

УДК 621.181

ОРГАНИЗАЦИЯ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ТОПКАХ ЭНЕРГОКОТЛОВ

Осинцев К.В.

ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)

Область потенциального применения водоугольных суспензий (ВУС) в энергетике – ТЭС и котельные в районах, где нет возможности построить подъездные железные дороги, создать системы конвейерной доставки сухого угля, организовать площадки для приема и хранения твердого топлива. Кроме того, это могут быть ТЭС, принимающие кусковой уголь с мест добычи по трубопроводам в потоках воды, на которых крупные фракции подают в традиционную систему пылеприготовления, а отстоявшийся шламовый остаток (разновидность ВУС) – в форсунки котлов для факельной утилизации. Возможно использование ВУС из твердых угольных частиц в смеси с отходами нефтепродуктов.

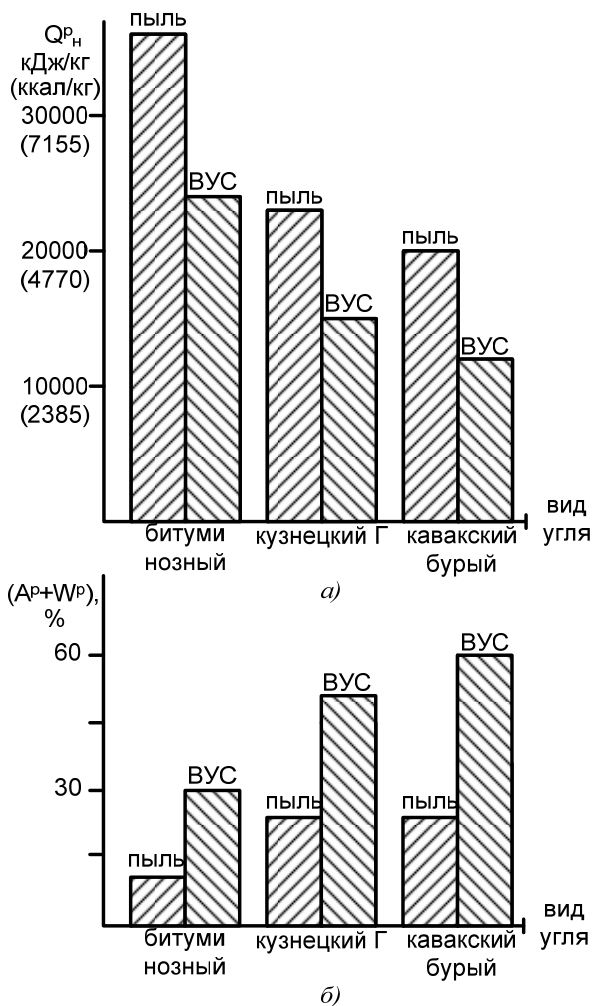


Рис. 1. Сравнение характеристик пыли и ВУС различных углей: *a* – теплота сгорания; *б* – суммарный балласт минеральных включений и влаги.

Зарубежные специалисты ориентируются на использование суспензий из высококачественных (в частности, битуминозных) мало-зольных ($A^c \leq 2\%$) углей с выходом летучих веществ $V^r \geq 40\%$ и теплотой сгорания $Q_{Rn}^p \geq 35$ МДж/кг. Водоугольная суспензия из этих углей имеет теплоту сгорания $Q_{Rn}^p \geq 24$ МДж/кг при рабочей влажности $W^p \leq 30\%$ и допустимом максимальном размере твердых частиц $R_{max} \approx 200$ мкм (рис.1). Разработчики проектов указывают на технические и экономические преимущества использования таких ВУС в части транспорта, приема, хранения и прямого сжигания в котлах ТЭС, а также снижения загрязнений мелкодисперсной золой и оксидами азота в сравнении с традиционными приготовлением и сжиганием угольной пыли. Проблема распространения новых технологий в России – отсутствие залежей углей отмеченного качества (рис. 1).

