

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ КОТЛО- И РЕАКТОРОСТРОЕНИЯ АЛТГТУ

Г.П. Пронь, И.Д. Фурсов

Кафедра занимается исследованием, внедрением и разработкой методик расчета энергетических котлов с кипящим слоем с 1970 года. Работы ведутся совместно с котлостроительными заводами, научно-исследовательскими и проектными институтами и промышленными организациями.

Для глубокого и качественного изучения теплофизических процессов, происходящих при сжигании твердого топлива в кипящем слое, а также надежного и экономичного аппаратного оформления топочных устройств с кипящим слоем в лабораториях кафедры созданы и функционируют следующие установки:

- пилотная огневая установка мощностью 0,5 МВт; два лабораторных огневых стенда с кипящим слоем; крупномасштабная ( $2\text{ м}^2$ ) изотермическая модель топки ЦКС; плоская изотермическая модель кипящего слоя; установка для термообработки (до  $500^\circ\text{C}$ ); плоская изотермическая модель ЦКС; модель пневмозатвора с кипящим слоем; растопочное устройство «kozyрёк»; аэродинамическая установка для крупномасштабных моделей газозаходов; аэродинамический стенд для изучения теплообмена и загрязнения поверхностей нагрева;

- лаборатория физико-технического анализа топлива; лаборатория химического анализа дымовых газов; используются лаборатории других кафедр университета и предприятий.

Проводятся исследования и ведутся разработки по следующим основным проблемам:

- оптимизация системы ожигения слоя (конструкция газораспределительной решетки, колпачков, сепаратора слива слоя, параметры газовых струй, равномерность ожигения);
- надежность методов растопки топочного устройства;
- эффективность выгорания твердого топлива (механизм образования механического недожога, возврат уноса, способы дожигания);
- применение грануляции топлива и уноса;

- сжигание нетрадиционных топлив в кипящем слое (отходы цветной металлургии, деревообработки, химпромышленности, сельскохозяйственные отходы, ил водоотстойников и др).

По данным вопросам выполнены теоретические проработки, проведены лабораторные и промышленные исследования и на их основе разработаны и внедрены аппараты с кипящим слоем в различных отраслях промышленности.

В настоящее время наблюдается резкое сокращение использования на ТЭС мазута с заменой его природным газом и твердым топливом. Так как увеличение объемов добычи угля неизбежно приведет к снижению его качества, то перед теплоэнергетикой встают проблемы, связанные с необходимостью совершенствования технологий его сжигания и снижения вредных выбросов в атмосферу.

В связи с этим представляется, что ближайшее будущее теплоэнергетики будет связано с широким применением топок с кипящим слоем. Использование технологии сжигания топлива в кипящем слое позволяет в принципе разрешить такие противоречивые проблемы энергетики, как повышение эффективности сжигания влажного и высокозольного топлива и снижение выбросов золы, окислов азота и серы, а также позволяет создавать более маневренные котлоагрегаты и увеличить степень утилизации минеральной части топлива. При этом важно подчеркнуть, что помимо новых проектных разработок установки кипящего слоя могут применяться для модернизации и реконструкции существующих котельных агрегатов с угольными топками.

Вместе с тем в процессе стендовых и опытно-промышленных испытаний выявился ряд существенных недостатков сжигания в кипящем слое. Основным из них является повышенный унос золы и недогоревшего топлива. Концентрация твердых частиц в дымовых газах достигает  $20 - 50 \text{ г/м}^3$ . Для снижения на  $50 - 80 \%$  выбросов диоксида серы в топку с кипящим слоем вводят известняк в количестве  $300 - 400 \text{ кг/т}$  сжигаемого топлива,

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ КОТЛО- И РЕАКТОРОСТРОЕНИЯ АЛТГТУ

что дополнительно увеличивает запыленность дымовых газов. Одним из путей устранения этого недостатка является разработанная на кафедре котло- и реакторостроения АлтГТУ технология сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое в виде гранул [1]. По экологической чистоте эта технология не имеет аналогов, не уступая другим технологиям сжигания твердого топлива по остальным параметрам (рис. 1).

Основная идея этой технологии заключается в гранулировании смеси топлива с золой перед подачей ее в топку. Горение гранул в топке кипящего слоя при этом может происходить в широком диапазоне скоростей газа (от 1,5 до 9 м/с) при температуре 800 – 900 °С и с коэффициентом избытка воздуха 1,1 – 1,2.

