

С.А. Казимиров, М.Н. Башкова, К.С. Слаженева

Сибирский государственный индустриальный университет

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ВИХРЕВЫМИ ТОПКАМИ
ДЕЙСТВУЮЩИХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ***

В соответствии с существующей классификацией котельные агрегаты малой и средней производительности разделяют по виду вырабатываемого теплоносителя (вода или пар). В свою очередь, паровые котлы малой и средней производительности и, соответственно, низкого давления различают по конструкции: вертикально-цилиндрические и вертикально-водотрубные. Последние имеют паропроизводительность от 4 до 25 т/ч и давление до 1,4 МПа. Водогрейные котлы классифицируют на чугунные и стальные агрегаты. Чугунные (в силу хрупкости) выдерживают давление до 0,4 МПа. Температура воды на выходе – до 115 °С, тепловая мощность – до 1,5 Гкал/ч. Среди стальных можно выделить водогрейные котлоагрегаты малой (сравнимые по характеристикам с чугунными) и большой (до 20 Гкал/ч, с температурой воды на выходе до 150 °С) теплопроизводительности.

При работе на твердом топливе вышеперечисленные агрегаты оснащены слоевыми топками со всеми присущими им достоинствами и недостатками, к которым (кроме упомянутых в работе [1] невозможности использования спекающихся углей и углей с легкоплавкой золой и высокой степени загрязнения окружающей среды) необходимо отнести:

- низкую надежность колосникового полотна и забрасывателей;
- обеспечение проектной эффективности сжигания только при работе на сортированном угле (фракции 6 – 24 мм);
- ограничения по нагрузке, обусловленные в том числе и условиями горения топлива;
- снижение экономичности и надежности слоевых котлов при ухудшении качества углей.

Для выявления показателей тепловой работы котлов со слоевыми топками был произведен расчет по нормам [2]. В табл. 1 приведены результаты теплового расчета паровых котлов производительностью 4 – 25 т/ч и давлением вырабатываемого пара 0,7 МПа при использо-

вании Кузнецкого угля марки СС, теплота сгорания которого 23,4 МДж/кг. Данные для расчетов приняты по работе [3]. В табл. 2 приведены результаты работы тех же котлов при использовании промпродукта Кузнецкого угля марки «Ж» (теплота сгорания 17,71 МДж/кг, зольность $A^r = 39,5$ %). Расчеты для водогрейных котлов приведены в табл. 3.

При использовании нормативного метода изменение зольности топлива (0,78 и 2,20 % соответственно) не оказывает существенного влияния на потери тепла от механического недожога q_4 , а следовательно, и КПД котла. Следствием этого является увеличение расхода топлива более, чем на 30 %, и сохранение расхода условного топлива (табл. 1, 2). Проведенные измерения на реально действующих котлах показали, что КПД оказываются значительно ниже расчетных.

На рис. 1 [4] показаны потери тепла с механическим недожогом q_4 (в шлаке и уносе) для слоевых топок: с ростом теплонапряжения топки (то есть нагрузки котла) значение q_4 увеличивается. В случае сжигания бурых углей значение q_4 составляет 10 % при номинальном теплонапряжении топочного объема 350 кВт/м³. При сжигании каменных углей величина q_4 выше, чем при сжигании бурых, и достигает 20 – 40 %.

Известными способами повышения эффективности слоевого сжигания угля являются применение возврата уноса и острого дутья, с компоновкой сопел на задней стенке топки. Однако при этом решается только задача снижения потерь тепла с химическим недожогом и механическим недожогом в уносе [4].

Использование вихревых технологий обеспечивает стабильность процесса горения угля и существенное снижение недожога топлива [4 – 6].

В вихревых (циклонных) топках поток воздуха, несущий горящие частицы топлива, движется по кругу или по спирали (это достигается за счет конструкции топки или с помощью дополнительных потоков воздуха). При этом топливо сначала высушивается, потом газифицируется и сжигается. По основным показателям (стабильность горения, полнота выгорания

*Работа проведена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки на выполнение СибГИУ научно-исследовательской работы № 2555.