Возможности энергоиспользования ВУС с частицами максимальных размеров 200–350 мкм из исходных углей РФ с реальной теплотой сгорания < 23 МДж/кг и $A^p > 10$ % весьма ограничены из-за повышения потерь теплоты на использование избыточной влаги в топке, значительного недожога топлива, расслоения суспензии при транспортировке и хранении. Опыт сжигания таких ВУС на энергокотлах ПК-40 Беловской ГРЭС и ТП-35 Мин-Кушской ТЭЦ подтвердил это. Вместе с тем при исследованиях был выявлен потенциальный резерв, связанный непосредственно со структурой суспензионного топлива.

Проведенные на этих котлах испытания под руководством к.т.н. Хидиятова А.М., Джундубаева А.К., Осинцева В.В. показали, что при распыливании ВУС в топке образовывался полидисперсный капельный факел. Капли при нахождении в высокотемпературной топочной среде прогревались, из них испарялась влага, выходили летучие вещества; прогретые летучие вещества и твердотопливный коксовый остаток начинали реагировать с кислородом подаваемого через горелки воздуха (воспламенялись) с тепловыделением и повышением температуры. Последующее окисление (горение) капельного коксового остатка сопровождалось спеканием его отдельных частиц в золококсовые конгломераты. Переход от пылеугольного к суспензионному сжиганию сопровождался увеличением (растягиванием) длины участка воспламенения и снижением его температурного уровня. Это характерно для горения с пассивированием окислительного процесса на участке воспламенения инертным балластом: газами рециркуляции, паром, водой, избыточным количеством минеральных включений, а также их совокупностью. Затягивание воспламенительного процесса приводило к затягиванию выгорания угольных частиц суспензионного топлива, повышению температуры продуктов сгорания на выходе из топки и за котлом, совокупному увеличению потерь теплоты с уходящими газами и мехнедожогом топлива (рис.2). Из представленного в качестве примера рисунка 3 видно, что в период испытаний котла ТП-35 основная масса пылевидного топлива, в частности кавакского угля, выгорает на горизонтальном участке факела перед горелками от их выходного сечения $l = 0$ до отметки l_{ϕ} , где степень выгорания $a = 0,9$. Здесь же развивается максимальный уровень температуры факела T_{ϕ} ; на вертикальном участке факел охлаждается до фиксируемого на выходе из топки опытного значения $T = T_{\tau}^n = 1230$ К (параметр $T/T_{\tau}^n = 1,0$; $a = 0,95$). При подаче в топку распыленной суспензии из того же кавакского угля характер горения резко изменяется: участок воспламенения l_{ϕ} увеличивается в 3 – 4 раза, а максимальная температура T_{ϕ} снижается на 200 – 300 К. Пассивирование воспламенения вызывает затягивание процесса горения и летучих, и коксового остатка. В выходном окне топки температура факела становится выше ($T/T_{\tau} > 1,0$), а степень выгорания уменьшается до $a \leq 0,82$. Заметим, что вышерассмотренный процесс горения в топке котла ТП-35 распыленных капель ВУС из кавакского угля с высоким содержанием влаги ($W^p \approx 50$ %) при низких тепловых напряжениях сечения зоны активного горения ($q_F \approx 1,2$ МВт/м²) и лучистой поверхности ($q_{лг} \approx 0,6$ МВт/м²) мог осуществляться только при подсветке, в частности, дизельным топливом в количестве 7 – 12 % по тепловыделению. Горение ВУС из кузнецкого угля с влагосодержанием $W^p \approx 40$ % на котле ПК-40, имеющим повышенное теплонапряжения зоны активного горения ($q_F \approx 3,0$ МВт/м²; $q_{лг} \approx 1,05$ МВт/м²), протекало без подсветки высокорреакционным топливом.