Топливо из бункера дробленого угля подается в мельницу. Туда же транспортером подается зола из слоя в виде выгоревших гранул, унос из золоуловителей и известняк из бункера. Охлаждение выгоревших гранул до необходимой температуры производится в специальной камере рециркулирующими газами. Размолотая и перемешанная смесь топлива, уноса, золы, известняка и воды подается в гранулятор, где формируются гранулы диаметром 4 - 6 мм. Содержание золы в гранулах может достигать 70 – 80 %.

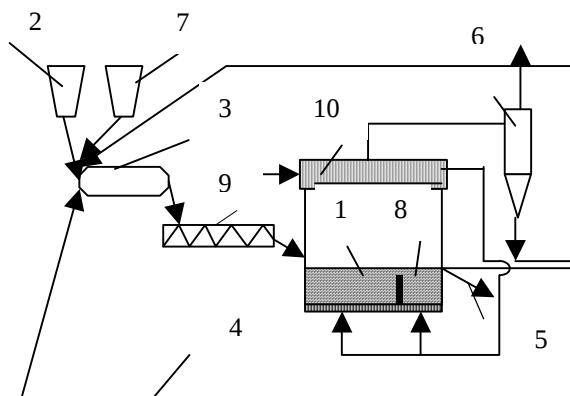


Рис. 1. Технологическая схема сжигания гранулированного топлива в кипящем слое: 1-топка кипящего слоя; 2 - бункер сырого угля; 3 - мельница; 4 - транспортер гранул; 5 - вывод гранул; 6-золоуловитель; 7 - бункер известняка; 8 - охладитель выгоревших гранул; 9 - гранулятор; 10 - воздухоподогреватель

Топливо в гранулах распределено по объему, в связи с чем реакции окисления идут в основном внутри гранулы. Отсутствие развитой наружной поверхности горения приводит к тому, что поверхность гранул практи-

чески не разрушается при горении, вследствие чего унос недогоревшего топлива и золы значительно снижен. Высокая зольность гранул, предусмотренная технологией, позволяет использовать низкосортные топлива, сжигание которых в традиционных топочных устройствах невозможно.

Добавка известняка при изготовлении гранул позволяет связывать серу в процессе горения топлива. Эксперименты показывают, что просто разбавление топлива золой приводит к снижению выбросов окислов серы в 1,4 раза, добавление же кроме золы еще кальция (в составе известняка) позволяет снизить выбросы окислов серы в 3 - 4 раза. При этом кальций используется в 1,5 - 2 раза эффективнее, чем в иных технологиях: выгоревшие гранулы возвращаются на размол, при котором поверхность частиц известняка частично освобождается от  $\text{CaSO}_4$  и может снова связывать окислы серы.

Частицы топлива распределены в объеме гранул и доступ кислорода к топливу затруднен. Это создает восстановительную среду внутри гранулы и снижает образование окислов азота.

Экспериментально определено, что при сжигании гранулированного топлива в кипящем слое выбросы окислов азота составляют менее 150 - 200 мг/м<sup>3</sup>. Выгоревшие пористые гранулы - практически готовый строительный материал. Это выгодно отличает данный способ от пылеугольного сжигания и от сжигания в обычном или циркулирующем кипящем слое, где утилизация мелкодисперсной золы представляет собой серьезную проблему.

Гранулированное твердое топливо перспективно и для применения в парогазовых энергетических установках с внутрицикловой газификацией, а также для атмосферных газификаторов с подачей газа для сжигания в обычных котельных установках. Подготовка топлив для газификации в виде гранул, содержащих 70 – 80 % золы и 30 – 20 % топлива, позволяет эффективно использовать газификаторы с кипящим слоем. Гранулы в слое не разрушаются, в результате вынос золы в тракты ПГУ существенно снижается, что позволяет упростить конструктивные решения и повысить надежность работы газогенерирующего оборудования.

Результаты выполненных к настоящему времени экспериментальных работ подтверждают целесообразность использования описанного метода в котельнотопочной технике. Кафедрой котло- и реакторостроения Алтайского государственного технического универ-

ситета совместно с Таганрогским котельным заводом разработан проект реконструкции ряда устаревших котлов.

