



УДК 621.181.7

**Р.А. Садыков** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики

**Д.Н. Антропов** – кандидат технических наук, старший преподаватель

**Д.В. Крайнов** – аспирант

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**

**Ю.Л. Линючкин** – аспирант

**Исследовательский центр проблем энергетики, Казанский научный центр при РАН (ИЦПЭ КазНЦ РАН)**

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИМУЛЯЦИЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

### АННОТАЦИЯ

На основе материального и теплового балансов жидкости и газовых фракций разработана математическая модель (ММ) и создан компьютерный симулятор водогрейного котла.

Предлагаемая ММ, симулятор и автоматизированный микропроцессорный комплекс (АМК) реализованы в промышленной энергетике для оптимизации параметров управления теплогенерирующих установок, исследования поведения систем управления при критических и аварийных ситуациях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Теплогенерирующие установки, котел, паровой котел, водогрейный котел, компьютерная симуляция, компьютерное моделирование.

**R.A. Sadykov** – doctor of technical sciences, professor, head of Heat-Power Engineering department

**D.N. Antropov** – candidate of technical science, senior lecturer

**D.V. Krainov** – post-graduate student

**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**

**Yu.L. Linyuchkin** – post-graduate student

**Research Center of Energetic Problems, Kazan Scientific Center on the ground of Russian Academy of Science (RCEP Kazan SC RAS)**

## COMPUTER-BASED SIMULATION OF HEAT-GENERATING PLANTS

### ABSTRACT

On the base of material and heat balances of liquid and gas fractions the mathematical model and computer simulator of water-heating boiler were developed.

The above-mentioned mathematical model simulator, and automatized microprocessor-based complex are realized in industrial power engineering for optimization of factors of heat-generating plants operation, and investigation of control-systems' behavior in critical and emergency situations.

**KEYWORDS:** Heat-generating plants, boiler, steam-boiler, hot-water boiler, computer-based simulation, computer-based modelling.

При автоматизации промышленных производств для тестирования и наладки систем управления, проверки их в реальных, «полевых» условиях необходимо наличие объекта управления или непосредственное присутствие наладчиков на предприятии. Объект управления зачастую невозможно доставить наладчикам, а присутствие на предприятии связано с дополнительными расходами. Намного лучше и экономичнее, если все подготовительные и тестовые работы группа наладчиков осуществляет на своем рабочем месте. В

этом им может помочь компьютерное моделирование объектов управления.

В нашем случае объектом управления является водогрейный (или паровой) котел.

На данный момент описано множество компьютерных тренажеров для обучения персонала котельных работе с оборудованием и правильному поведению при аварийных ситуациях.

Целью же настоящей работы является разработка компьютерного симулятора реального времени для промышленных котельных установок с возможностью