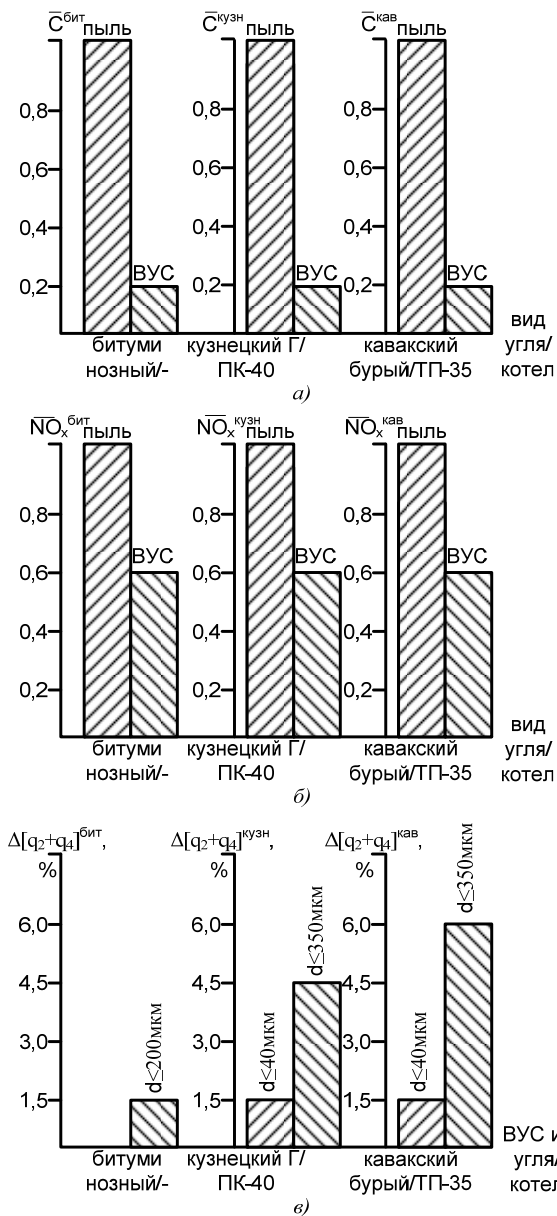


Рис. 2. Характеристики продуктов сгорания пыли и ВУС различных углей:

a – относительное изменение концентрации выводимой в атмосферу летучей золы:

$$\bar{C}^{бит} = C^{бит} / C_{пыль}^{бит}, \quad \bar{C}^{кузн} = C^{кузн} / C_{пыль}^{кузн},$$

$$\bar{C}^{кав} = C^{кав} / C_{пыль}^{кав}, \text{ где } C^{бит}, C^{кузн}, C^{кав} - \text{текущие}$$

значения концентрации летучей золы при сжигании ВУС и пыли соответственно битуминозного, кузнечного и кавакского углей, $\text{мг}/\text{нм}^3$;

$C_{пыль}^{бит}, C_{пыль}^{кузн}, C_{пыль}^{кав}$ – значения концентрации летучей золы при сжигании пыли соответственно битуминозного, кузнечного, кавакского углей, $\text{мг}/\text{нм}^3$;

b – относительное изменение концентрации выводимых в атмосферу оксидов азота:

$$\overline{NO}_x^{бит} = NO_x^{бит} / NO_{x,пыль}^{бит}, \quad \overline{NO}_x^{кузн} = NO_x^{кузн} / NO_{x,пыль}^{кузн},$$

$$\overline{NO}_x^{кав} = NO_x^{кав} / NO_{x,пыль}^{кав}, \text{ где } NO_x^{бит}, NO_x^{кузн}, NO_x^{кав} -$$

текущие значения концентрации оксидов азота при сжигании ВУС и пыли соответственно битуминозного, кузнечного и кавакского углей, $\text{мг}/\text{нм}^3$;

$NO_{x,пыль}^{бит}, NO_{x,пыль}^{кузн}, NO_{x,пыль}^{кав}$ – значения концентрации оксидов азота при сжигании пыли соответственно битуминозного, кузнечного, кавакского углей, $\text{мг}/\text{нм}^3$;

в – изменение суммарных тепловых потерь с уходящими газами (q_2) и механическим недожогом топлива (q_4):

$$\Delta[q_2 + q_4]^{бит} = (q_2 + q_4)_{ВУС}^{бит} - (q_2 + q_4)_{пыль}^{бит}$$

$$\Delta[q_2 + q_4]^{кузн} = (q_2 + q_4)_{ВУС}^{кузн} - (q_2 + q_4)_{пыль}^{кузн}$$

$$\Delta[q_2 + q_4]^{кав} = (q_2 + q_4)_{ВУС}^{кав} - (q_2 + q_4)_{пыль}^{кав}$$

при переходе с пылеугольного на суспензионное сжигание соответственно битуминозного, кузнечного и кавакского углей, %.