В частности, в 1993 г. предложенная технология была внедрена при разработке проекта реконструкции котла ТП-230 на Невскай ГРЭС Ростовэнерго. Основные положения этой работы могут быть использованы при техническом перевооружении и других ТЭС с аналогичными котлами. Так, на Барнаульской ТЭЦ-3 ведутся работы по внедрению технологии дожигания гранулированного уноса из котла кипящего слоя и соседних пылеугольных котлов.

Влияние компонентного состава топливных гранул и режимов их сжигания на связывание оксидов серы и азота исследовано в лабораториях кафедры Котло- и реакторостроения АлтГТУ.

Сжигание единичных гранул проводилось в кварцевом реакторе с фиксированной температурой и расходом воздуха. Влияние фоновых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе устранялось введением специальных поглотителей в линию подачи воздуха.

Концентрация присадок к топливным гранулам изменялась в диапазоне от 0 до пятикратного превышения стехиометрического соотношения  $\text{Ca:S}$ .

В качестве серосвязывающих присадок использовалась зола, химически чистый карбонат кальция с содержанием основного вещества не менее 98 %, техническая известь, шлам системы водоподготовки.

Количество вводимой в гранулы технической извести рассчитывалось с учетом содержания активного вещества (39,5 % по  $\text{Ca}$ ) и воды (сухой остаток 49,5 %). Использование в качестве присадки шлама системы водоочистки также требовало пересчета его количества на содержание активного вещества и воды.

Присадку в виде порошка ( $\text{CaCO}_3$ ) или пасты (известь, шлам) дозировали на аналитических весах и вводили в топливо или смесь топлива и золы, тщательно перемешивая, добивались равномерного распределения добавки в смеси. Использование сухих присадок требовало добавления к формовочной смеси воды в количестве 20% от массы смеси. При введении присадок в виде паст влажность формовочной смеси составляла примерно 20 %, за счет собственной влаги присадок.

Результаты опытов показали, что использование в качестве присадки  $\text{CaCO}_3$  по-

зволяет значительно повысить степень связывания серы как на угольных, так и на угольно-зольных гранулах, до 0,78 и 0,82 соответственно (рис. 2).

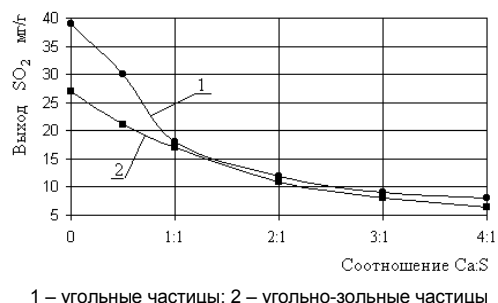


Рис. 2. Зависимость выхода  $\text{SO}_2$  от содержания  $\text{CaCO}_3$  в топливных гранулах

Использование в качестве присадки технической извести позволило повысить степень связывания серы до 0,88 на угольных и до 0,9 на угольно-зольных гранулах при четырехкратном превышении стехиометрически необходимого количества кальция.

Использование в качестве присадки шлама системы водоочистки (содержание активного вещества в пересчете на  $\text{Ca}$  составляло 35,9%) в угольные и угольно-зольные гранулы в соотношении  $\text{Ca:S}$ , равном 3:1, позволило повысить степень связывания серы до 0,61 и 0,74 соответственно.

Влияние температуры на степень связывания серы исследовалось на угольно-зольных гранулах с использованием в качестве присадки технической извести. Диапазон изменения температур: от 800 до 1000 °C (рисунок 3).

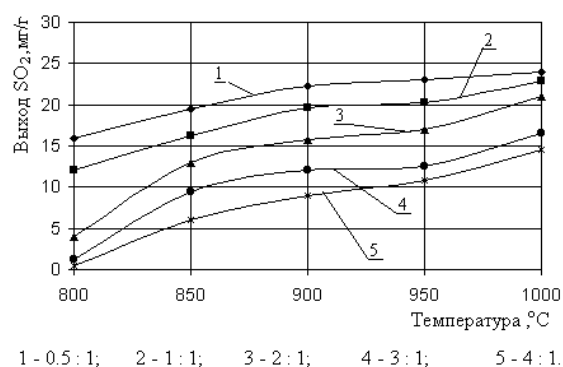


Рис. 3. Зависимость выхода  $\text{SO}_2$  от температуры реактора и соотношения  $\text{Ca:S}$  в угольно-зольных топливных гранулах

Из рисунка видно, что наиболее активна присадка при температуре 800 °C; степень связывания серы при трех-, четырехкратном превышении стехиометрического соотноше-

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КИПАЮЩЕГО СЛОЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ КОТЛО- И РЕАКТОРОСТРОЕНИЯ АЛТГТУ

ния Ca: S достигает 0,97 - 0,99. С повышением температуры до 900 - 950 °С, при тех же соотношениях Ca:S, наблюдается снижение степени связывания до 0,59 - 0,78.