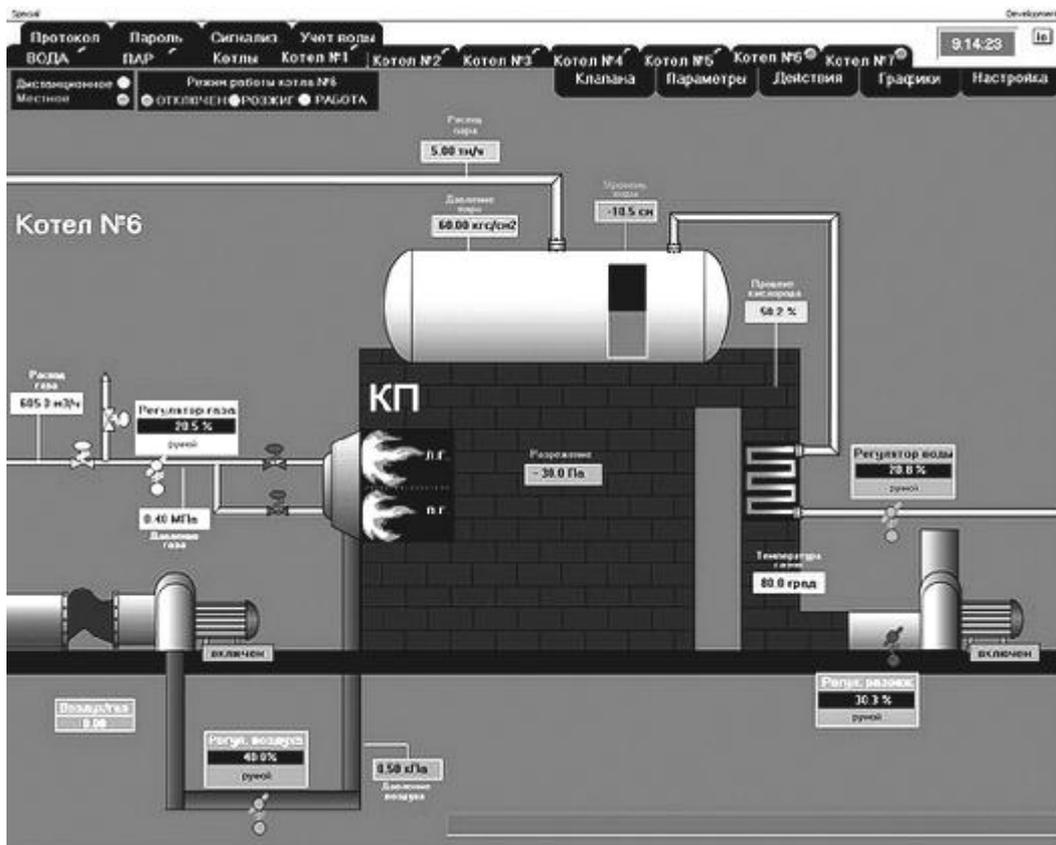


Рис. 1. Функциональная схема парового котла (АРМ оператора котельной)

тестирования систем автоматизации. Для решения этой проблемы необходимы конкретные компьютерные математические модели функционирования отдельных ключевых узлов котельной установки (КУ), программные средства и симулятор КУ.

Рассмотрим устройство КУ. В качестве примера на рис. 1 представлена функциональная схема парового котла.

Наиболее распространенным теплоносителем является пар (или вода), который получают в паровых (или водогрейных) котлах. В состав котельной установки входят: *топливный тракт, воздушный тракт, газовый тракт, пароводяной тракт (или водяной тракт)*.

Количество тепла, выделившегося в топке при сгорании топлива, усваивается парообразующей частью котлоагрегата и идет на нагрев питательной воды, парообразование и перегрев пара.

Для описания КУ разделим ее на функциональные блоки по трактам (рис. 2). Каждый блок моделируется отдельно. Он имеет набор входных и выходных параметров, содержит необходимые уравнения материального и теплового балансов, что облегчает моделирование и программирование [1, 2].

Технологический процесс в КУ в первом приближении представляется в виде упрощенной ММ, но она в целом отражает протекание основных процессов.

К количественному параметру относится нагрузка котла, которая может меняться в широких пределах в зависимости от графика нагрузок потребителей, а к качественному параметру относится температура воды.

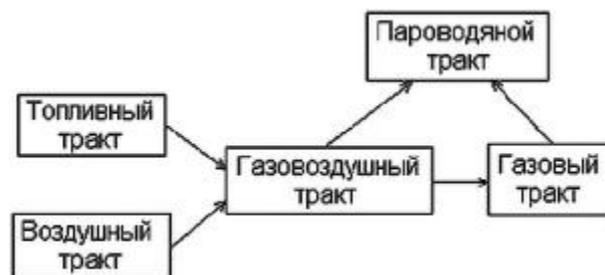


Рис. 2. Общая блок-схема котельной установки

**Рассмотрим водяной тракт.** В барабане котла происходит нагрев жидкости до температуры  $T_2$ , тепловым потоком  $\Phi_1$ . К известным нам граничным условиям можно добавить: объем в барабане  $V_1$ , температуру входящих газовых потоков  $T_{вх}$ .

Уровень воды в барабане, постоянный, а значит  $V_1 = \text{const}$ .

Упрощенный материальный баланс емкости барабана котла можно представить в виде:

$$\frac{dV_1}{dt} = F_B - F_2 = 0. \quad (1)$$



Здесь  $F_B$  – входящий поток жидкости;  $F_2$  – выходящий поток жидкости из барабана котла, эти потоки равны, т.е. в котле жидкость не скапливается, и нет утечек,  $t$  – время.

