РЕКОНСТРУКЦИЯ КОТЛОВ КВ-ТС-20 ДЛЯ СЖИГАНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ В ФОРСИРОВАННОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Сидоров А.М., к.т.н., Скрябин А.А., к.т.н., Мелешин А.А., Усольцев Н.В.,
НИЦ ПО «Бийскэнергомаш», г. Барнаул

Проблема вовлечения низкосортных углей в топливный баланс России всегда была актуальной. Зачастую их сжигание в традиционных пылеугольных топках без подсветки мазутом и ряда других дорогостоящих мероприятий не представляется возможным. Слоевые топки так же не удовлетворяют условиям эффективного сжигания. Оптимальным вариантом в данном случае является применение технологий кипящего слоя.

Одним из перспективных направлений является технология форсированного кипящего слоя (ФКС) [1, 2]. Она обеспечивает стабильное горение в объёме слоя и в надслоевом пространстве, позволяет сжигать практически любые топлива и горючие отходы при относительно небольших температурах (800…1000°С).

Основным отличием ФКС от классического пузырькового кипящего слоя является высокая (5…10 м/с) скорость ожижения - форсировка слоя. При этом, низкий мехнедожог обеспечивается благодаря расширению сечения топочного надслоевого объёма кверху. Это способствует возврату крупных частиц в слой (рециркуляции) и уменьшению выноса мелких частиц. ФКС не имеет погружённых в слой поверхностей нагрева и связанных с этим проблем. Надёжная работа экранных труб в зоне динамического воздействия слоя обеспечивается применением эффективных средств защиты от абразивного износа.

Форсировка воздухораспределительной решётки:

- обеспечивает малые габариты реактора кипящего слоя и, следовательно, благоприятные условия для модернизации и реконструкции существующего котельного оборудования, небольшую стоимость и малые расходы на ремонт;
- позволяет сжигать топливо более грубого дробления, по сравнению с классическим кипящим слоем. Для бурых углей максимальный размер куска может достигать 30-50 мм;
- обеспечивает более надёжную работу слоя по условиям залегания и, следовательно, расширяет диапазон регулирования нагрузки.

Форсированный кипящий слой может работать в режиме газификации топлива при фактических избытках воздуха $\alpha < 1{,}0$. Величина избытка определяется калорийностью и видом топлива и может составлять 0,3…0,7 (для бурых углей больше). Это позволяет ещё более уменьшить габариты реактора и снизить энергозатраты на подачу воздуха под решётку. Высвободившийся воздух увеличивает (до 70%) долю вторичного дутья, необходимого для дожигания уноса и продуктов газификации, и обеспечивает возможность организации активного вихревого движения топочных газов, способствующего повышению эффективности сжигания топлива. Теплонапряжение воздухораспределительной решётки в расчёте на поданное топливо может достигать 10-15 МВт/м^2.

Технология ФКС по форсировке воздухораспределительной решётки близка к циркулирующему кипящему слою и обладает следующими преимуществами:

- возможностью встраивания котлов ФКС в типовые котельные ячейки;
- отсутствием шлакования поверхностей нагрева;
- хорошими показателями топок ФКС, по сравнению с механизированными слоевыми топками, по стоимости, сроку службы, надёжности и ремонтопригодности;
- отсутствием мельничного оборудования;
- возможностью сжигания широкого спектра топлив и горючих отходов;
- широкими возможностями регулирования параметров работы котлов ФКС и высокой стабильностью несения нагрузки, что позволяет использовать их совместно с паровыми турбинами;
- высокими экологическими показателями по выбросам оксидов серы и азота.

На основе технологии ФКС осуществлена реконструкция ряда котлов КВ-ТС-20 по схеме, представленной на рисунке.