Прогоревшие более тяжелые и крупные в сравнении с отдельными пылевыми частицами золококсовые конгломераты с большой эффективностью улавливались в обычных золоуловителях перед дымососами и дымовыми трубами, обуславливая снижение до 5 – 8 раз концентрации мелкодисперсной летучей золы в отводимых в атмосферу продуктах сгорания (рис. 2). В присутствии водного балласта пассивировались окислительные процессы, в том числе образования оксидов азота (рис. 2).

По результатам испытаний котлов ПК-40 и ТП-35 на ВУС был принят проект котла ТПЕ-214 Новосибирской ТЭЦ-5, предусматривающий помимо его основной работы на пыли возможность обработки суспензионного сжигания. Ориентируясь на ВУС с максимальным размером частиц ≤ 350 мкм в проект котла был заложен тепловой небаланс по $\Delta(q_2 + q_4)$ для суспензионного и пылеугольного факелов, где q_2 и q_4 – потери теплоты с уходящими газами и механическим недожогом топлива, %.

Изучение зольного остатка показало, что основной вклад в отклонения интегральных значений степени выгорания вносят наиболее крупные фракции с

$R \geq 90$ мкм (рис. 3). Это относится и к пылевому, и суспензионному факелу. В суспензионном факеле частицы конгломератов с $R < 90$ мкм достигают выходного окна топки со степенью выгорания до $a = 0,90 - 0,95$, а частицы с $R \leq 40$ мкм сгорают практически полностью.