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:  
 [скорость накопления тепла в емкости] = [приход тепла] + [приход тепла с тепловым потоком] – [отвод тепла].

$$\frac{d}{dt}(V_1 \cdot c \cdot \rho \cdot T_2) = F_B \cdot T_1 \cdot c \cdot \rho + \Phi_1 - F_2 \cdot T_2 \cdot c \cdot \rho, \quad (2)$$

где  $c, \rho$  – соответственно теплоемкость и плотность жидкости,  $T_1, T_2$  – температуры входящего и выходящего потоков жидкости,  $\Phi_1$  – тепловой поток, поступающий от сгорания топлива.

Из уравнения теплового баланса (2) можно определить температуру  $T_2$ .

Тепловой поток  $\Phi_1$  определяется:

$$\Phi_1 = k \cdot S_1 \cdot (T_{BX} - T_2), \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи через стенку;

$S_1$  – площадь поверхности теплообмена.

Для отчетливого представления связей между составленными уравнениями ММ на рис. 3 представлена блок-схема модели водогрейного котла.

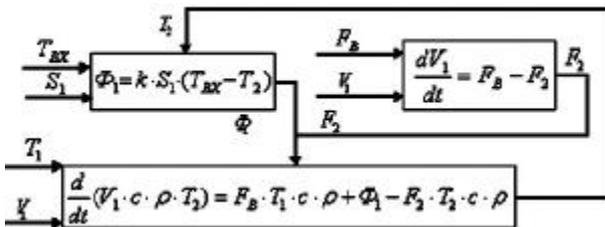


Рис. 3. Блок-схема модели водогрейного котла

**Рассмотрим газо-воздушный тракт.** При рассмотрении газодинамики в топочном пространстве были приняты следующие допущения:

1. Топочное пространство условно разбито на три части (рис. 4): I – область смешивания газов; II – область горения газов; III – область теплообмена;
2. В каждой области среда принимается гомогенной;
3. Поперечные сечения областей одинаковы.

Тогда материальный баланс областей можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_I}{dt} = F_{газ} + F_{возд} - v_I S r_I \\ \frac{dm_{II}}{dt} = v_I S r_I - v_{II} S r_{II} \\ \frac{dm_{III}}{dt} = v_{II} S r_{II} - F_{дым} \end{cases}, \quad (4)$$

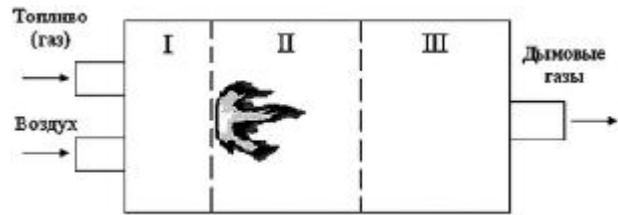


Рис. 4. Блок-схема модели водогрейного котла

где  $m_I, m_{II}, m_{III}$  – массы,  $v_I, v_{II}, v_{III}$  – скорости потоков,  $c_I, c_{II}$  – плотности газов в соответствующих областях,  $S$  – площадь поперечного сечения топочного пространства,  $F_{газ}, F_{возд}$  – потоки топливного газа и воздуха.

Тепловой баланс областей:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(c_I m_I T_I) = c_{газ} F_{газ} T_0^{газ} + c_{возд} F_{возд} T_0^{возд} - c_I F_I T_I \\ \frac{d}{dt}(c_{II} m_{II} T_{II}) = c_I F_I T_I + q F_I - c_{II} F_{II} T_{II} \\ \frac{d}{dt}(c_{III} m_{III} T_{III}) = c_{II} F_{II} T_{II} - Q^{нагр} - c_{дым} F_{дым} T_{III} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $c_I, c_{II}, c_{III}$ ,  $T_I, T_{II}, T_{III}$  – теплоемкости и температуры газов в соответствующих областях,  $c_{газ}, c_{возд}$  – теплоемкости топливного газа и воздуха,  $T_0^{газ}, T_0^{возд}$  – начальные температуры топливного газа и воздуха,  $F_{дым}$  – поток дымовых газов,  $F_I, F_{II}$  – потоки смеси газов из первой и второй областей соответственно,  $q$  – удельная теплота сгорания топливного газа,  $Q^{нагр}$  – определяется из теплового баланса в барабане котла ( $Q^{нагр} = \Phi_1, T_{II} = T_{BX}$ ).

