

# Теплоэнергетика

УДК 621.311

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

К.В. Осинцев

Рассматривается возможность использования водоугольной суспензии в энергетике. Приведены результаты анализа данных по использованию различных технологий производства и сжигания этого топлива. Предлагается использование многофункциональных горелок в качестве основных перспективных технологий для сжигания. Эти горелки доказали свою высокую надежность как энергетического оборудования, могут работать в широком диапазоне по зольности, влажности и выходу летучих горючих веществ.

*Ключевые слова:* горелка, водоугольная суспензия.

### Введение

Водоугольная суспензия (ВУС) – смесь угольной пыли и воды с добавками поверхностно-активных веществ или без таковых, обладающая текучими свойствами, способная к перемещению с помощью насосов по трубопроводам, распылению в топках на капли и горению с образованием факела, что делает ее похожей на мазут, дизельное топливо и другие топливные жидкости [1–5].

### Постановка задачи исследования

Область применения ВУС в энергетике – ТЭС и котельные, размещенные в районах, где по различным причинам отсутствует возможность строительства подъездных железных дорог, систем конвейерной доставки сухого угля, нет площадок для приема и хранения твердого топлива. Кроме того, это могут быть ТЭС, принимающие кусковой уголь в потоке воды по трубопроводу с отделением крупных фракций и подачей их в традиционную систему пылеприготовления, а отстоявшийся шламовый остаток (разновидность ВУС) в форсунки котлов на факельную утилизацию. Возможна и факельная

утилизация ВУС из отходов нефтемаслопродуктов с включением твердых угольных частиц на энергокотлах ТЭС и промпредприятий.

### Анализ данных российских и зарубежных исследований

В зарубежных проектах по промышленному использованию ВУС ориентируются на водоугольные суспензии, приготавливаемые из высококачественных малозольных, в частности, битуминозных углей с теплотой сгорания  $Q_n^p \geq 35\,000$  кДж/кг, содержанием минеральных включений на сухую массу  $A^c \leq 2\%$ , выходом летучих на горючую массу  $V^T \geq 40\%$  (рис. 1, а, б). Суспензия из этих углей, имея высокое значение теплоты сгорания  $Q_n^p \geq 24\,000$  кДж/кг при рабочей влажности  $W^p \leq 30\%$  и максимальном размере твердых частиц  $\sim 200$  мкм, может экономно транспортироваться с мест добычи угля и приготовления до потребителя, долго храниться, не расслаиваться [1–5]. Разработчики проектов указывают на преимущества использования ВУС на пылеугольных ТЭС, связанные с упрощением технологии приема, хра-

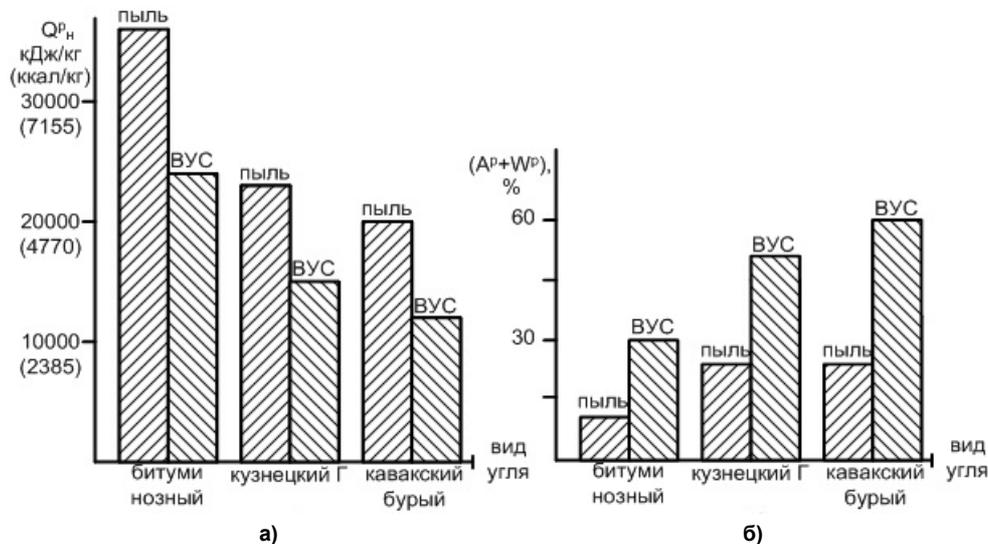


Рис. 1. Сравнение характеристик пыли и ВУС различных углей: а – теплота сгорания; б – суммарный балласт минеральных включений и влаги

нения, подачи топлива на котлы, отмечают улучшение экологического состояния района размещения пылеугольных ТЭС после перевода их на ВУС за счет снижения выхода в атмосферу мелкодисперсной золы и канцерогенных оксидов азота (рис. 2). Производство и поставку высокорекреационных ВУС связывают с минимизацией суммарных затрат на гидродобычу, приготовление, гидротранспорт и стоимости твердого топлива. Многие важные для конструкторов факельных топок вопросы организации суспензионного сжигания, в том числе специфики воспламенения и поведения твердых топливных частиц, в реальных промышленных установках практически не раскрываются.