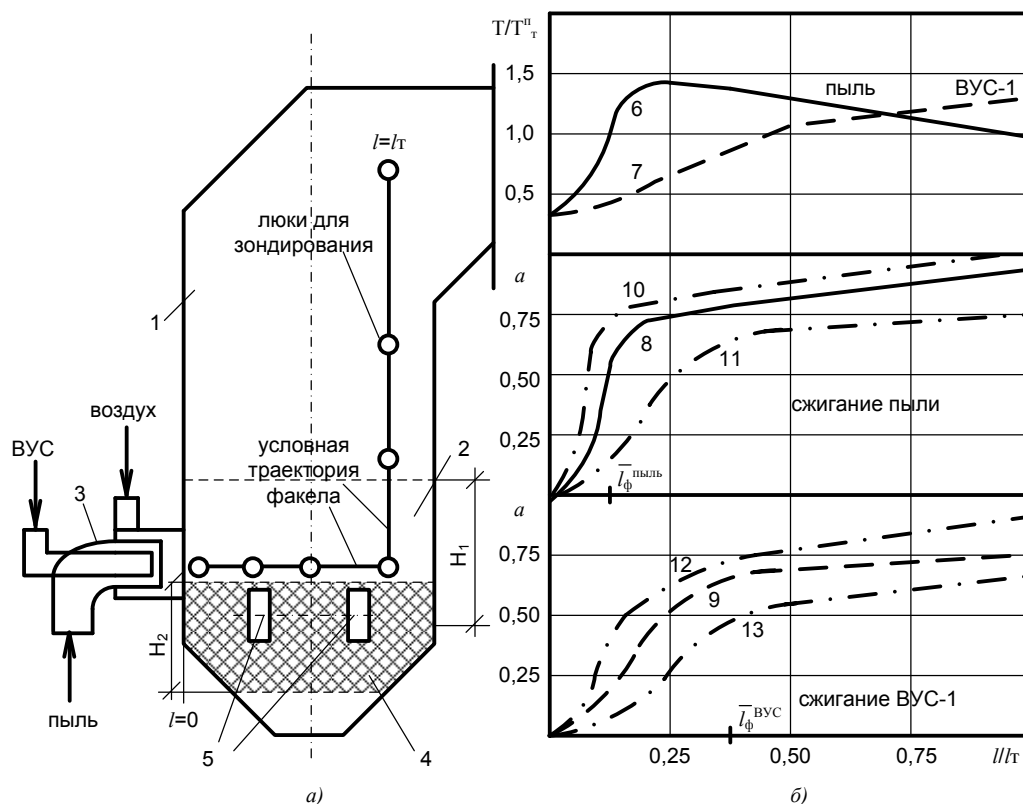


Рис. 3. Характер изменения безразмерных температуры (T/T^0_T) и степени выгорания топлива (a) в пылеугольном и суспензионном факелах кавакского бурого угля на котле ТП-35: 1 – топка, 2 – зона активного горения для пыли и ВУС в опытах, 3 – горелки для сжигания пыли и ВУС в опытах, 4, 5 – расчетные зона активного горения и горелки для мелкодисперсной ВУС, 6, 7, 8, 9 – интегральные кривые, 10, 12 – $R < 90$ мкм, 11, 13 – $R > 90$ мкм, 6, 8 – сжигание пыли с максимальным размером частиц 350 мкм, 7, 9 – сжигание ВУС с максимальным размером частиц 350 мкм.

Степень выгорания частиц с $R \leq 40$ мкм в конце горизонтального участка суспензионного факела составляла $a \approx 0,90$, соответствовала проектной величине для частиц среднеинтегрального размера пылеугольного факела. Летучие вещества, присутствующие в исходном угле, частично растворяются в суспензионной воде, частично сохраняются в пылевой составляющей, и также как в пылеугольном факеле, сгорают в первую очередь вместе с коксовой мелочью. Понятно, что с увеличением доли мелочи увеличивается тепловыделение вблизи горелок, уменьшается параметр l_ϕ и повышается значение максимальной температуры T_ϕ . Можно произвести перерасчет параметров участков воспламенения l_ϕ и T_ϕ для стационарного гипотетического капельно-суспензионного факела с частицами уменьшенных размеров 3 мкм, 20 мкм, 40 мкм в условиях уже исследованных топочных камер котлов ТП-35, ПК-40 и проектного котла ТПЕ-214, приняв в расчете повышенные тепловые напряжения зоны активного горения котла ПК-40, и получить приближенные значения максимальной температуры факела ВУС, используя разработанную для подобного случая методику прогнозного

