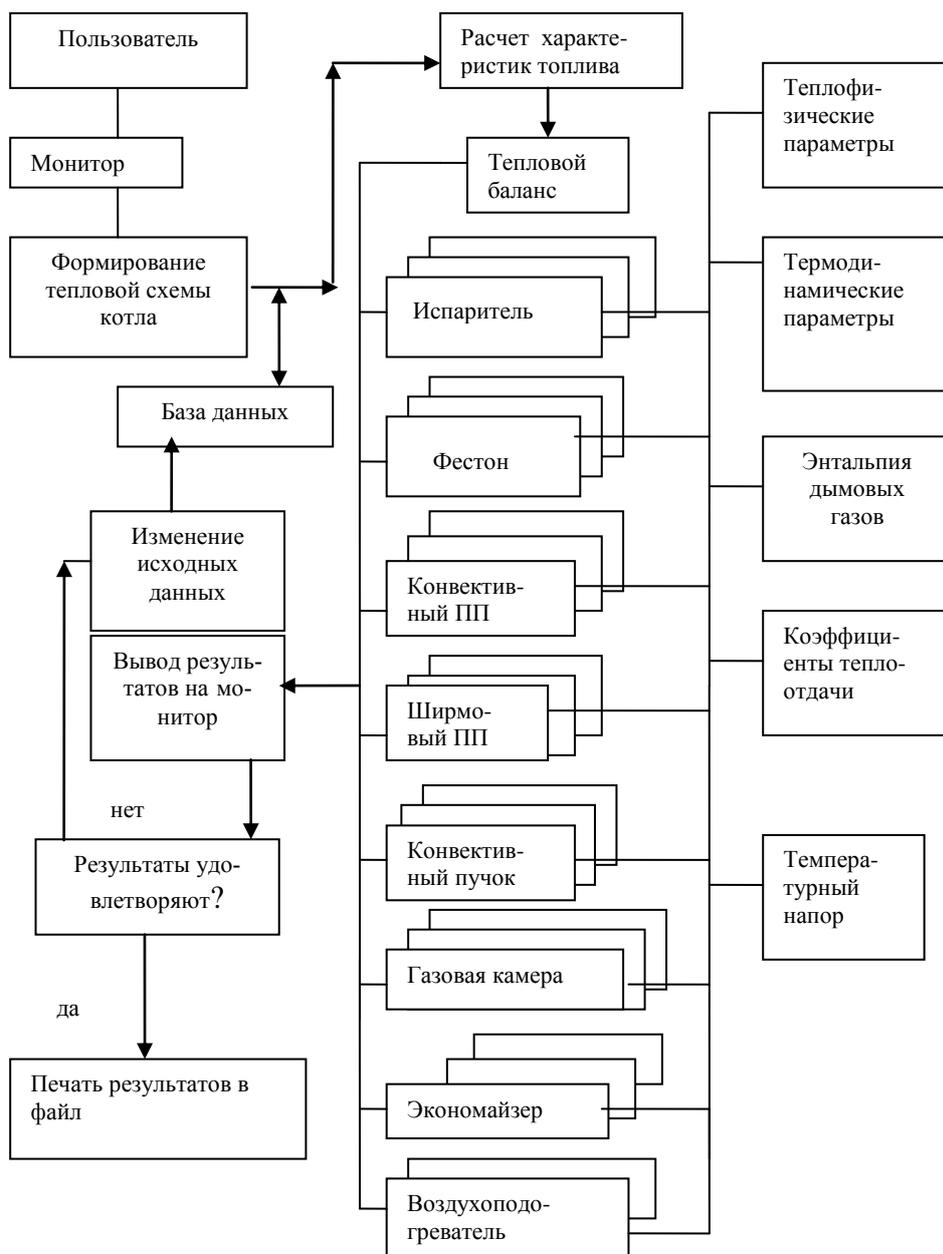


Рисунок 1 – Логическая блок-схема теплового расчета котла-утилизатора

Управляющая программа в автоматизированном диалоговом режиме строит структуру тепловой схемы котла, организывает вычислительный процесс и вводит исходные данные, необходимые для работы всего комплекса программ и расчета отдельных элементов котла.

При моделировании котла-утилизатора используется обширный перечень исходной информации. Для удобства пользователя вся исходная информация компонуется по технологическому принципу, облегчающему ее подготовку. Эта информация компонуется в виде файлов и передается в качестве задаваемых параметров в программы, оформленные как процедуры. Все файлы, содержащие информацию, снабжены комментариями.

Исходной информацией для теплового расчета котла-утилизатора являются: значения расхода, объема и температуры продуктов сгорания на входе в котел, темпе-

ратуры уходящих газов, температуры и давления перегретого (насыщенного) пара, температуры и давления питательной воды, состав дымовых газов, процент продувки, наличие, тип и тепловосприятие пароохладителей, присосы в поверхностях нагрева.

