

## Моделирование и симулирование промышленного парового котла

На основе материального, энергетического балансов и баланса импульса жидкости и газовых фракций разработана математическая модель и создана имитационная модель парового котла. Предлагаемая имитационная модель (симулятор) реализованы для выявления оптимальных параметров управления теплогенерирующих установок, исследования поведения систем управления при критических и аварийных ситуациях.

*A mathematical model has been developed and an imitation model of a steam boiler has been created, based on the mass, energy and momentum balance of the fluid and gas fractions. The proposed simulation model (simulator) is implemented to identify optimal control parameters for heat generating plants, to study the behavior of control systems in critical and emergency situations.*

**Ключевые слова:** паровой котел, теплоагент, математическое описание, моделирование, имитационная модель, эффективность парового котла, Matlab, Simulink.

Паровой котел имеет важную роль во всех отраслях промышленности. В промышленности пар используется как:

- средство прямого или косвенного нагрева.
- сырьевой материал.
- средство для выработки электроэнергии.

Котел представляет собой закрытый сосуд, который обеспечивает процесс превращения воды в пар. Пар под давлением используется в качестве теплоагента. При превращении воды в пар ее объем увеличивается примерно в 1600 раз, создавая силу, почти такую же взрывную, как порох. Это приводит к чрезвычайно опасной работе котла и требует осторожного обращения.

Рабочие условия котла очень важны для контроля и управления, так как высокие пределы давления и температуры являются основными проблемами безопасности. Основной недостаток водяного пара – значительное возрастание давления с повышением температуры.

Математическое моделирование энергетических котлов относится к классу сложных задач, поэтому при алгоритмизации такого вида задач возникают определенные трудности. Эта проблема может быть решена на основе широкого использования средств вычислительной техники и компьютерных технологий. Математическое моделирование является одним из наиболее быстро развивающихся направлений научно-технического прогресса, способствующих повышению качества и сокращению продолжительности проектирования новых видов продукции.

В статье предлагается имитационная математическая модель для выявления оптимальных условий работы парового котла.

Метод имитационного моделирования в общем виде – это экспериментальный метод исследования реальной системы на ее имитационной модели, который сочетает особенности экспериментального подхода и специфические условия использования вычислительной техники.

В процессе имитационного моделирования исследователь имеет дело с четырьмя основными элементами:

- реальная система;
- математическое описание моделируемого объекта;
- имитационная (машинная) модель;
- ЭВМ, на которой осуществляется имитация – направленный вычислительный эксперимент.

Ключевым моментом в имитационном моделировании является выделение и описание состояний системы. Система характеризуется набором переменных состояний, каждая комбинация которых описывает конкретное состояние. Следовательно, путем изменения значений этих переменных можно имитировать переход системы из одного состояния в другое. Таким образом, имитационное моделирование – это представление динамического поведения системы посредством продвижения ее от одного состояния к другому в соответствии с определенными правилами. Эти изменения состояний могут происходить либо непрерывно, либо в дискретные моменты времени. Имитационное моделирование есть динамическое отражение изменений состояния системы с течением времени.

Преимущества использования математических моделей можно представить следующим образом:

- Процесс может быть глубоко проанализирован, определяя, какие переменные или параметры являются критическими и оказывают существенное влияние на общее поведение системы.
- Они могут использоваться для обучения операторов.
- Способствуют определению наилучших условий эксплуатации.

Разработка математической модели обуславливается: вектором входных переменных, состоящим из массового расхода топлива  $\frac{d(m_f)}{dt}$ , воздуха и питательной воды; и выходными переменными - давлением  $P_f$  и температура пара на выходе.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема парового котла для определения балансовых уравнений.