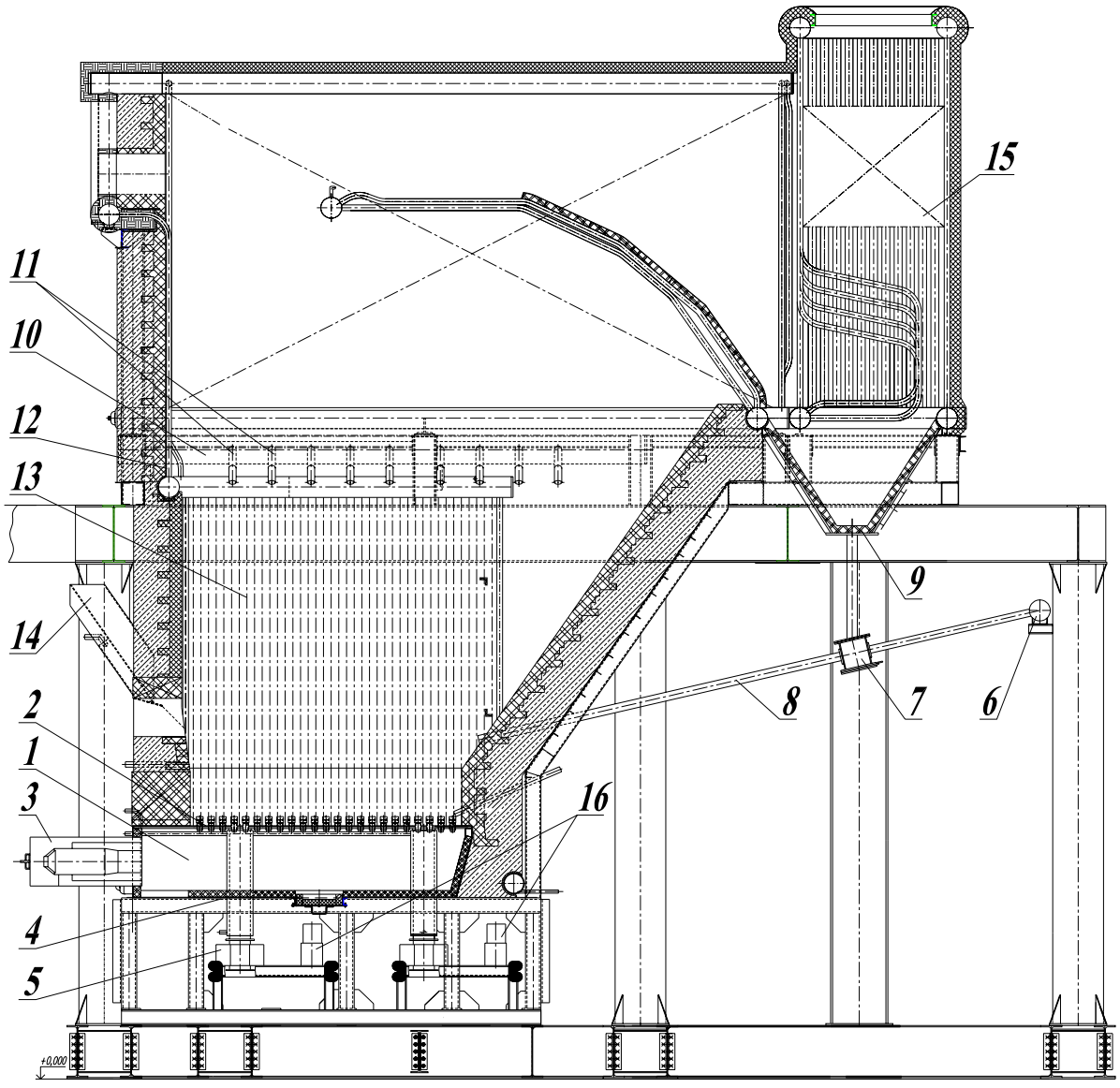

Рисунок – Котел КВ-ТС-20ФКС.

Реконструкция включала в себя:

- установку под котлом топки ФКС, состоящей из водоохлаждаемой решетки (поз.2) с воздухораспределительными колпачками и воздушного короба (поз.1). При этом, топочная камера условно разделяется на два объема: верхний, образованный топочным блоком котла КВ-ТС-20, и нижний, образованный дополнительными поверхностями нагрева, а, также, топкой ФКС и фронтовой и задней стенами, выполненными из кирпича;
- монтаж системы возврата уноса (СВУ). Первая ступень возврата уноса образуется за счет расширения топочной камеры и улавливает вылетающие из слоя крупные частицы топлива, которые по наклонным боковым экранам (поз.13) дополнительной поверхности и наклонной задней стене скатываются в слой на дожигание. Вторая ступень возврата уноса организована из-под конвективного блока котла. Частицы, уносимые газовым потоком из топки, при развороте газов перед фестоном конвективного пучка, оседают на передней стенке золового бункера (поз.9) и частично улавливаются в конвективном пучке (поз.15), затем попадают в золовой бункер и с помощью эжекторов (поз.7) по трубам системы возврата уноса (поз.8) подаются в надслоевое пространство топки;
- установку системы вторичного дутья, состоящей из воздушного короба (поз.10) и сопл вторичного дутья (поз.11). Сопла вторичного воздуха устанавливаются на боковых стенах котла, что позволяет организовать активную аэродинамику топки и уменьшить потери с химическим и механическим недожогом;
- установку системы слива слоя и удаления шлака, которая состоит из труб слива слоя (поз.4) и устройств удаления шлака и золы (поз.5) с приводами (поз.16). Система предназначена для регулирования высоты слоя во время работы котла путем периодического вывода золы, шлака и породы, накапливающихся в слое, и слива слоя при остановке котла на ремонт;
- установку системы растопки котла, состоящей из растопочной камеры (поз.3) и растопочного блока, включающего в себя: бак жидкого топлива, фильтры очистки, насос для перекачивания топлива и необходимую арматуру. Растопка котла осуществляется прогревом кипящего слоя горячими газами, образующимися при сгорании жидкого топлива в растопочной камере. Воспламенение растопочного топлива производится с помощью запально-защитного устройства, работающего на горючем газе (например, пропане);
- установку дополнительной система автоматического регулирования топки кипящего слоя, предусматривающей все штатные защиты и аварийную сигнализацию. Она обеспечивает пуск котла из холодного состояния, горячего

резерва и работу котла в автоматическом режиме с дистанционным управлением. Регулирование нагрузки котла осуществляется изменением расхода топлива и воздуха по режимной карте. Нижняя граница диапазона регулирования определяется надежностью ожижения кипящего слоя;

- установку системы ввода топлива. Уголь из бункера-накопителя по двум течкам поступает на питатели топлива ПТЛ-600, затем через короба ввода топлива (поз.14) распределяется на слой. Короба ввода топлива установлены с фронта котла, на высоте 1300 мм над воздухораспределительной решеткой, и представляют собой сварные конструкции из листов металла толщиной 5…8 мм. В каждый короб подается воздух, который охлаждает разгонную плиту, подверженную нагреву излучением топки. Выходя через щелевое отверстие со скоростью около 45 м/с, воздух обеспечивает пневмозаброс топлива равномерно по воздухораспределительной решетке;
- установку фронтового экрана.

Ниже представлены результаты испытаний трех реконструированных котлов при сжигании Бородинского и Берёзовского бурых углей и смеси (50х50%) Берёзовского угля со шлаком. Методика испытаний соответствует требованиям и рекомендациям [3…5].

Полученные результаты приведены ниже в таблице. Указанные значения доли первичного воздуха определялись как отношение расхода воздуха под слой к суммарному расходу воздуха в котёл, а теплонапряжения воздухораспределительной решётки - как отношение тепловой нагрузки котла к площади решётки. Избыток воздуха в слое рассчитывался на всё подаваемое в котёл топливо.

Таблица – Результаты испытаний котлов КВ-ТС-20ФКС

№ п/п	Наименование показателей	**Котёл ст.№3, Центральная котельная, п. Новая Чара, Читинская область**	**Котёл ст.№7, Центральная котельная, г. Северобайкальск, Бурятия**		**Котёл ст.№1, Котельная МУП ЖКХ, г.Лесосибирск, Красноярский край**
	I. Топливо	Бородинский 2Б	Березовский 2Б	Смесь 50+50%, Березовский 2Б+Шлак	Березовский 2Б
1.	Низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (ккал/кг)	16,325 (3900)	16,32 (3899)	12,99 (3103)	15,865 (3790)
2.	Элементарный состав топлива на рабочую массу:				
3.	влажность, %	31,0	33,7	29	36,12
4.	зольность, %	7,0	5,1	23,9	3,54
5.	содержание углерода, %	45,77	43,2	34,81	42,34
6.	содержание серы, %	0,23	0,2	0,18	0,2
7.	содержание водорода, %	2,85	3	2,75	3
8.	содержание азота, %	0,57	0,4	0,36	0,4
9.	содержание кислорода, %	12,58	14,4	9	14,4
	II. Параметры теплоносителя				
1.	Расход воды через котел, $м^3/ч$	345	250	250	345
2.	Температура воды на выходе из котла, ºС	128	131	114	116
3.	Температура воды на входе в котел, ºС	70	51	50	58
4.	Тепловая нагрузка котла, МВт (Гкал/ч)	23,25 (20,00)	23,25 (20)	18,6 (16,00)	23,25 (20)
	III. Уходящие газы				
1.	Концентрация CO_2, %	11,1	10,3	9,3	13,0
2.	Концентрация O_2, %	9,1	9,6	10,8	6,7
3.	Концентрация CO (приведено к α =1,4), $мг/м^3$	392,9	293,7	379,3	312,4
4.	Концентрация NO_x (приведено к α =1,4), $мг/м^3$	289,1	303,9	392,8	378,8