Т а б л и ц а 1

Результаты теплового расчета паровых котлов при использовании Кузнецкого угля марки СС

Паропроизводительность, т/ч (кг/с)	2,5(0,69)	4,0(1,11)	6,5(1,81)	10,0(2,78)	25,0(6,94)
Теплопроизводительность, МВт	1,62	2,60	4,20	6,46	16,20
Потери, %:					
с теплом шлака q_6	0,35		0,28		
от наружного охлаждения q_5	3,6	2,8	2,3	1,7	1,2
с механическим недожогом q_4	12,5		15,0		
с химическим недожогом q_3	1,0				
с уходящими газами q_2	6,05			6,50	6,97
Температура уходящих газов, °С	160			170	180
КПД, %	76,5	77,3	75,4	75,5	75,6
Расход натурального топлива, кг/ч	288,5	456,8	761,4	1169,0	2921,4
Расход условного топлива, кг у.т./ч	230,4	364,8	608,1	993,6	2333,2

топлива, выбросы вредных веществ) вихревые топки практически не уступают топкам кипящего слоя. В основном топки с низкотемпературным вихревым сжиганием (НТВС) используют для сжигания бурых и каменных углей, горючих сланцев, торфа, углесодержащих и древесных отходов (влажность до 60 %, размер частиц до 30 мм), отходов сельского хозяйства (подсолнечной, гречневой, рисовой лузги и др.).

Некоторые вихревые топки позволяют получить из углей или древесных отходов генераторный газ с достаточно высокой калорийностью, их используют для газификации топлива. С помощью таких топок котельную, работающую на природном газе, можно приспособить для работы на топливе низкого сорта или отходах. В большинстве случаев реконструкция котла для работы с НТВС не требует изменений в тепловой схеме и замены тягодутьевых устройств [6].

По данным работы [7] при реконструкции существующих котлов на технологию слоевого горения с вихревым дожиганием заменяется

слоевая решетка (рис. 2), выделяются в существующем топочном объеме котла собственно топка и камера дожигания за счет установки дополнительного топочного экрана. Реальный КПД реконструированных котлов составляет 85 – 93 %.

По данным работы [8] выполнена значительная работа по внедрению и опытной эксплуатации низкотемпературной вихревой технологии сжигания «Торнадо» для паровых котлов, которая реализует совместное слоевое и факельно-вихревое сжигание. Такая технология применима практически для любого вида твердых топлив и отходов. Крупные фракции топлива сжигаются в слое на механизированной колосниковой решетке, а мелкие, уносимые частицы аэродинамически удерживаются в топке и заполняют вихрь излучающим потоком горящих частиц. Таким образом в топке «Торнадо» сглаживаются неравномерности тепловыделения с подавлением температурного максимума ядра факела, появляется заметная доля конвективной составляющей тепло-

Т а б л и ц а 2

Результаты теплового расчета паровых котлов при использовании промпродукта Кузнецкого угля марки «Ж»

Паропроизводительность, т/ч (кг/с)	2,5(0,69)	4,0(1,11)	6,5(1,81)	10,0(2,78)	25,0(6,94)
Потери, %					
с теплом шлака q_6	1,0		0,81		
от наружного охлаждения q_5	3,6	2,8	2,3	1,7	1,2
с механическим недожогом q_4	12,5		15,0		
с химическим недожогом q_3	1,0		1,0		
с уходящими газами q_2	6,20			6,70	7,11
Температура уходящих газов, °С	160			170	180
КПД, %	75,7	76,5	77,8	74,2	74,9
Теплопроизводительность, МВт	1,62	2,60	4,20	6,46	16,20
Расход натурального топлива, кг/ч	385,2	609,9	1098,1	1559,7	3894,0
Расход условного топлива, кг у.т./ч	232,8	368,7	663,3	942,7	2353,7

Результаты теплового расчета водогрейных котлов при использовании Кузнецкого угля марки СС и промпродукта Кузнецкого угля марки «Ж»

Топливо	Уголь СС		Промпродукт	
Теплопроизводительность, МВт	23,26	11,63	23,26	11,63
Потери, %:				
с теплом шлака q_6	0,28		0,81	
от наружного охлаждения q_5	1,2	1,5	1,2	1,5
с механическим недожогом q_4	15,0		15,0	
с химическим недожогом q_3	1,0		1,0	
с уходящими газами q_2	9,13		14,3	
Температура уходящих газов, °С	230		230	
КПД, %	73,4	73,1	67,7	67,4
Расход натурального топлива, кг/ч	4875	2451	6984	3507
Расход условного топлива, кг у.т./ч	3890	1956	4219	2118