Схема управления котлом следующая: информация с датчиков, расположенных в основных узлах котла, поступает в шкаф системы управления. Далее она поступает на АРМ оператора, где отображается на мнемосхемах.

Схема управления моделью котла такая же, за исключением того, что показания датчиков котла моделируются в реальном времени симулятором (рис. 5).

Системы управления не знают, чем они управляют – реальным объектом или его компьютерной моделью, и будут работать одинаково. Также на моделях можно тестировать системы управления в различных критических режимах и проверять работу при аварийных ситуациях.

Выбор средств моделирования очень широк. В нашем случае моделирование производится в системе LabView, математический аппарат программируется в системе MATLAB. При помощи плат сбора данных фирмы ICP DAS: PIO-DA8 и PIO-D48, сигналы с цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) от компьютерной модели подаются на входы системы управления, которая воспринимает их как сигналы измерительных



Рис. 5. Схема управления моделью котла

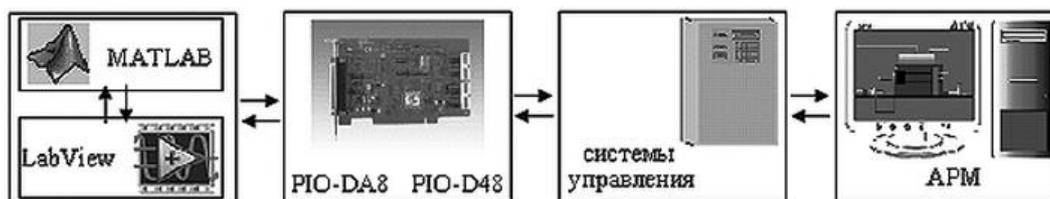


Рис. 6. Развернутая схема управления моделью котла

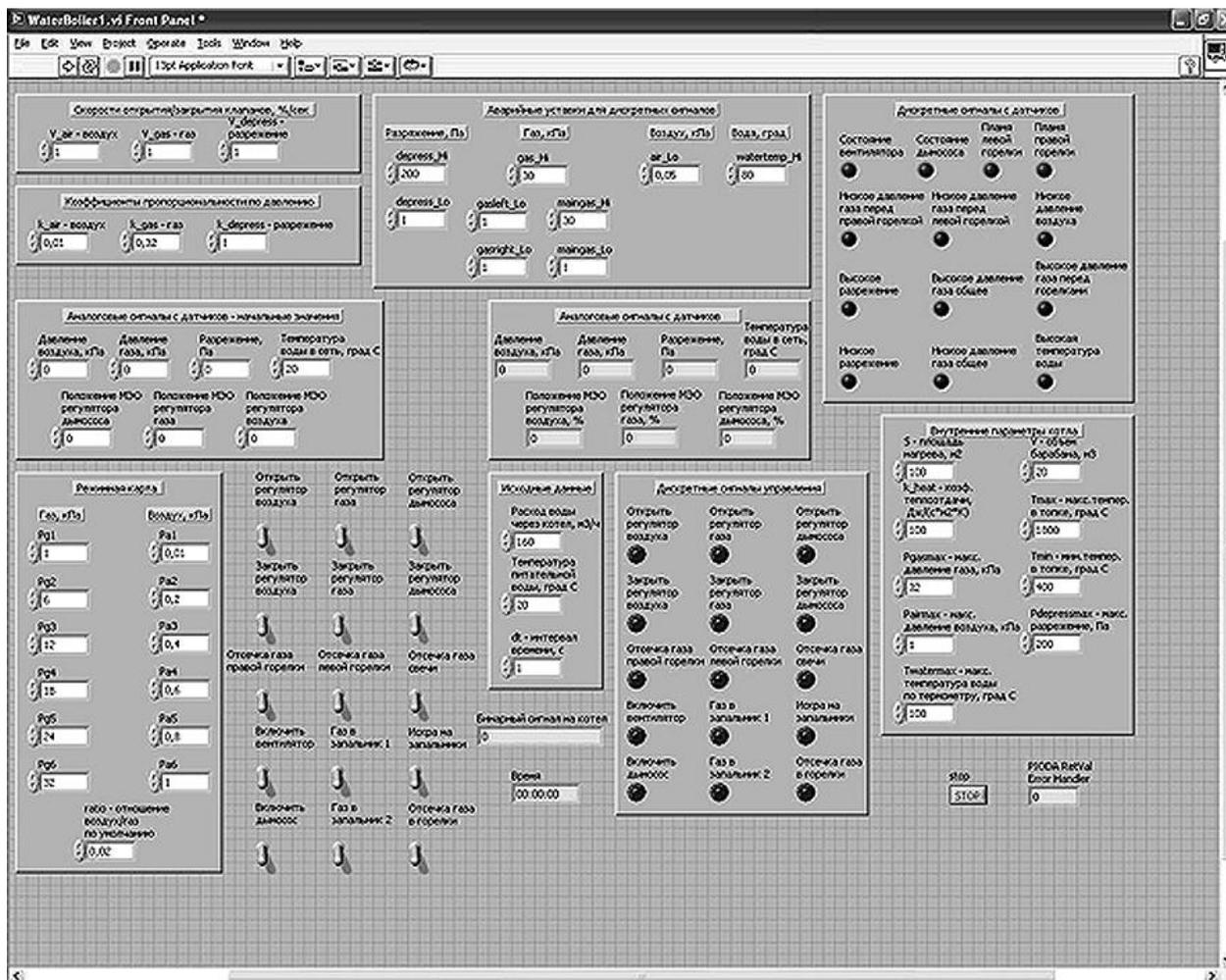


Рис. 7. Экранный интерфейс симулятора



приборов в котельной установке. Управляющие сигналы подаются с выходов системы управления на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) плат сбора данных (рис. 6). На компьютере АРМ оператора происходит визуализация процесса.

В настоящее время разработан симулятор, экранный интерфейс которого показан на рис. 7. Он отражает протекание процесса в первом приближении и подобен ранее разработанным и представленным в работах [2, 3].

В дальнейшем предлагаемая ММ по мере накопления результатов исследований и проведения натуральных экспериментов в промышленных масштабах может корректироваться и использоваться для более широкого круга котлоагрегатов.