Несмотря на активно проводимые исследования по горению ВУС, начатые в 50-х годах прошлого столетия, в том числе в СССР, в отсутствие промышленного опыта серьезно затруднялось ведение прогнозов по организации экзотермических

процессов на котлах при использовании исходного топлива с иными теплотой сгорания, зольностью, размерами частиц. Опытно-промышленное сжигание ВУС было крайне необходимо, и в 80-х годах прошлого столетия в рамках крупной межотраслевой правительственной программы оно было проведено в СССР на котлах ПК-40 Беловской ГРЭС и ТП-35 Мин-Кушской ТЭЦ. При этом использовали ВУС с существенно ухудшенными (относительно ВУС битуминозного угля) теплофизическими свойствами и размерами частиц до 350 мкм (см. рис. 1, а, б) [6, 7].

Подробное описание котлов и установок по приготовлению, подаче и распыливанию ВУС, как и результаты сравнительного сжигания пыли и суспензии ранее были приведены в открытой печати [6–15]. Проведенные испытания показали, что при распыливании ВУС в топке образовывался полидисперсный капельный факел. Капли при на-

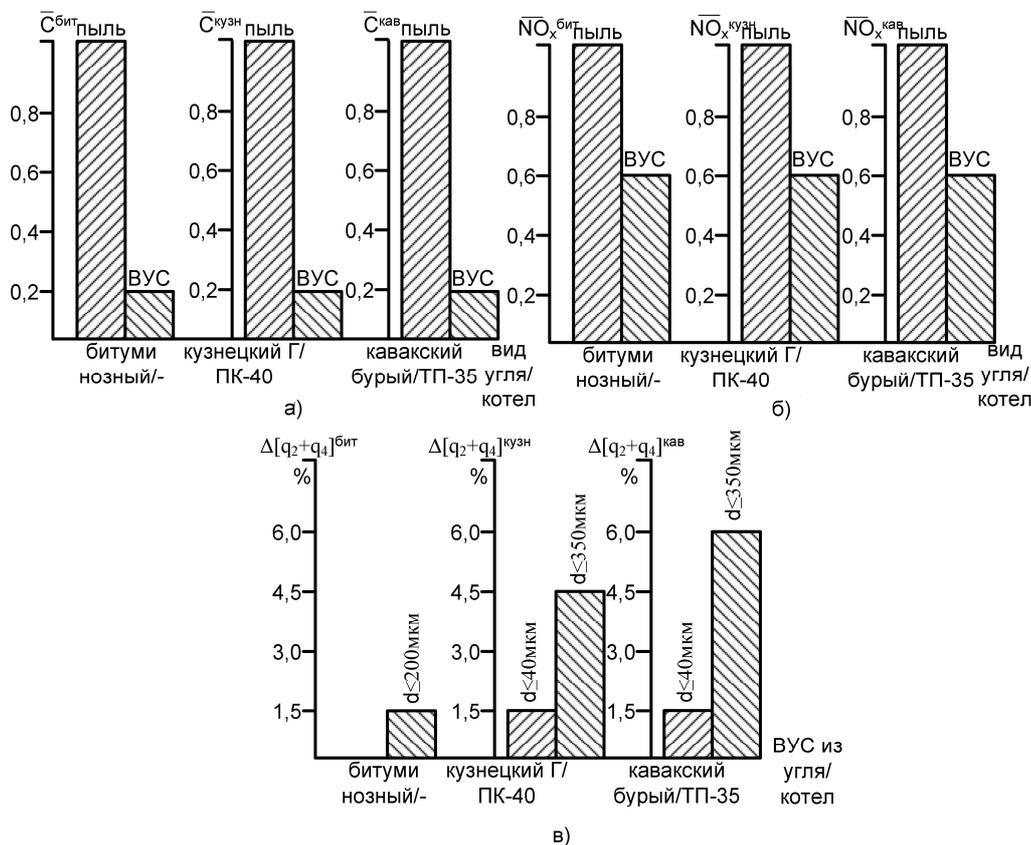


Рис. 2. Характеристики продуктов сгорания пыли и ВУС различных углей: а – относительное изменение концентрации выводимой в атмосферу летучей золы:  $\bar{C}^{\text{бит}} = C^{\text{бит}} / C^{\text{бит}}_{\text{пыль}}$ ,  $\bar{C}^{\text{кузн}} = C^{\text{кузн}} / C^{\text{кузн}}_{\text{пыль}}$ ,  $\bar{C}^{\text{кав}} = C^{\text{кав}} / C^{\text{кав}}_{\text{пыль}}$ , где  $C^{\text{бит}}$ ,  $C^{\text{кузн}}$ ,  $C^{\text{кав}}$  – текущие значения концентрации летучей золы при сжигании ВУС и пыли соответственно битуминозного, кузнецкого и кавказского углей, мг/м<sup>3</sup>;  $C^{\text{бит}}_{\text{пыль}}$ ,  $C^{\text{кузн}}_{\text{пыль}}$ ,  $C^{\text{кав}}_{\text{пыль}}$  – значения концентрации летучей золы при сжигании пыли соответственно битуминозного, кузнецкого, кавказского углей, мг/м<sup>3</sup>; б – относительное изменение концентрации выводимых в атмосферу оксидов азота:  $\overline{NO}_x^{\text{бит}} = NO_x^{\text{бит}} / NO_x^{\text{бит}}_{\text{пыль}}$ ,  $\overline{NO}_x^{\text{кузн}} = NO_x^{\text{кузн}} / NO_x^{\text{кузн}}_{\text{пыль}}$ ,  $\overline{NO}_x^{\text{кав}} = NO_x^{\text{кав}} / NO_x^{\text{кав}}_{\text{пыль}}$ , где  $NO_x^{\text{бит}}$ ,  $NO_x^{\text{кузн}}$ ,  $NO_x^{\text{кав}}$  – текущие значения концентрации оксидов азота при сжигании ВУС и пыли соответственно битуминозного, кузнецкого и кавказского углей, мг/м<sup>3</sup>;  $NO_x^{\text{бит}}_{\text{пыль}}$ ,  $NO_x^{\text{кузн}}_{\text{пыль}}$ ,  $NO_x^{\text{кав}}_{\text{пыль}}$  – значения концентрации оксидов азота при сжигании пыли соответственно битуминозного, кузнецкого, кавказского углей, мг/м<sup>3</sup>; в – изменение суммарных тепловых потерь с уходящими газами ( $q_2$ ) и механическим недожогом топлива ( $q_4$ ):  $\Delta[q_2+q_4]^{\text{бит}} = (q_2+q_4)^{\text{бит}}_{\text{ВУС}} - (q_2+q_4)^{\text{бит}}_{\text{пыль}}$ ,  $\Delta[q_2+q_4]^{\text{кузн}} = (q_2+q_4)^{\text{кузн}}_{\text{ВУС}} - (q_2+q_4)^{\text{кузн}}_{\text{пыль}}$ ,  $\Delta[q_2+q_4]^{\text{кав}} = (q_2+q_4)^{\text{кав}}_{\text{ВУС}} - (q_2+q_4)^{\text{кав}}_{\text{пыль}}$  при переходе с пылеугольного на суспензионное сжигание соответственно битуминозного, кузнецкого и кавказского углей, %

хождении 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 [6–10, 16–25].

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 теп-

лоты с уходящими газами и мехнедожогом топлива (см. рис. 2). Из представленного в качестве примера рис. 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  $l_{\phi}$ , где степень выгорания  $a = 0,9$ . Здесь же развивается максимальный уровень температуры факела  $T_{\phi}$ ; на вертикальном участке факел охлаждается до фиксируемого на выходе из топки опытного значения  $T = T_{\tau}^n = 1230 \text{ K}$  (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  $l_{\phi}$  увеличивается в 3–4 раза, а максимальная температура  $T_{\phi}$  снижается на 200–300 К. Пассивирование воспламенения вызывает затягивание процесса горения и летучих, и коксового остатка. В выходном окне топки температура факела становится выше ( $T/T_{\tau}^n > 1,0$ ), 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 содер-