№ п/п	Наименование показателей	**Котёл ст.№3, Центральная котельная, п. Новая Чара, Читинская область**	**Котёл ст.№7, Центральная котельная, г. Северобайкальск, Бурятия**		**Котёл ст.№1, Котельная МУП ЖКХ, г.Лесосибирск, Красноярский край**
5.	Коэффициент избытка воздуха, $\alpha_{ух}$	1,76	1,85	2,05	1,47
6.	Температура, ºС	171	185	163	198
	IV. Очаговые остатки				
1.	Содержание горючих в уносе, %	26,52	10	20,8	25,3
2.	Содержание горючих в шлаке (сливе слоя), %	0	0	0,5	0
3.	Доля уноса золы с продуктами сгорания	1	1	0,8	1
	V. Воздушный баланс				
1.	Расход воздуха под слой, нм3/ч	22000	28090	22467	20100
2.	Доля первичного воздуха	0,57	0,77	0,77	0,63
3.	Расход воздуха на СВУ, нм3/ч	1770	2100	1950	1360
4.	Расход воздуха на пневмозаброс топлива, нм3/ч	810	490	460	800
5.	Расход воздуха на вторичное дутье, нм3/ч	14200	5660	4350	9400
6.	Суммарный расход воздуха в котёл, нм3/ч	38780	36340	29227	31660
7.	Избыток воздуха в топке	1,54	1,4	1,17	1,21
	VI. Кипящий слой				
1.	Площадь воздухораспределительной решетки, $м^2$	3,9	3,85	3,85	3,65
2.	Теплонапряжение решетки, $МВт/м^2$	5,96	6,04	4,83	6,37
3.	Скорость ожижения, м/с	8,23	10,24	8,37	7,82
4.	Избыток воздуха в слое, отнесён к полному расходу топлива	0,874	1,08	0,9	0,8
5.	Сопротивление слоя, Па	5000	4000	4200	4600

№ п/п	Наименование показателей	**Котёл ст.№3, Центральная котельная, п. Новая Чара, Читинская область**	**Котёл ст.№7, Центральная котельная, г. Северобайкальск, Бурятия**		**Котёл ст.№1, Котельная МУП ЖКХ, г.Лесосибирск, Красноярский край**
6.	Температура кипящего слоя, ºС	980	960	960	935
	VII. Тепловой баланс				
1.	Потеря тепла с уходящими газами, %	10,72	13,37	11,37	11,52
2.	Потери тепла от химического недожога, %	0,15	0,11	0,13	0,12
3.	Потери тепла от механического недожога, %	4,07	1,03	14,29	1,99
4.	Потери тепла в окружающую среду, %	0,5	1,00	1,25	0,5
5.	КПД котлоагрегата брутто по обратному балансу, %	84,6	84,49	72,96	85,9
6.	Расход топлива в котёл, кг/ч	6062	6072	7067	6143
7.	Удельный расход натурального топлива, кг на 1Гкал выработанного тепла	303,1	303,6	441,7	307,1
8.	Удельный расход условного топлива, кг на 1Гкал выработанного тепла	168,9	169,1	195,8	166,3

Проведенные испытания показали следующее.

Сжигание Бородинского и Березовского углей в котлах КВ-ТС-20, реконструированных по технологии форсированного кипящего слоя, характеризуется высокой эффективностью. На номинальной нагрузке КПД брутто составил 84,5…85,9%. Реконструированные котлы могут эксплуатироваться в диапазоне изменения нагрузки 50…100%.

При сжигании малозольных бурых углей (в опытах рабочая зольность не превышала 7%) наблюдался полный вынос вводимой в котёл золы ($a_{ун}$ =1,0). Если в слой не добавлять инертную насадку, последний будет постепенно выноситься из котла со скоростью, определяемой, главным образом, скоростью истирания насадки.