Нахождение значений параметров ММ работы котлоагрегата, при которых энтальпия теплоносителя будет максимальной, а минимальными будут приведённые затраты на природный газ, питательную воду, качественное соотношение регулирования газ-воздух, позволяет управлять процессом в оптимальном режиме, улучшить процесс горения, уменьшить выброс вредных газов от отработанного топлива в атмосферу, снизить расходные нормы газа на производство оптимального количества теплоносителя, и в конечном итоге уменьшить себестоимость получаемого теплоносителя.

Разработанные системы управления котлоагрегатами с применением автоматизированных микропроцессорных комплексов (АМК-1) внедрены в структурных подразделениях Азнакаевского и Мамадышского предприятий тепловых сетей, ОАО «Казэнерго», ОАО «Татнефть», НГДУ «Бавлынефть» и др. предприятиях энергетического комплекса [3-5]. Экономический эффект на различных типах теплогенерирующих установок составляет от 65 до

130 тыс. м<sup>3</sup> в год на один агрегат за отопительный период.

Кроме того, полученные результаты исследований служат развитию общей теории компьютерного моделирования, полезны при постановке экспериментальных исследований по энерго- и массопереносу, расчете обменных процессов при проектировании; позволяют значительно сократить объем необходимых экспериментальных исследований или полностью заменить натурные эксперименты на численные.

### Литература

1. Беспалый П.А. Моделирование процесса парообразования в технологическом котле // Труды Пермского государственного технического университета. – Пермь, 2005. – С. 85-91.
2. Антропов Д.Н. Энергосберегающие режимы работы теплоэнергетических установок с применением микропроцессорных комплексов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Казань, 2007. – 22 с.
3. Садыков Р.А., Антропов Д.Н. Оптимальное управление и автоматизация технологии сушки биоактивных продуктов // Известия академии наук, Энергетика, 2005, № 6. – С. 92-99.
4. Антропов Д.Н., Садыков Р.А. и др. Многопараметрический интеллектуальный датчик давления и температуры (МД) для теплогенерирующих установок. Программа инновационных проектов «Идея-1000», диплом по номинации «Старт – 1». – Казань, 2008.
5. Садыков Р.А. и др. Водоподогреватель. Патент на изобретение РФ № 2351857 от 10.04.2009.