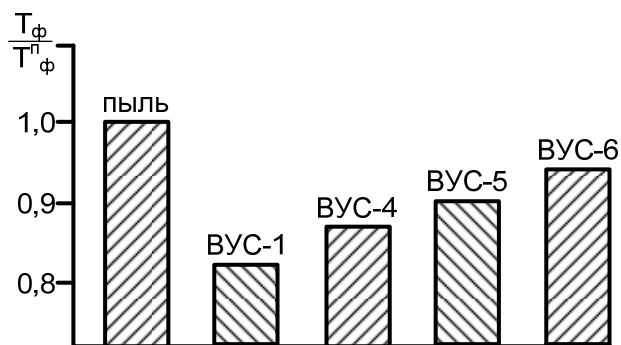
расчета [1, 2, 3, 4, 5]. Из приводимой таблицы результатов расчета видно, что транспортная влага, входящая в состав ВУС, продолжает выступать в качестве инертного балласта, по-прежнему пассивирует процесс воспламенения со снижением уровня температуры T_{ϕ} . Однако при увеличении доли тепловыделения мелкими частицами, которых в каплях и конгломератах становится больше и количественно, и по массе, не только смещается отметка l_{ϕ} с максимальной температурой факела T_{ϕ} к срезу горелок, но и снижается величина отклонения последней относительно исходного значения, характерного для проектного полидисперсного пылеугольного факела, до $\Delta T_{\phi} = (100 - 150)$ К. Значения параметра l_{ϕ} , характеризующего местоположение T_{ϕ} для суспензионных факелов с максимальными размерами частиц 3 мкм, 20 мкм, 40 мкм и исходного пылеугольного факела различаются между собой несущественно. На вертикальном участке топки в отсутствии дожигания происходит более активное охлаждение факела с конгломератами из мелких частиц. На интенсивность охлаждения влияет оптическая плотность факела и степень загрязнения (коэффициент эффективности Ψ_3) экранов [6, 7]. При фиксированном значении параметра Ψ_3 капельно-конгломератный факел более прозрачен, за счет чего более активно охлаждаются не только его пристенные, но и внутренние слои. Температурный уровень в выходном окне топки согласно выполненным тепловым расчетам по стандартным методикам [8] для распыливаемых суспензий с максимальными размерами частиц ≤ 40 мкм уже соотносится с уровнем температуры для обычного пылеугольного факела, а для суспензий, имеющих частицы с размерами ≤ 20 мкм и ≤ 3 мкм, относительно этого уровня даже уменьшается (табл.). В конвективной части котла происходит перераспределение температурных характеристик продуктов сгорания с увеличением T_{yx} в потоках, забалластированных влагой и соответствующих потерь с q_2 (табл., рис. 2, рис. 4). Полученное расчетное приращение $\Delta[q_2+q_4] = 1,0 - 1,5$ %, а также затраты на компрессию распыливаемого воздуха не превышают аналогичных потерь для случая перехода с пыли на ВУС битуминозных углей с максимальным размером частиц ≤ 200 мкм. Обратим внимание, что сравнительные расчеты характеристик факела и продуктов сгорания ВУС кузнецкого угля выполнены для работы котлов в бесподсветочных режимах при $W^p \approx 40$ %, а кавакского бурого угля – с подсветкой дизтопливом $g_{\text{подсв}} \approx 10$ % при рабочей влажности $W^p \approx 50$ %.

Дополнительные расчеты по гипотетическому составу ВУС кавакского угля с $W^p < 50$ % и размерами частиц ≤ 3 мкм показывают, что бесподсветочный режим достигается при $W^p \approx 40$ %. Продолжение подсветки при $W^p \approx 40$ % увеличивает тепловыделение и температуру T_{ϕ} вблизи горелки практически уже до уровней, характерных пылесжиганию (рис. 4, таблица). Варианты с подсветкой дизтопливом в первом приближении имитируют обогащенную высокорективными компонентами ВУС с повышенной интегральной теплотой сгорания. Такой продукт хорошо соотносится со смесью отходов нефтепродуктов и отработанных масел с той же угольной крошкой, подлежащей факельной утилизации на котлах. По определению специалистов, разрабатывающих новые нетрадиционные виды топлива, такая смесь относится к композиционным жидким топливам.