В опытах по сжиганию Берёзовского угля в смеси со шлаком наблюдалось накопление массы слоя, связанное с тем, что поступление топливной золы превышает вынос твёрдой фазы, обусловленный истиранием этой золы и насадки. Для сохранения высоты слоя требуется периодическое включение механизмов слива слоя. Продолжительная работа котла в таком режиме приводит к полной замене инертного материала (насадки) золой топлива.

В проведенных опытах избытки воздуха в слое, отнесённые на всё поданное топливо, составили 0,8…1,08. С учётом отвеивания угля при пневмозабросе, в процессе подачи топлива на слой, фактические избытки будут выше. При фиксированных в экспериментах скоростях ожижения слоя (7,8…10,2 м/с) и типичной крупности дробления в слой попадает около 85% от вводимого в котёл угля. Следовательно, фактические избытки воздуха в слое составляют около 0,94…1,27. Это означает, что в испытанных котлах горение топлива в кипящем слое происходит при соотношениях топливо-воздух, равных стехиометрическому, то есть - в режиме максимального тепловыделения. Вместе с тем, перегрев слоя не наблюдался, поскольку повышение его температуры предотвращается отводом тепла боковыми экранами дополнительной поверхности. В результате, измеренные в опытах температуры составили 980…935 ^{O}C, что не превышает значений, опасных по условиям спекания слоя.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1. В результате реконструкции водогрейных котлов КВ-ТС-20 по технологии форсированного кипящего слоя (ФКС) получено надёжное экономичное оборудование, позволяющее сжигать бурый уголь при КПД брутто 84,5…85,9% в диапазоне нагрузок 50…100%.
2. Утилизация шлака слоевых котлов (калорийность которых может достигать 1500…2000 ккал/кг и более) в ФКС характеризуется существенной

экономией топлива. Так, при разбавлении Березовского угля наполовину шлаком, обеспечивается нагрузка 16 Гкал/ч. При этом экономия топлива составляет около 50%. Подмешивание шлака при сжигании малозольных бурых углей устраняет необходимость добавления инертного материала в кипящий слой.

3. Дальнейшее усовершенствование схемы реконструкции котлов типа КВ-ТС-20 может осуществляться в направлении снижения избытков воздуха в слое. При сохранении скоростей ожижения и крупности дробления топлива это достигается пропорциональным уменьшением площади воздухораспределительной решётки и расхода первичного воздуха. Данное мероприятие позволит: а – снизить затраты электроэнергии на высоконапорное дутьё; б – реализовать двухступенчатое сжигание, характеризующееся низкими выбросами оксидов азота; в – вывести экраны дополнительной поверхности нагрева из зоны динамического воздействия кипящего слоя и таким образом гарантировать отсутствие абразивного износа без применения средств защиты; г – поднять уровень температур в топке и, следовательно, интенсифицировать лучистый теплообмен и повысить эффективность выгорания топлива.

Литература

1. Сидоров А.М. Исследование и разработка топок и котлов с низкотемпературным кипящим слоем. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Барнаул, 2002.
2. Сидоров А.М., Скрябин А.А., Медведев А.И., Щербаков Ф.В. Опыт внедрения котлов малой мощности с топками форсированного низкотемпературного кипящего слоя. - Новости Теплоснабжения, 2009, №1.
3. Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А Теплотехнические испытания котельных установок. - М.: Энергия, 1989.
4. Пеккер Я.Л. Технические расчеты по приведенным характеристикам. - М.: Энергия. 1977.
5. ОСТ 108.030.132-80 Котлы паровые стационарные. Методы испытаний.

Рисунок – Котел КВ-ТС-20ФКС.

1 – топка ФКС; 2 – воздухораспределительная решетка; 3 – растопочная камера; 4 – труба слива слоя; 5 – устройство удаления шлака; 6 – коллектор подачи воздуха на СВУ; 7 – эжектор; 8 – труба СВУ; 9 – золовой бункер; 10 – короб вторичного воздуха; 11 – сопла острого дутья; 12 – фронтовой экран топки; 13 – боковой экран дополнительной поверхности нагрева; 14 – короб ввода топлива; 15 – конвективный блок котла; 16 – привод устройства удаления шлака