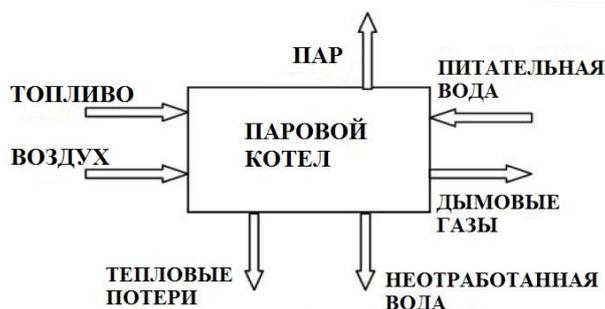


Рис.1 К определению уравнений балансов

## Материальный баланс

Плотность для однородной жидкости выражается уравнением:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Принимая производную по времени для постоянного объема равным

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dm/dt}{V} \quad (a)$$

получаем баланс массы:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{in} (\dot{m}_{in}) - \sum_{out} \dot{m}_{out} \quad (b)$$

Подставив уравнение (b) в (a) получим:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\sum_{in} (\dot{m}_{in}) - \sum_{out} (\dot{m}_{out})}{V} \quad \text{или}$$

$$V * \frac{d\rho}{dt} = \Sigma_{in}(\dot{m}_{in}) - \Sigma_{out}(\dot{m}_{out}) \text{ откуда}$$

$$V_f * \frac{d(\rho_g)}{dt} = \frac{d}{dt} m_{fb} + \frac{d}{dt} m_a - \frac{d}{dt} m_g$$

## Энергетический баланс

Для составления энергетического баланса две величины считаются постоянными: масса и энергия.

Сохранение массы

Поскольку в паровом котле не происходит химической реакции:

$$\Sigma(m_{in}) - \Sigma(m_{out}) = \Delta m$$

Сохранение массы может быть выражено в виде скорости как:

$$\Sigma(m_{in}) - \Sigma(m_{out}) = \frac{d}{dt} m$$

Сохранение энергии может быть выражено как:

$$Q - W + \Sigma E_{in, mass} - \Sigma E_{out, mass} = \Delta E,$$

где Q – теплота [Дж],

W – работа [Н\*М],

E – энергия [кДж].

Скорость изменения энергии выражается соотношением:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \Sigma \dot{E}_{in, mass} - \Sigma \dot{E}_{out, mass} = \frac{d}{dt} E$$

Рабочий поток - это энергия, необходимая для подачи жидкости в регулируемый объем и из него:

Имея выражения:

$$F = PA \text{ где } A - \text{площадь [м}^2\text{]}$$

$$W = PA$$

$$W = PV$$

Получим, что энергия потока равна:

$$W_{flow} = PV$$

Полную энергию потока запишем как:

$$\theta = PV + e$$

$$\theta = PV + (u + Ke + Pe)$$

Где Ke/Pe – кинетическая и потенциальная энергии, энтальпия будет равна:

$$h = u + PV$$

$$\theta = h + Ke + Pe$$

подставляя  $\theta = h + \frac{V^2}{2} + gz$  в выражение сохранения энергии, получим:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \Sigma_{in} \dot{m}_{in} (h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in}) - \Sigma_{out} \dot{m}_{out} (h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{in})$$

$$\frac{dE}{dt} = Q + \Sigma_{in} \dot{m}_{in} h_{in} - \Sigma_{out} \dot{m}_{out} h_{out}$$

$$E = V(\rho U)_{cp}$$

$$V \frac{d[(\rho V)_{cp}]}{dt} = Q + \Sigma_{in} \dot{m}_{in} h_{in} - \Sigma_{out} \dot{m}_{out} h_{out}$$

$$\Sigma \dot{m}_{in} h_{in} - \Sigma \dot{m}_{out} h_{out} + \dot{Q} = V \frac{d(\rho_{cp} U_{cp})}{dt}$$

## Баланс импульса

Для составления баланса импульса используются четыре слагаемых, которые являются постоянными:

- трение
- гидростатический напор
- инерция
- ускорение

Для определения перепада давления, вызванного трением, удобно работать с коэффициентом трения «Муди» или «Дарси», который является параметром с меньшей размерностью:

$$f = -\left(\frac{dp}{dx}\right)D / \rho \mu^2 / 2$$

Перепад давления = P1-P2, связанный с полным расходом воды в некотором положении =(x1;x2), может быть выражен как:

$$\Delta P = -\int_{x1}^{x2} dx$$

$$\Delta P = \frac{f \rho \mu^2}{2D(x2 - x1)}$$

Конечным выражением перепада давления, вызванным трением является:

$$\Delta P = \frac{f L m_{cp}^2}{2 D A^2 \rho_{cp}} \quad (1)$$

2) Перепад давления из-за гидростатического напора представлен гидростатическими потерями напора:

$$\Delta P = \rho_{cp} g L \quad (2)$$

3) Инерция для потери давления определяется следующим образом: Используя второй закон Ньютона получим:

$$F = \frac{P}{A}$$

$$\Delta P A = F = \frac{d}{dt}(mv)$$

$$\Delta P = \frac{L}{A} \frac{d}{dt}(m_{cp}) \quad (3)$$

3) Ускорение для перепада давления определяется на основании второго закона Ньютона:

$$\Delta P A = F = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dt}(\rho V v)$$

$$\Delta P A = \frac{d}{dt}(\rho_{out} V_{out} v_{out} - \rho_{in} V_{in} v_{in})$$

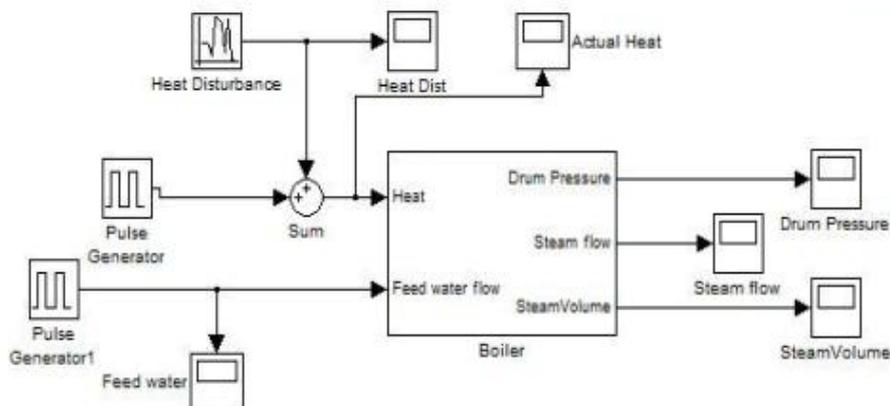
$$\Delta P A = \rho_{out} v_{out} \frac{d}{dt} V_{out} - \rho_{in} v_{in} \frac{d}{dt} V_{in}$$

$$\Delta P = m_{out}^2 / \rho_{out} - \rho_{in}^2 / \rho_{in} A^2 \quad (4)$$

Объединение уравнений (1), (2), (3) и (4) дает полное уравнение баланса импульса:

$$\Delta P = f L \frac{d}{dt}(m_{cp}^2) / 2 D A^2 \rho_{cp}^2 + \rho_{cp} g L + L / A \left[ \frac{d}{dt}(m_{cp}) \right] + \left( \frac{d}{dt}(m_{out}^2) / \rho_{out} A^2 - \frac{d}{dt}(m_{in}^2) / \rho_{in} A^2 \right)$$

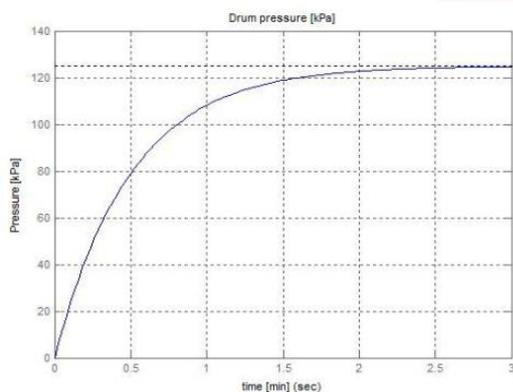
Далее в пакете программ Simulink построена имитационная модель парового котла на основе приведенного выше математического описания. Для этого создан ряд элементов, которые будут отображать каждый из этапов процесса. На рисунке 2 показана блок-схема (имитационная модель) котла в Simulink.