Исходной информацией для расчетов параметров нагревательных, испарительных и пароперегревательных поверхностей являются их геометрические характеристики: общая площадь поверхности теплообмена; площадь сечения для прохода газов; площадь поверхности, омываемой газами продольно; площадь поверхности, омываемая газами поперечно; диаметр труб и их толщина; шаги труб; тип пучка – коридорный или шахматный. Кроме того, в качестве исходной информации используются степень запыленности газового потока, коэффициенты загрязнения, использования и тепловой эффективности, а также характер взаимного движения потоков теплоносителей и рабочих тел.

Программы расчета теплового баланса котла включают в себя расчеты объемов газообразных продуктов сгорания, объемных долей трехатомных газов, энтальпии газа на входе в котел, значений полезной теплоты, энтальпии уходящих газов, потерь теплоты, КПД котла, количества вырабатываемого перегретого пара. Кроме этого, рассчитывается таблица значений энтальпий дымовых газов для заданных значений коэффициентов избытка воздуха и расчетного температурного диапазона газов 0–2000 °С с интервалом температур 100 °С.

Программы расчетов конструктивных элементов котла включают в себя расчеты элементов с прямоточным, противоточным или сложным взаимным движением теплоносителей и рабочих сред для конвективного и ширмового пароперегревателей, водяного экономайзера (в том числе с участком кипения), воздухоподогревателя, испарителя, конвективного пучка, фестона и экранов газовых камер. Они позволяют по заданным параметрам, типу взаимного движения теплоносителей и рабочих сред на входе в элемент, по типу теплообмена, по характеристикам поверхностей нагрева определить параметры теплоносителей и рабочих сред на выходе из элемента. Алгоритмы расчетов соответствуют нормам теплового расчета котлов [9].

Процесс расчета осуществляется в виде последовательных итераций. Он заканчивается, когда расчетная разность тепловосприятия поверхностей становится меньше заданной величины. Эта величина составляет, как правило, для экранов газовых камер и дополнительных поверхностей 10 %, а для ширм, конвективных пучков, пароперегревателей, испарителей, водяных экономайзеров и воздухоподогревателей – 2 %. Относительная невязка теплового баланса всего котла не должна превышать 0,5 %.

Количество рассчитываемых типов поверхностей теплообмена определяется существующим опытом конструирования котлов-утилизаторов [10–13].

Пакет программ для расчетов термодинамических и теплофизических свойств теплоносителей и рабочих сред является составной частью программ 4-го уровня логической структуры модели. Он предназначен для аппроксимации и интерполяции значений таблиц термодинамических и теплофизических параметров воды, водяного пара [14], воздуха и дымовых газов [9], кривых (например, рис. 2) значений искомых параметров. В состав этого пакета входят более 50 программ.

Программы термодинамического расчета параметров воды и водяного пара определяют: значения давления по температуре и значения температуры по давлению на линии насыщения; значения давления, температуры и степени сухости пара по энтальпии и энтальпии; значения удельных объемов, энтропии и энтальпии воды и пара по давлению и температуре; значения температуры воды по давлению и энтальпии; значения температуры и степени сухости пара по давлению и энтальпии; значения энтальпии

пара по давлению и энтропии. Они применимы для областей докритического и сверхкритического давлений.

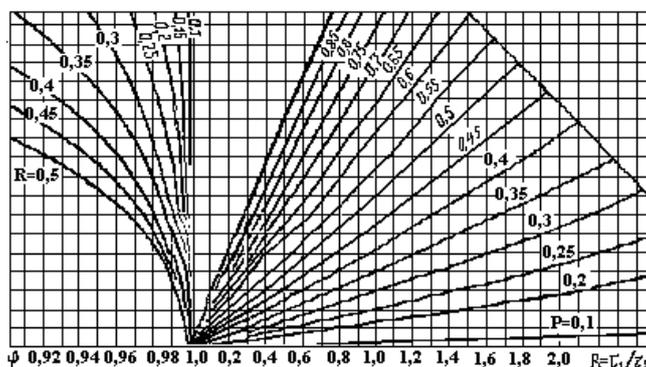


Рисунок 2 – Номограмма для определения температурного напора

Программы расчетов теплофизических параметров воды и водяного пара определяют значения коэффициентов динамической и кинематической вязкости,

теплоемкости, критериев Прандтля. Они применимы для расчетных давлений от 0,1 до 40 МПа и температур от 0 °С до 700 °С, а также на линии насыщения. Программы расчетов теплофизических параметров для воздуха определяют значения критериев Прандтля, коэффициентов кинематической вязкости и теплопроводности. Они применимы в диапазоне температур 0–2300 °С.

