

УДК 662.612

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКОВАНИЯ ТОПКИ ПАРОВОГО КОТЛА С ФАКЕЛЬНЫМ  
СЖИГАНИЕМ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА КОМПОЗИЦИОННОЕ ЖИДКОЕ  
ТОПЛИВО**

К.К. Паушкина

Научный руководитель: д.т.н., Д.О. Глушков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kkp1@tpu.ru](mailto:kkp1@tpu.ru)

**SLAGGING CHARACTERISTICS OF A STEAM BOILER FURNACE WITH FLARE COMBUSTION  
OF SOLID FUEL WHEN SWITCHING TO COMPOSITE SLURRY FUEL**

K.K. Paushkina

Scientific Supervisor: Dr., D.O. Glushkov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [kkp1@tpu.ru](mailto:kkp1@tpu.ru)

***Abstract.** Two interconnected mathematical models have been developed to describe slagging of a steam boiler furnace at the macro and micro levels. The macro-level model is implemented in Ansys Fluent. Using the fuel characteristics and temperature in the furnace, this model can predict the characteristics of ash formation on heat exchanger tubes when the melting temperature of the mineral part of solid fossil fuel is exceeded. The obtained values of slagging rates are used as initial data in the software implementation of the original Matlab microlevel model. Under conditions of dynamic change in the thickness of the slag layer, this model can evaluate the heat transfer characteristics in the hot gas/slag layer/tube wall/water coolant system. The results showed that switching a coal-fired boiler from a solid fossil fuel to a fuel slurry will improve stability and uninterrupted boiler operation due to a lower slagging rate. The combustion of coal water slurries with petrochemicals compared with coal-water fuel is characterized by higher maximum temperatures in the furnace (13–38% higher) and a lower average growth rate of slag deposits (5% lower), which reduces losses during heat transfer from flue gases to water coolant by 2%.*

**Введение.** Композиционные топлива на основе углеродсодержащих промышленных отходов и сточных вод, в том числе содержащих нефтепродукты, перспективны для практического применения в условиях дефицита и роста цен на традиционные энергетические ресурсы. Вовлечение отходов угле- и нефтепереработки в виде водоугольных топлив (ВУТ) и органоводоугольных топлив (ОВУТ) в промышленную теплоэнергетику позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду не только за счет сокращения площадей полигонов для складирования отходов, но также благодаря уменьшению объема выбросов парниковых газов.

При переводе котлов на непроектные композиционные топлива, содержащие низкосортные горючие компоненты и воду, температура пламени в топке, как правило, снижается. Вместе с тем, проблема шлакования остается актуальной, т.к. добавки к многокомпонентным топливам из числа промышленных отходов и биомассы характеризуются относительно высоким содержанием щелочных и

щелочноземельных металлов. Структура золошлаковых отложений при сжигании ВУТ и ОВУТ может быть многослойной и неоднородной по химическому составу, что осложняет борьбу с этим негативным эффектом стандартными средствами.

Целью данной работы является численное моделирование в рамках двух разработанных взаимосвязанных математических моделей процесса шлакования топки парового котла с факельным сжиганием топлива и исследование влияния параметров процесса горения для трех топлив (угольная пыль, капли ВУТ и ОВУТ) на характеристики шлакования поверхностей нагрева. Разработанный прогностический аппарат является одним из компонентов комплексного алгоритма оценки перспектив практического применения композиционных топлив вместо твердых ископаемых топлив.

**Экспериментальная часть.** *Шлакование топки котла на макроуровне.* Объектом исследования являлась топка парового котла БКЗ-210-140Ф ( $D_{ss}=210$  т/час,  $P_{ss}=14$  МПа,  $T_{ss}=560$  °С). Внутренние поверхности топки размерами  $7424 \times 7808 \times 24$  000 мм полностью экранированы трубами диаметром 60 мм (толщина стенки 5.5 мм) с шагом 64 мм. Горелки расположены в один ярус по углам топки и направлены тангенциально к условной окружности в центре топки диаметром 900 мм. Ширина горелки 670 мм, высота 2270 мм.

Численные исследования выполняли с использованием коммерческого пакета ANSYS FLUENT. Факел топливно-воздушной смеси в топке задавался в модели как двухфазная турбулентная система течений, состоящая из газа и твердой фазы. Для газа формулирование осредненных по времени уравнений сохранения массы, движения и энергии выполнялось с использованием Эйлера подхода с учетом межфазного взаимодействия. Для твердой фазы траектории частиц вычислялись с помощью модели случайного блуждания частиц (Лагранжев подход) с учетом термофореза и времени жизни случайных вихрей. Горение частиц твердой фазы в модели реализовано в виде следующей последовательности стадий: инертный нагрев, испарение влаги, выход летучих веществ и горение коксового остатка. В проведенных численных расчетах была использована сетка с количеством элементов  $0.5 \times 10^6$ .