обмена, повышается степень черноты и излучательная способность топочного объема. Тепловосприятие топочных экранов заметно увеличивается, но при этом максимум тепловосприятия понижается, тепловая нагрузка экранов повышена, но распределена равномерно, что увеличивает надежность их работы. Благодаря механизации и малой массе топлива в слое, топки не требуют особых затрат ручного труда и легко автоматизируются. Сравнение габаритов реконструированного котла с котлами польского производства, работающими на твердом топливе, показывает, что при меньшей мощности (2 МВт) польский котлоагрегат заметно более громоздок.

В результате проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [5] предложена топка, использующая факельно-слоевую схему организации топочного процесса (рис. 3). В такой топке могут сжигаться растительные отходы («в факеле») и уголь («в слое») как по отдельности, так и совместно.

Высокая эффективность проведенных реконструкций позволила продолжить развитие и внедрение факельно-слоевой схемы сжигания и реконструировать паровой котел

ДКВр-20-13ГМ с заменой мазута дробленным углем (рис. 4) [9]. Котел работает с механической шуровкой и выгрузкой шлака топкой ТШПМ, расположенной на опорной раме под вихревой топкой котла, и имеет ряд особенностей.

– Объединение слоевого и факельного сжигания обеспечивает взаимное поддержание горения и однородное заполнение топки факелом. При этом тепловосприятие топочных экранов становится равномерным, что повышает надежность и облегчает условия работы трубной системы котла. Дополнительная обмуровка также стабилизирует топочный процесс.

– Активная аэродинамика и форсирование топочного процесса минимизируют содержание горящего топлива и в совокупности с непрерывной регулируемой подачей топлива обеспечивают управляемость топки и, соответственно, возможность автоматизации.

– Шуровочная планка механизированной шуровки слоя и выгрузку шлака, и благодаря механизации, котел легко автоматизируется и требует минимума затрат ручного труда.

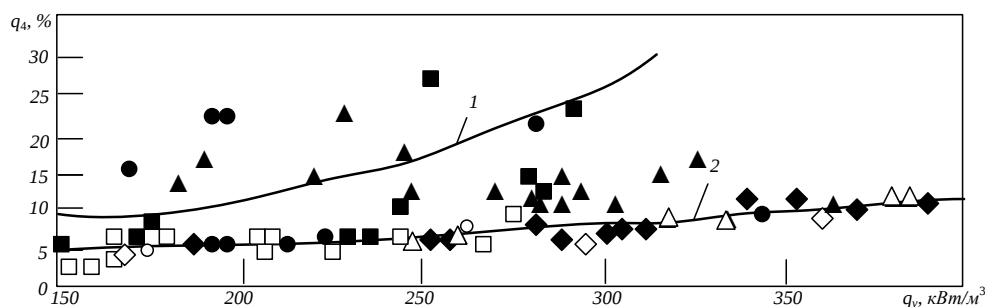


Рис. 1. Потери тепла с механическим недожогом (в шлаке и уносе) для слоевых топок при работе на каменных (1) и бурых (2) углях в различных котлах:

▲ – КВ ТС 10 КУ; ◆ – Шмидта Гартмана, БУ; ◇ – КВ ТС-20 БУ; ■ – КЕ-25 КУ; □ – КЕ-25 БУ; ● – ДКВР 20 КУ; Δ – ТС-35, БУ; ○ – ДКВР 4, БУ



Рис. 2. Паровой котел с высокофорсированной топкой с вихревым дожиганием

Показатели работы реконструированных топок следующие:

- температура уходящих дымовых газов – 134 °С;
- концентрация ангидрида сернистого SO_2 – 0,036 г/м³;
- концентрация оксидов азота NO_x – 0,011 г/м³;
- концентрация оксида углерода CO – 0,472 г/м³;
- концентрация взвешенных частиц – 0,0852 г/м³;
- основная (до 95 %) часть золы выгружается в виде шлака, что существенно разгружает дымоходы, золоуловители и устройства выгрузки золы;
- содержание горючих в шлаке составляет около 1,5 %, шлак белого цвета.