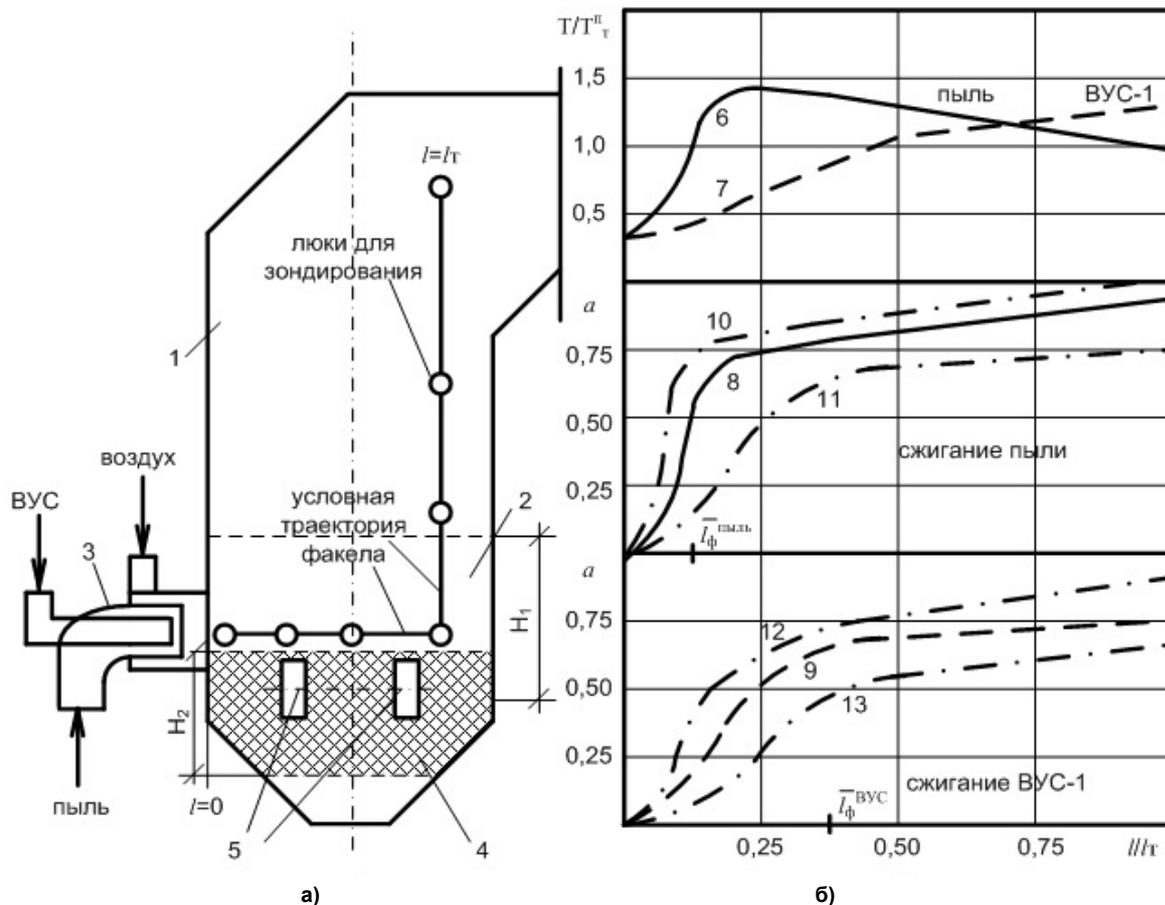


Рис. 3. Характер изменения безразмерных температуры ( $T/T_{\tau}^n$ ) и степени выгорания топлива (а) в пылеугольном и суспензионном факелах кавакского бурого угля на котле ТП-35: 1 – топка; 2 – зона активного горения для пыли и ВУС в опытах; 3 – горелки для сжигания пыли и ВУС в опытах; 4, 5 – расчетные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

жанием влаги ( $W^p \approx 50\%$ ) при низких тепловых напряжениях сечения зоны активного горения ( $q_F \approx 1,2 \text{ МВт/м}^2$ ) и лучистой поверхности ( $q_{лр} \approx 0,6 \text{ МВт/м}^2$ ) мог осуществляться только при подсветке, в частности, дизельным топливом в количестве 7–12 % по тепловыделению [9, 10].

Горение ВУС из кузнецкого угля с влагосодержанием  $W^p \approx 40\%$  на котле ПК-40, имеющим повышенное теплонапряжение зоны активного горения ( $q_F \approx 3,0 \text{ МВт/м}^2$ ;  $q_{лр} \approx 1,05 \text{ МВт/м}^2$ ), протекало без подсветки высокорекреационным топливом [6, 7]. 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 (см. рис. 2). В присутствии водного балласта пассивировались окислительные процессы, в том числе образование оксидов азота (см. 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 отработки суспензионного сжигания. Ориентируясь на ВУС с максимальным размером частиц  $\leq 350 \text{ мкм}$ , в проект котла заложили 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, %. Начавшееся расслоение ВУС в трубопроводах и хранилищах на неопределенное время «заморозило» идею использования нетрадиционного жидкого топлива на энергокотлах страны, этим завершилась по существу и сама правительственная программа.

Появляющиеся в последнее время сообщения о сверхустойчивых ВУС нового поколения с переизмельченными до 3–40 мкм частицами топлива и хорошими транспортабельными характеристиками, получаемые в сверхэкономичных измельчительных установках нового поколения, производительностью до 80 т/ч и энергозатратностью 10–20 кВт·ч/(т угля) подталкивают разработчиков к очередному витку исследований и внедрений [4, 5, 26–28]. В связи с этим появился смысл и в продолжении анализа результатов проведенного промышленного факельного сжигания ВУС на котлах.