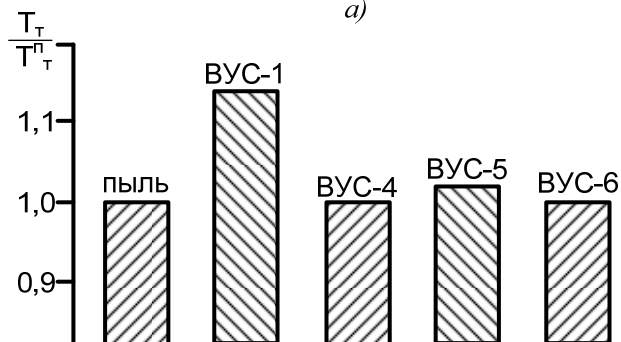
Таблица

Расчетные характеристики факела и продуктов сгорания

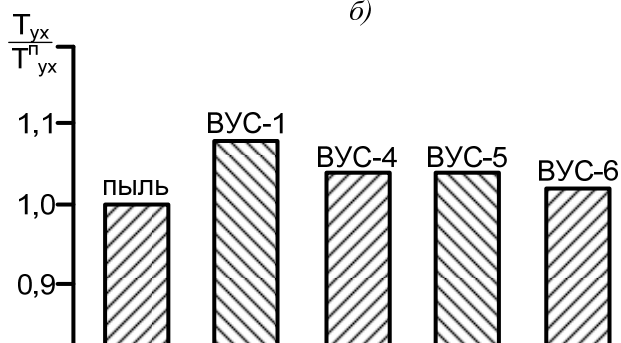
№ п/п	Параметр	Кузнецкий уголь марок Г и Д										Кавакский уголь							
		Котел ТПЕ-214 (D _н)					Котел ПК-40 (D _н)					Котел ТП-35 (0,5·D _н)							
		пыль	ВУС				пыль	ВУС				пыль	ВУС						
			1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	5	6	
1	Низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, Q _н ^p , кДж/кг/ ккал/кг	23000/5490	15000/3580				23000/5490	15000/3580				20000/4770	10500/2506				13125/3130		
2	Зольность на сухую массу, A ^c , %	12					12					12							
3	Влажность на рабочую массу, W ^p , %	10	40				10	40				18	50				40		
4	Максимальный размер частиц в топливе, d _{max} , мкм	350	350	40	20	3	350	350	40	20	3	350	350	40	20	3	3	3	
5	Длина участка воспламенения, l _ф , м	1,5	4,5	4,0	2,5	1,5	1,0	4,0	3,0	2,0	1,0	0,5	4,5	2,5	1,5	1,0	1,0	0,5	
6	Максимальная температура факела, T _ф , К / °С	1700/1427	1450/1177	1490/1217	1530/1257	1550/1277	1850/1577	1600/1327	1650/1377	1680/1407	1700/1427	1700/1427	1400/1127	1450/1177	1480/207	1500/227	1550/277	1650/377	
7	Температура продуктов сгорания в выходном окне топки, T _т ["] , К/ °С	1382/1109	1411/1138	1380/1107	1373/1100	1371/1099	1350/1077	1425/1152	1353/1080	1343/1070	1333/1060	1230/957	1400/1127	1273/1000	1243/70	1223/50	1250/77	1220/47	
8	Температура уходящих газов, T _{ух} , К / °С	403/130	415/142	415/142	413/140	413/140	403/130	421/148	421/148	418/145	416/143	413/140	439/166	433/160	426/153	423/150	423/150	418/145	
9	Степень выгорания топлива на отметке l _ф	0,90	0,82	0,90	0,95	0,97	0,90	0,80	0,90	0,95	0,99	0,90	0,75	0,85	0,90	0,90	0,90	0,92	
10	Степень выгорания топлива в выходном окне топки	0,97	0,90	0,97	0,98	1,00	0,98	0,92	0,98	0,99	1,00	0,97	0,85	0,95	0,97	0,99	0,995	1,0	
11	Потери теплоты с уходящими газами, q ₂ , %	5,50	6,65	6,60	6,60	6,60	5,50	7,00	7,00	6,80	6,70	8,30	11,00	9,90	9,30	9,00	9,3	8,8	
12	Потери теплоты с мехнедожогом, q ₄ , %	1,5	3,0	1,0	0,5	0	0,5	2,5	1,0	0,5	0	1,5	5,5	2,1	1,5	1,3	0,3	-	
13	Повышение потерь теплоты с уходящими газами относительно пылевого сжигания, Δq ₂ , %	-	1,15	1,10	1,10	1,10	-	1,50	1,50	1,30	1,20	-	2,70	1,60	1,0	0,7	1,0	0,5	
14	Повышение потерь теплоты с мехнедожогом относительно пылевого сжигания, Δq ₄ , %	-	1,5	-	-	-	-	2,0	0,5	-	-	-	4,0	0,6	0	-	-	-	
15	Степень подсветки, g _{подсв} , %	-					-					10						-	10
16	Подсветочное топливо, вид	-					-					дизтопливо						-	дизтопливо



а)



б)



в)