Численное моделирование процесса горения в топке проводилось для трех топлив: бурый уголь Большесырского месторождения, Канско-Ачинский угольный разрез, Красноярский край, Российская Федерация (далее – уголь); водоугольное топливо (ВУТ) – суспензия на основе угля, состоящая из 50 % мас. угля и 50 % мас. воды; органоводоугольное топливо (ОВУТ) – суспензия на основе угля, состоящая из 45 % мас. угля, 45 % мас. воды и 10 % мас. отработанного моторного масла.

*Шлакование топки котла на микроуровне.* Предполагалось, что труба диаметром  $d = 60$  мм в начальный момент времени  $t = 0$  находится в разогретой газовой среде  $T = T_g$ . В процессе горения топлива ( $t > 0$ ) на поверхности трубы начинает формироваться слой шлака толщиной  $\delta_a$ . Предельное значение толщины слоя шлака задавали равным 7 мм, т.к. дальнейшее увеличение слоя ограничено межтрубным расстоянием [1]. Скорости формирования слоя шлака при сжигании разных топлив принимались по результатам численных исследований в рамках модели топки котла на макроуровне. Температура ( $T_s=560$  °С) и давление ( $P_s=14$  МПа) пароводяной смеси внутри экранных трубах задавали согласно [2].

Численное моделирование шлакования экранных труб при сжигании различных видов топлива выполнено для системы «стальная труба – слой золы – разогретые дымовые газы» при соответствующих теплофизических свойствах веществ и материалов. Размер области решения задачи  $L = 10$  мм; толщина

стенки трубы  $\delta_s = 5.5$  мм; начальная температура стенки  $T_0 = 293$  К; температура дымовых газов  $T_g = 1200\text{--}1500$  К; коэффициент теплоотдачи от пароводяной среды к внутренней стенке трубы  $\alpha_1 = 2 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к внешней стенке трубы  $\alpha_2 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); степень черноты дымовых газов  $\epsilon = 0.8$ ; постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>); массовая скорость формирования золы при сжигании топлива: для угля  $w_m = 38.061 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), для ВУТ  $w_m = 3.255 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), для ОВУТ  $w_m = 3.101 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

**Результаты.** При сжигании в котле угольной пыли в разных точках расчетной зоны температура варьировалась в широком диапазоне – 300–1800 °С. При сжигании ВУТ значения температуры менялись от 200 °С до 1200 °С; при сжигании ОВУТ – от 200 °С до 1350 °С. При этом температура дымовых газов в верхней части топки вблизи ширмовых пароперегревателей имела приблизительно одинаковые значения независимо от типа сжигаемого топлива – 1000–1050 °С. Согласно расчетам, угольное топливо имеет самые высокие пиковые температуры и самую высокую степень выгорания, но в то же время самую высокую массовую скорость роста отложений. Применение ВУТ вместо угля позволяет снижать среднюю скорость шлакования поверхностей топки почти в 12 раз. Однако сжигание ВУТ характеризуется достаточно низкими температурами в топке и низкой степенью выгорания по сравнению с пылеугольным топливом за счет содержания значительной доли воды в составе.

Скорости приращения слоя золы на поверхности трубы для различных видов топлива: уголь – 0.90 мм/мин.; ВУТ – 0.077 мм/мин.; ОВУТ – 0.07 мм/мин.

**Заключение.** Полученные результаты показали, что сжигание ВУТ и ОВУТ вместо угольного топлива сопряжено с некоторым снижением температуры в топке котла (на 450–600 °С). Степень выгорания твердых частиц при сжигании ВУТ была минимальной (94.5 %), хотя ОВУТ выгорало с примерно таким же уровнем конверсии, как и сухой уголь (около 97 %).

Замена угля на суспензионное топливо, вероятно, будет способствовать улучшению стабильности и бесперебойности работы котла в контексте влияния шлакования на эти показатели. За счет более низкой скорости шлакования и меньших площадей, подверженных нарастанию золы, частота проведения очистных мероприятий, а также замены непригодных металлических поверхностей будет меньше. Процесс сжигания ОВУТ, по сравнению с ВУТ, демонстрирует более высокие пиковые температуры в топке (выше на 13–38 %) и более низкую среднюю скорость роста отложений (ниже на 5 %) и сопряженные с этим более низкие потери теплового потока (ниже на 2 %) на теплообменных поверхностях.

*Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-23-00040.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou H., Zhang K., Li Y., Zhang J., Zhou M. Simulation of ash deposition in different furnace temperature with a 2D dynamic mesh model // Journal of the Energy Institute. – Elsevier, 2019. – Vol. 92., No 6. – P. 1743–1756.
2. Thermal calculation of boilers (normative method), third edition, revised and expanded. – St. Petersburg, 1998. – 258 p.