При изучении зольного остатка было обнаружено, что основной вклад в отклонения интегральных значений степени выгорания вносят наиболее крупные фракции с  $R \geq 90 \text{ мкм}$  (см. рис. 3) [6, 7]. Это относится и к пылевому, и к суспензионному факелам. Конгломератные частицы суспензионного факела с  $R < 90 \text{ мкм}$  достигают выходного окна топки со степенью выгорания до  $a = 0,90\text{--}0,95$ , а частицы с  $R \leq 40 \text{ мкм}$  сгорают уже практически полностью. Степень выгорания частиц с  $R \leq 40 \text{ мкм}$  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 так же, как в пылеугольном факеле, сгорают в первую очередь вместе с коксовой мелочью [9, 10, 16, 19, 22]. По-видимому, что с увеличением доли мелочи увеличивается тепловыделение вблизи горелок, уменьшается параметр  $l_\phi$  и повышается значение максимальной температуры  $T_\phi$ .

Можно произвести перерасчет параметров участков воспламенения  $l_\phi$  и  $T_\phi$  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 [9, 10, 16, 19, 22]. 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  $T_\phi$ . Однако при увеличении доли тепловыделения мелкими частицами, которых в каплях и конгломератах становится больше и количественно, и по массе, не только смещается отметка  $l_\phi$  с максимальной температурой факела  $T_\phi$  к срезу горелок, но и снижается величина отклонения последней относительно исходного значения, характерного для проектного полидисперсного пылеугольного факела, до  $\Delta T_\phi = 100\text{--}150 \text{ К}$ . Значения параметра  $l_\phi$ , характеризующего местоположение  $T_\phi$  для суспензионных факелов с максимальными размерами частиц 3 мкм, 20 мкм, 40 мкм и исходного пылеугольного факела, различаются между собой незначительно. На вертикальном участке топки в отсутствие дожига происходит более активное охлаждение факела с конгломератами из мелких частиц. На интенсивность охлаждения влияет оптическая плотность факела и степень загрязнения (коэффициент эффективности  $\Psi_s$ ) экранов [6, 7]. При фиксированном значении параметра  $\Psi_s$  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 [24, 25] для распыливаемых суспензий с максимальными размерами частиц  $\leq 40 \text{ мкм}$  уже соотносится с уровнем температуры для обычного пылеугольного факела, а для суспензий, имеющих частицы с размерами  $\leq 20 \text{ мкм}$  и  $\leq 3 \text{ мкм}$ , относительно этого уровня даже уменьшается (см. таблицу). В конвективной

Расчетные характеристики факела и продуктов сгорания

№ п/п	Параметр	Кузнечий уголь марок Г и Д												Кавказский уголь										
		Котел ТПЕ-214 (D <sub>н</sub> )						Котел ПК-40 (D <sub>н</sub> )						Котел ТП-35 (0,5D <sub>н</sub> )										
		пыль		ВУС		ВУС		пыль		ВУС		ВУС		пыль		ВУС		ВУС						
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6			
1	Низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, Q <sub>нр</sub> , кДж/кг/ ккал/кг	23000/5490	15000/3580				15000/3580				23000/5490				20000/4770				10500/2506				13125/3130	
2	Зольность на сухую массу, A <sub>c</sub> , %	12																						
3	Влажность на рабочую массу, W <sup>p</sup> , %	10																						
4	Максимальный размер частиц в топливе, d <sub>max</sub> , мкм	350																						
5	Длина участка воспламенения, l <sub>ф</sub> , м	1,5	4,5	4,0	2,5	1,5	1,0	4,0	3,0	2,0	1,0	4,0	3,0	2,0	1,0	4,5	2,5	1,5	1,0	4,5	2,5	1,0	0,5	
6	Максимальная температура факела, T <sub>ф</sub> , К/°С	1700/1427	1450/1177	1490/1217	1530/1257	1550/1277	1850/1577	1600/1327	1650/1377	1680/1407	1700/1427	1700/1427	1700/1427	1700/1427	1700/1427	1700/1427	1400/1127	1450/1177	1480/1207	1500/1227	1500/1227	1550/1277	1650/1377	
7	Температура продуктов сгорания в выходном окне топки, T <sub>т</sub> , К/°С	1382/1109	1411/1138	1380/1107	1373/1100	1371/1099	1350/1077	1425/1152	1353/1080	1343/1070	1333/1060	1333/1060	1333/1060	1333/1060	1333/1060	1230/957	1400/1127	1273/1000	1243/970	1223/950	1223/950	1250/977	1220/947	
8	Температура уходящих газов, T <sub>уэ</sub> , К/°С	403/130	415/142	415/142	413/140	413/140	403/130	421/148	421/148	418/145	416/143	416/143	416/143	416/143	413/140	439/166	433/160	426/153	423/150	423/150	423/150	418/145		
9	Степень выгорания топлива на отметке l <sub>ф</sub>	0,90	0,82	0,90	0,95	0,97	0,90	0,80	0,90	0,95	0,99	0,90	0,90	0,90	0,90	0,75	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90		
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	0,98	0,99	1,00	0,97	0,85	0,95	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99		
11	Потери теплоты с уходящими газами, q <sub>2</sub> , %	5,50	6,65	6,60	6,60	6,60	5,50	7,00	7,00	6,80	6,00	6,00	6,00	6,00	8,30	11,00	9,90	9,30	9,00	9,00	9,3	8,8		
12	Потери теплоты с мехнедожогом, q <sub>4</sub> , %	1,5	3,0	1,0	0,5	0	0,5	2,5	1,0	0,5	0	0,5	0	0,5	1,5	5,5	2,1	1,5	1,3	1,3	0,3	–		
13	Повышение потерь теплоты с уходящими газами относительно пылевого сжигания, Δq <sub>2</sub> , %	–	1,15	1,10	1,10	1,10	–	1,50	1,50	1,30	1,20	1,20	1,20	1,20	–	2,70	1,60	1,0	0,7	0,7	1,0	0,5		
14	Повышение потерь теплоты с мехнедожогом относительно пылевого сжигания, Δq <sub>4</sub> , %	–	1,5	–	–	–	–	2,0	0,5	–	–	–	–	–	–	4,0	0,6	0	–	–	–	–		
15	Степень подцветки, g <sub>подств</sub> , %	–																						
16	Подцветочное топливо, вид	дизтопливо																		–		диз-топ-ливо		