Рис. 4. Сравнение тепловых характеристик пылеугольного и суспензионного факелов и продуктов сгорания кавакского бурого угля на котле ТП-35 при нагрузке $D = 0,5 \cdot D_n$; ПЫЛЬ – $d_{\max} \approx 350$ мкм; ВУС-1 – $W^p \approx 50\%$, $g_{\text{подсв}} = 10\%$, $d_{\max} \approx 350$ мкм; ВУС-4 – $W^p \approx 50\%$, $g_{\text{подсв}} = 10\%$, $d_{\max} \approx 3$ мкм; ВУС-5 – $W^p \approx 40\%$, $g_{\text{подсв}} = 0\%$, $d_{\max} \approx 3$ мкм; ВУС-6 – $W^p \approx 40\%$, $g_{\text{подсв}} = 10\%$, $d_{\max} \approx 3$ мкм.

Сжигание мелкодисперсной ВУС в виде сгущенного шламового отстоя (коагулянта) с топливными частицами ≤ 40 мкм при $W^p \approx 40 - 50\%$ после гидротранспорта угля фракций до 25 мм реально обрабатывалось на котле ПК-40 Беловской ГРЭС [9]. Распыленный специально разработанными форсунками шлам и угольную пыль с воздухом через индивидуальные горелки, размещенные на боковых стенах, встречными потоками вводили в топку в соотношении 20/80 по тепловыделению. Показано, что переизмельчение исходных топливных частиц практически не влияет на характер каплеобразования при распыливании и формирование зольных конгломератов, а вся угольная мелочь, поступающая в топку с ВУС выгорает ($a \approx 1,0$). Транспортные потоки влаги обуславливают увеличение температуры уходящих газов и соответствующих потерь теплоты $\Delta q_2 = 0,20 - 0,25\%$. Имея небольшой проигрыш по Δq_2 и дополнительным потерям на компрессию распыливаемого воздуха «Потребитель» (ТЭС) компенсировал его улучшением экологических показателей котла и снижением стоимости топлива в шламе. «Поставщик» угля снижал суммарные затраты на гидротранспорт и платы за жидкие загрязняющие сбросы [9]. В последующем в связи с переводом

котлов Беловской ГРЭС на новую экологически более чистую технологию сжигания угольной пыли от экзотермической утилизации шлама отказались.

Появляющиеся сообщения о сверхстойчивых ВУС нового поколения с размерами частиц топлива до 40 мкм, получаемые в современных сверхэкономичных измельчителях производительностью до 80 т/ч и энергозатратностью до 20 (кВт ч/т угля) должны подтолкнуть интерес исследователей и разработчиков к системам сжигания ВУС на ТЭС.

Литература

1. Оценка влияния влагосодержания на устойчивость воспламенения кавакского бурого угля / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1988. – №1.
2. Анализ тепловой устойчивости факельного сжигания углей Киргизии / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов // Известия Академии Наук Киргизской ССР. Физико-технические и математические науки. – 1989. – №1. – С. 56 – 65.
3. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с однородной фронтальной компоновкой горелок при сжигании разнородного топлива / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов // Теплоэнергетика. – 2005. – №9. – С. 14 – 23.
4. Расчет характеристик начального участка полидисперсного факела при фронтальном прямоточном вводе реагентов в топку / Осинцев К.В. // Тепловые процессы в технике. – 2009. – №9. – Том 1. – С. 379 – 382.
5. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / Осинцев К.В. // Электрические станции. – 2009. – №11. – С. 13 – 17.
6. Перспективы, основные результаты исследований и проблемы использования водоугольных суспензий с энергетике / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Л.И. Дубовцев // Электрические станции. – 1988. – №9. – С. 2 – 12.
7. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев, др. // Теплоэнергетика. – 1987. – №1. – С. 5 – 11.
8. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. Изд. 3-е. перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.
9. Выбор технологии сжигания сгущенных шламов в энергетических котлах / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.П. Костовецкий, др. // Электрические станции. – 1990. – №6. – С. 12 – 15.