Зависимость выхода оксидов серы от стехеометрического соотношения Ca:S показана на рисунках 4 и 5.

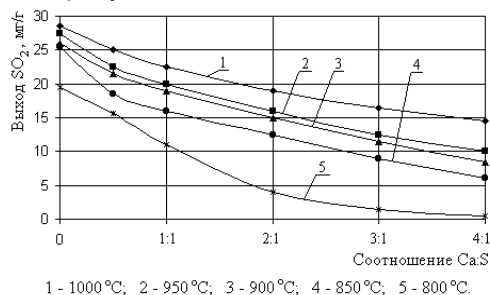


Рис. 4. Зависимость выхода  $\text{SO}_2$  от содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в угольно-зольных топливных гранулах при различных температурах

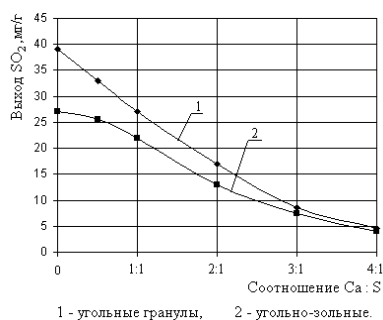


Рис. 5. Зависимость выхода  $\text{SO}_2$  от содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в топливных гранулах

Зависимость выхода оксидов серы от зольности гранул, которая составляла 40 – 80 %, показана на рисунке 6.

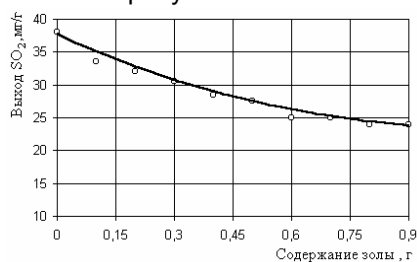


Рис. 6. Зависимость выхода  $\text{SO}_2$  от содержания зольной присадки в грануле

Ввод зольной добавки снижает и выход оксидов азота на 20 – 30 %, а добавление присадок способствует снижению выхода  $\text{NO}_x$  еще на 10 – 25 %. На рисунке 7 представлены опытные данные по влиянию температуры и состава гранул на выход  $\text{NO}_x$ . Присадки вводили в количестве, превышающем стехеометрически необходимое в три раза.

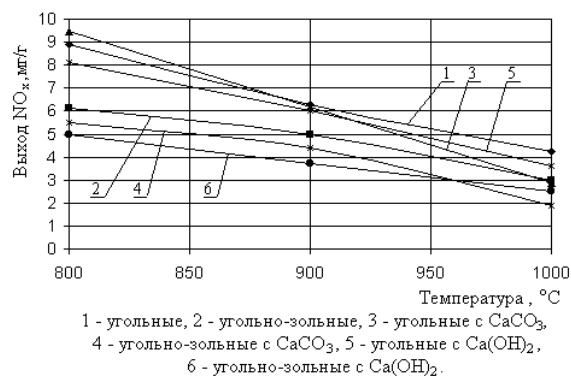


Рис. 7. Зависимость выхода  $\text{NO}_x$  от температуры реактора и состава гранул

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование технологии сжигания гранулированного твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое дает возможность существенно снизить уровень выбросов в атмосферу оксидов серы и азота по сравнению с традиционными технологиями, в том числе и сжиганием в кипящем слое негранулированного топлива, и является поэтому одним из наиболее перспективных направлений при решении этой проблемы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малкин Б.М., Пронь Г.П., Фурсов И.Д., Гусаченко Л.К., Зарко В.Е. Установка для сжигания гранулированного топлива в кипящем слое // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки. Аналитические обзоры. - Новосибирск, 1995.