части котла происходит перераспределение температурных характеристик продуктов сгорания с увеличением  $T_{yx}$  в потоках, забалластированных влагой, и соответствующих потерь с  $q_2$  (таблица, 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  $\leq 200$  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  $g_{подсв} \approx 10 \%$  при рабочей влажности  $W^p \approx 50 \%$ . Дополнительные расчеты по гипотетическому составу ВУС кавакского угля с  $W^p < 50 \%$  и размерами частиц  $\leq 3$  мкм показывают, что бесподсветочный режим достигается при  $W^p \approx 40 \%$ . Продолжение подсветки при  $W^p \approx 40 \%$  увеличивает тепловыделение и температуру  $T_{\phi}$  вблизи горелки практически уже до уровней, характерных пылесжиганию (рис. 4, таблица). Варианты с подсветкой дизтопливом в первом приближении имитируют обогащенную высокорекреационными 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 [11]. По определению специалистов, разрабатывающих новые нетрадиционные виды топлива, такая смесь относится к композиционным жидким топливам [4, 5, 26–28].

Реально сжигание мелкодисперсной ВУС в виде

сгущенного шламового отстоя (коагулянта) с топливными частицами  $\leq 40$  мкм при  $W^p \approx 40-50 \%$  после гидротранспорта угля фракций до 25 мм отработывалось на котле ПК-40 Беловской ГРЭС [12–15]. 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 [12–15]. Показано, что переизмельчение исходных топливных частиц практически не влияет на характер каплеобразования при распыливании и формировании зольных конгломератов, а вся угольная мелочь, поступающая в топку с ВУС, выгорает ( $a \approx 1,0$ ) [6, 7]. Транспортные потоки влаги обуславливают увеличение температуры уходящих газов и соответствующих потерь теплоты  $\Delta q_2 = 0,20-0,25 \%$ . Имея небольшой проигрыш по  $\Delta q_2$  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 плату за жидкие загрязняющие сбросы [12]. В последующем в связи с переводом котлов Беловской ГРЭС на новую, экологически более чистую технологию сжигания угольной пыли, от экзотермической утилизации шлама отказались.

## Предлагаемая автором система сжигания ВУС

Сегодня имеются не столь сложные, но надежные технологии комбинированного факельного сжигания разнородных топлив в топках. Для ускорения процессов прогрева и испарения влаги и