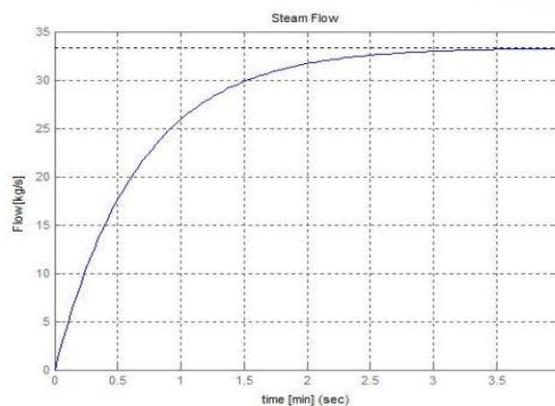
**Рис.2 Имитационная модель парового котла**

Для получения результатов моделирования необходимо ввести входную информацию (входные параметры модели котла в Simulink представляют собой температуру нагрева, в данном случае - 241 ° C и расход питающей воды 100 м³).

Результаты моделирования приведены на рисунках 3 и 4.



**Рис.3 Изменение давления в барабане в зависимости от времени**



**Рис.4 Изменение расхода пара в зависимости от времени**

Таким образом, на основании проведенных исследований разработана имитационная модель котла. Модель состоит из ряда подмодулей для различных компонентов, присутствующих в котле. Каждый из подмодулей создается как набор дифференциально-алгебраических уравнений. Впоследствии эти модели объединяются в общую модель системы.

MatLab / SimuLink применяется для интеграции модели. на основе результатов моделирования можно сделать вывод, что:

давление внутри печи линейно возрастает, а затем достигает устойчивого состояния, вызванного изменениями расхода топлива внутри котла, из-за низкого сопротивления котла это явление происходит очень быстро.

На основе этих характеристик может быть разработана система управления процессом.

## Литература

1. J. Makovicka, V. Havlena, and M. Beneš, "Mathematical modelling of steam and flue gas flow in a heat exchanger of a steam boiler," in Proceedings of ALGORITMY–2002. Conference of Scientific Computing, 2002, pp. 171-178.
2. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. Учебник для вузов. 3-е изд.. –М.: Энергоатомиздат. 1997. – 328 с.
3. Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов. В.С. Мухин, И.А. Саков, 1988 г.
4. Инструкция по эксплуатации котлоагрегата. Обуховэнерго. Ст. №4 ТП-38, 2007 г.
5. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат. 1997. – 368 с.
6. Федосов Б.Т. Об оценке качества линейных САП с использованием программ моделирования.
7. J. Bujak, "Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency," Energy, vol. 33, pp. 1779-1787, 2008.
8. M.-N. Dumont and G. Heyen, "Mathematical modeling and design of an advanced once-through heat recovery steam generator," Computers & chemical engineering, vol. 28, pp.651-660, 2004.
9. F. P. Incropera, A. S. Lavine, and D. P. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer: John Wiley & Sons, 2011.
10. R.-G. Cai and S. P. Kim, "First law of thermodynamics and Friedmann equations of Friedmann-Robertson- Walker universe," Journal of High Energy Physics, vol. 2005, p. 050, 2005.
11. Y. Cengel, Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer+ EES Software vol. 77235657: McGraw Hill Higher Education, London, ISBN, 2007.
12. W. Graebel, Engineering fluid mechanics: CRC Press, 2001.
13. Y. A. Cengel, M. A. Boles, and M. Kanoglu, Thermodynamics: an engineering approach vol. 5: McGraw-Hill New York, 2011.

### Сведения об авторах:

Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ТашГТУ.

Тел. +998946042380

Ильёв И.С. – магистр кафедры «Автоматизация производственных процессов» ТашГТУ.

Тел.+998931838684