Программы расчетов термодинамических и теплофизических параметров для дымовых газов определяют: значения температур по энтальпиям, коэффициенты теплоемкости по температурам, критерии Прандтля, коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности. Они применимы для температур, лежащих в диапазоне 0–2300 °С. Для дымовых газов, имеющих состав отличный от среднего, для диапазона объемных долей водяных паров в них  $r_{H_2O} = 0–0,29$  учитываются соответствующие отклонения коэффициентов кинематической вязкости, теплопроводности и критерия Прандтля.

Работа программного комплекса начинается с формирования расчетной тепловой схемы котла-утилизатора. С этой целью вводится число теплообменных поверхностей, расположенных по ходу газов, и число элементов по ходу рабочей среды (воды, пароводяной смеси и пара). Затем в диалоговом режиме, в соответствии с выбранной схемой котла, задаются типы теплообменных поверхностей, располагаемых друг за другом. Как уже отмечалось, разработанная математическая модель предполагает расчет следующих типов поверхностей: экраны газовой камеры, фестоны, ширмовые и конвективные пароперегреватели, испарители, водяные экономайзеры и воздухоподогреватели. Для пароводяного тракта барабанных котлов к этому перечню добавляется барабан.

После автоматизированного формирования тепловой схемы котла-утилизатора выполняется его тепловой расчет в итерационном режиме. Количество итераций при корректном задании исходных данных составляет 3–4. Получаемые результаты для удобства конструктора-проектировщика оформлены в виде таблицы заданных в качестве исходных данных параметров, результатов расчета теплового баланса и таблиц значений тепловых и конструктивных характеристик, определенных для всех поверхностей нагрева.

Разработанный комплекс программ предназначен для проведения тепловых расчетов паровых котлов-утилизаторов любой конструктивной схемы на различных нагрузках и видах топлива. Являясь открытой системой, он может быть дополнен другими расчета-

ми, например, тепловым расчетом водогрейных котлов-утилизаторов и расчетом их теплогидравлических характеристик. Указанное расширение может быть осуществлено путем добавления соответствующих блоков в разработанную логическую схему модели.

Литература

1. Левин М.М., Волковицкая П.И., Лаптин Ю.П. и др. Система КРОКУС – автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок // Энергетика и Электрификация. – 2001. №7. С. 45–48.
2. Бернаджевский В.С. Математические модели – основа систем автоматизированного проектирования паровых котлов// Теплоэнергетика. 1997. № 9. С. 20–23.
3. Бернаджевский В.С., Оскорбин Н.М. Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ // Теплоэнергетика. –2002. № 8. С. 48–50.
4. Виленский Т.В. Тепловые конструкторские расчеты поверхностей нагрева парогенератора на ЭВМ // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 9. С. 99–103.
5. Хорьков Н.С., Михейкина Н.Д., Сизова Т.Б. Пакет программ для моделирования парового котла на ЭВМ третьего поколения // Теплоэнергетика. 1981. №9. С. 45–48.
6. Терентьев В.Д., Кузнецов Ю.Н., Певзнер Б.Я., Костюченко А.А. ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов // Труды ЦКТИ. 1984. Вып. 210. С. 72–74.
7. Безгрешнов А.Н., Щукин Е.М., Шлейфер Б.Н. Блок-схема расчета тепловых схем барабанных котлов // Теплоэнергетика. –1983. № 5. С. 26–28.
8. Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Адель Аль Тувайни Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций // Вестник НТУ “ХПИ”.– 2001. Вып.7. С. 72–78.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 296 с.
10. Воинов А.П., Зайцев В.А., Куперман Л.И., Сидельников Л.Н. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты. М.: Энергоатомиздат. 1989. 270 с.
11. Воинов А.П., Куперман Л.И., Сушон С.П. Паровые котлы на отходящих газах. Киев: Вища школа, 1983. 176 с.
12. Котлы–утилизаторы и котлы энерготехнологические. Отраслевой каталог. М.: ЦНИИТЭИТяжмаш, 1990. 124 с.
13. Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. Киев: Вища школа, 1986. 279 с.
14. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1975. 78 с.

УДК 621.181.681

Ефімов О.В., Меньшикова О.Д., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А., Ліфшиц В.Д.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРОВОГО КОТЛА-УТИЛІЗАТОРА**

У статті розглянуто математичну модель розрахунку парового котла-утилизатора. Подані логіко-структурна блок-схема математичної моделі та ітераційний алгоритм розрахунку. Розроблений комплекс програм призначений для проведення теплових розрахунків парових котлів-утилизаторів будь-якої конструктивної схеми на різних навантаженнях і видах палива.