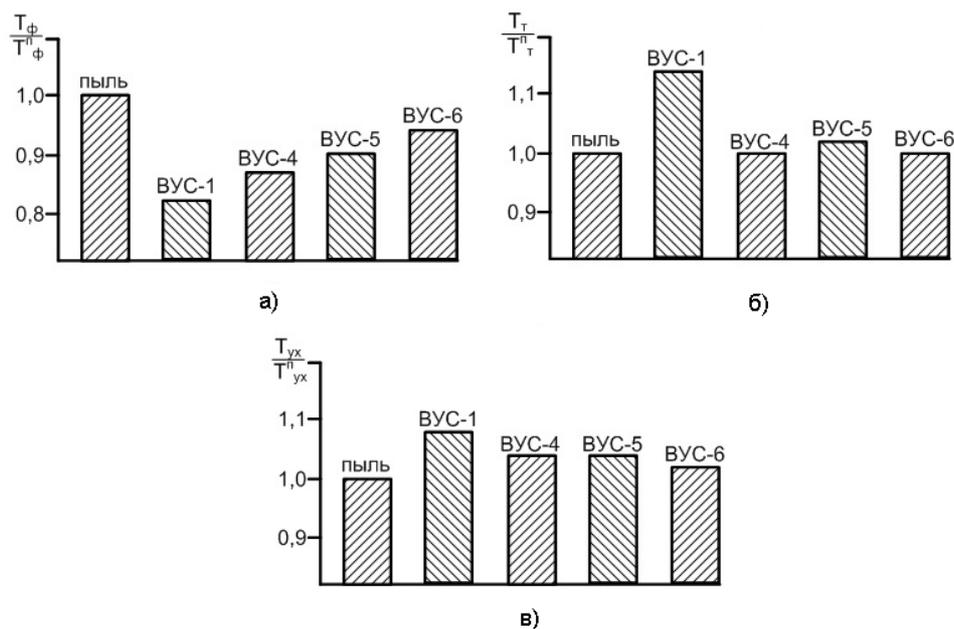


Рис. 4. Сравнение тепловых характеристик пылеугольного и суспензионного факелов и продуктов сгорания кавакского бурого угля на котле ТП-35 при нагрузке  $D = 0,5 \cdot D_n$ : пыль –  $d_{max} \approx 350$  мкм; ВУС-1 –  $W^p \approx 50 \%$ ,  $g_{подсв} = 10 \%$ ,  $d_{max} \approx 350$  мкм; ВУС-4 –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

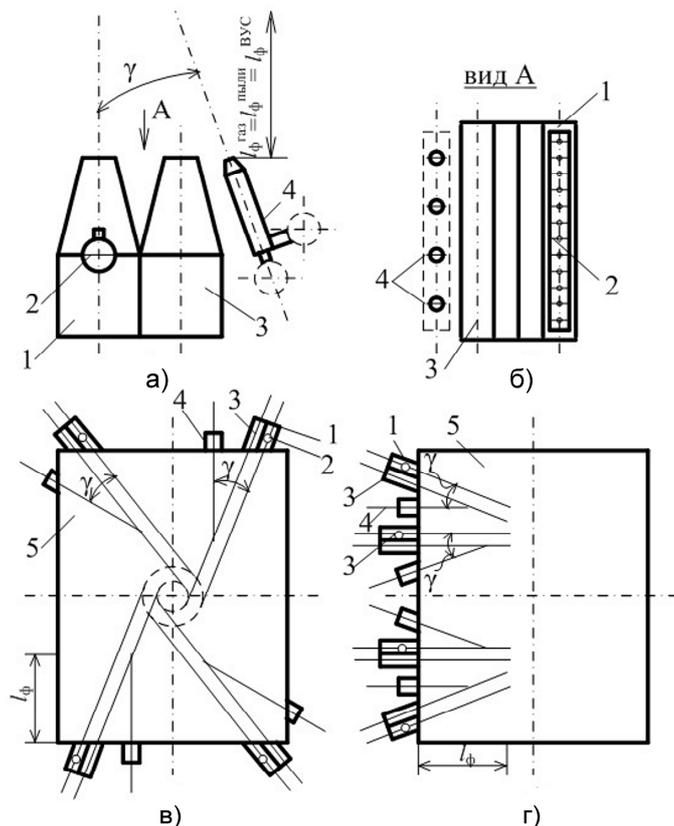


Рис. 5. Схемы многофункциональных горелочных устройств и их компоновка в топках: а, б – схема горелки; в, г – тангенциальная и фронтальная схемы компоновки горелок; 1 – воздушное сопло, 2 – многосопловая газовая горелка, 3 – пылеугольное сопло, 4 – форсунки ВУС, 5 – топка в плане

летучих веществ на участке факельного воспламенения в топочной технике используют метод раздельного ввода воздушных и топливных потоков с вовлечением кислорода воздуха в реакции топливного окисления сразу после завершения упомянутых теплотратных процессов [16–19, 21–23]. Для вариантов с фронтальной и тангенциальной схемами ввода реагентов могут быть рекомендованы многофункциональные горелки (рис. 5).