Аналогичная схема реконструкции может быть реализована для ряда котлов серии КЕ, ДКВР Бийского котельного завода и для других водогрейных котлов с заменой громоздких и металлоемких топочных устройств.

При использовании вихревых топок рекомендуется два варианта реконструкции: установка циклонного предтопка к слоевой топке или полная замена котельного агрегата на установку с циклонной топкой и специальным теплообменником [10].

Разрабатываемые в настоящее время вихревые топки имеют относительно небольшую (порядка 1 МВт) тепловую мощность, их применение возможно только взамен малых водо-

грейных котлов. Ниже приведены технические характеристики водогрейного котла [3] и экспериментальные данные для предлагаемой установки на угле марки СС [10]:

Показатель	Котел «Братск»	Установка с вихревой топкой
Теплопроизводительность, МВт	0,715	0,500
Потери, %		
с механическим недожогом q_4	2,5	0
с химическим недожогом q_3	6	0
с уходящими газами q_2	11	17
Температура уходящих газов, °С	230	200
КПД, %	75	77
Расход натурального топлива, кг/ч	146,6	100,0
Расход условного топлива, кг у.т./ч	117,0	79,7

Коэффициент полезного действия обоих агрегатов примерно одинаков, и, как следствие, примерно одинаков расход топлива. При этом коэффициент избытка воздуха в установке $\alpha = 3$. Эта величина определяется условиями ведения процесса [10] и при дальнейшей разработке и испытаниях может быть снижена до нормативных значений ($\alpha = 1,5 \div 1,6$), что приведет к снижению потерь тепла с уходящими газами и росту КПД. Можно ожидать, что для высокозольных углей, промпродукта и отходов углеобогащения КПД котельных агрегатов, где весьма проблематично сжигать такие топлива, КПД резко упадет из-за механического недожога, в то время как КПД установки с циклонной топкой существенно не изменится.

Следует также отметить, что циклонный процесс легко поддается полной автоматизации, что позволит сократить количество обслуживающего персонала.

Выводы. В настоящее время существует возможность оборудования действующих котельных агрегатов малой тепловой мощности вихревыми топками, однако для целей сжигания углеродсодержащих отходов более эффективными являются установки с циклонной топкой и специальными теплообменниками.

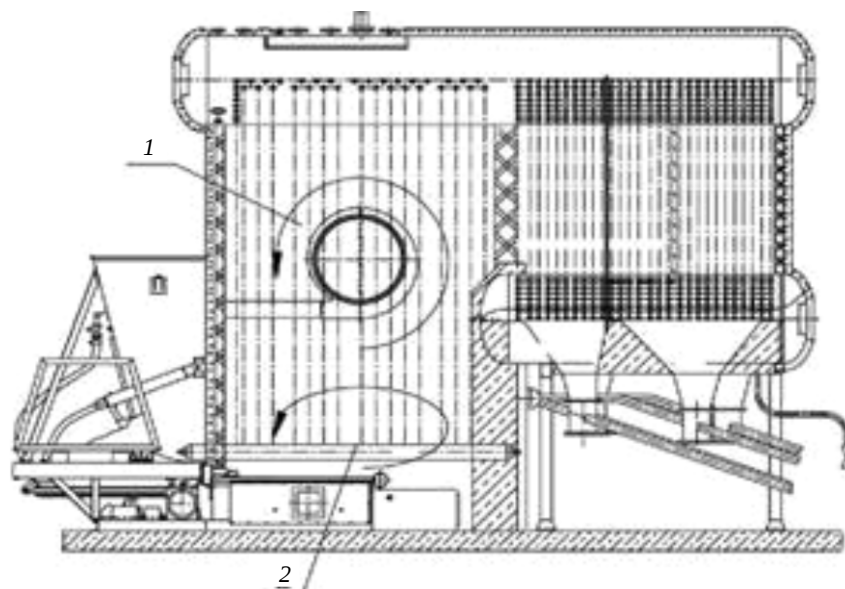


Рис. 3. Котел КЕ-4-14 с механизированной топкой типа «шурующая планка»: 1 – вихревая зона горения лузги; 2 – колосники угольной топки

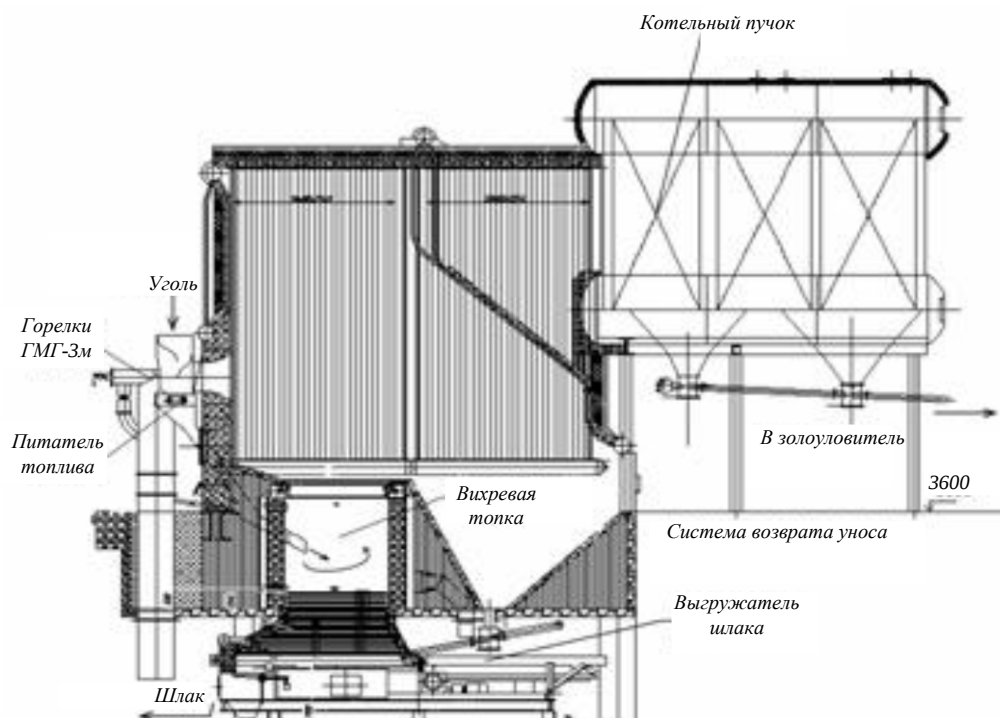


Рис. 4. Котел ДКВр-20-13ШпВТ, реконструированный для сжигания измельченных углей

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкова М.Н., Казимиров С.А., Темлянцев М.В., Багрянцев В.И., Рыбушкин А.А., Слаженева К.С. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках // Вестник СибГИУ. 2014. № 2. С. 24 – 32.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
3. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
4. Низкотемпературная вихревая (НТВ) технология сжигания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.promeng.spb.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=73 (Дата обращения 01.12.2014).
5. Пузырев Е.М. и др. Разработка и внедрение вихревых топок для сжигания угля

- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2496 (Дата обращения 20.11.2014).
6. Стрoгaнoв Д.С. Топки для топлива низких сортов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://aqua-therm.ru/articles/articles_202.html (Дата обращения 20.11.2014).
7. Реконструкция слоевых топок по вихревой технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecoenergo.su/publikaczii/modernizacziya-kotlov-s-topkami-sloevogo-goreniya-tverdogo-topliva> (Дата обращения 21.11.2014).
8. Гoлyбeв В.А., Пyзьpeв Е.М., Пyзьpeв М.Е. Использование вихревых топок «Торнадо» в паровых котлах «Про-ЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pem-energo.ru/ispolzovanie-vihrevykh-topok-tornado-v-parovykh-kotlah> (Дата обращения 21.11.2014).
9. Опыт разработки вихревых топок на дробленом угле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kotelprom.tehnodoc.ru/opit.php> (Дата обращения 20.11.2014).
10. Бaгpянцeв В.И., Бpовчeнкo С.А., Пoдoльcкий А.П., Pыбyшкин А.А., Тeмлянцeв М.В., Кaзимирoв С.А. Разработка агрегата и технологии для эффективного сжигания дисперсных отходов углеобогащения во вращающемся потоке воздуха // Вестник СибГИУ. 2013. № 4 (6). С. 36 – 41.
- © 2015 г. С.А. Казимиров, М.Н. Баикова,
К.С. Слажнева
Поступила 11 декабря 2014 г.