### Выводы

Рассмотренные случаи сравнительного сжигания угольной пыли и ВУС с большим содержанием породы ( $A^c \geq 10\%$ ) привязаны к котлам, на которых предусмотрено удаление твердых прогоревших частиц из-под топки и за котлом. Проектирование котлов необходимо связывать с видом основного топлива. Если это угольная пыль, то пылеугольные горелки размещаются в топке в соответствии с существующими нормами [24, 25]. Вспомогательные горелки и форсунки компонуются в габаритах зоны активного пылегорения (см. рис. 5). Если это ВУС, то выбор зоны активного горения, уровня установки и схемы компоновки реагентных потоков следует производить из условия более высоких, чем для угольных топок с твердым шлакоудалением, тепловых напряжений  $q_F, q_{лг}$ . Если возникает необходимость в комби-

ровании факельного сжигания, то для пыли и распыливаемой ВУС целесообразно выбирать собственные зоны активного горения с собственными показателями  $q_F, q_{лг}$ , а также уровнем и схемой размещения узлов ввода реагентных потоков (см. рис. 3, а). При проектировании новых котлов, работающих на ВУС как на основном виде топлива, выбор температурного режима и величины поверхностей нагрева, температуры продуктов сгорания, в том числе уходящих газов, осуществляется с учетом дополнительного балластного объема водяного пара с минимизацией потерь теплоты  $q_2$  и устранением отклонения по  $\Delta q_2$ , появляющегося при испытаниях на существующих пылеугольных котлах. При использовании низкорреакционных ВУС имеется возможность введения специальных добавок, повышающих активность горения ВУС в каплях, температурный уровень в зоне активного горения [29].

### Литература

1. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий / под ред. Б.В. Канторовича, Г.Н. Делягина. – М.: Наука, 1967. – 194 с.
2. Морозов, А.Г. ВУТ в теплоэнергетике / А.Г. Морозов, С.И. Мосин, В.И. Мурко // Энергия, экономика, техника, экология. – 2007. – № 4. – С. 29–32.

3. Ходаков, Г.С. Водугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
4. Технологии сжигания топлив в котельных и на электростанциях / Ф.А. Серант, Л.И. Пугач, Ю.В. Овчинников и др. // Академия энергетике. Серия «Наука и технологии». – 2008. – № 6 (26). – С. 54–65.
5. Приготовление и сжигание водугольного топлива в различных топочных устройствах / А.И. Цепенюк, С.В. Луценко, Ф.А. Серант, Е.Г. Карпов // Материалы международной конференции по теплоэнергетике и ее устойчивому развитию. г. Угльевик, Республика Сербская, Босния и Герцеговина. – 2010. – С. 61–66.
6. Хидиятов, А.М. Перспективы, основные результаты исследований и проблемы использования водугольных 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 водугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев и др. // Теплоэнергетика. – 1987. – № 1. – С. 5–11.
8. Джундубаев, А.К. Моделирование технологических схем сжигания кавакского бурого угля, доставляемого на ТЭС гидротранспортом / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1987. – № 5. – С. 1–8.
9. Джундубаев, А.К. Оценка влияния влагосодержания на устойчивость воспламенения кавакского бурого угля / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 8–13.
10. Осинцев, В.В. 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.
11. Пат. № 2324860 РФ, МПК<sup>5</sup><sup>1</sup>, С 1 F23C 1/10, F23G 7/05. Способ утилизации жидких смазочных отходов с твердотопливными включениями / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, К.В. Осинцев, Е.В. Торопов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет». – № 2006143234/06; заявл. 06.12.06; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14. – 5 с.
12. Выбор технологии сжигания сгущенных шламов в энергетических котлах / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.П. Костовецкий и др. // Электрические станции. – 1990. – № 6. – С. 12–15.
13. А.с. № 1366785. Способ совместного сжигания угольной пыли и диспергированного топливного коагулянта / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Л.И. Дубовцев, др. – опубл. 15.01.88, Б.И. № 2.
14. А.с. № 1523842. Форсунка / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, Л.И. Дубовцев, др. – опубл. 23.11.89, Б.И. № 43.
15. А.с. № 1322006. Форсунка / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Е.Н. Васильева. – опубл. 07.07.87, Б.И. № 25.
16. 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.
17. Улучшение процесса сжигания топлива на котлах БКЗ-210-140Ф / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов // Электрические станции. – 2006. – № 11. – С. 13–19.
18. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. – 2002. – № 11. – С. 14–19.
19. Осинцев, К.В. Расчет характеристик начального участка полидисперсного факела при фронтальном прямоточном вводе реагентов в топку / К.В. Осинцев // Тепловые процессы в технике. – 2009. – № 9. – Т. 1. – С. 379–382.
20. Анализ результатов опытного сжигания высокорекреационного бурого угля на котле БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 8. – С. 27–32.
21. Осинцев, К.В. Учет неоднородности и неустойчивости тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – № 6. – 2007. – С. 66–70.
22. Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / К.В. Осинцев // Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
23. Перевод котла БКЗ-160 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1993. – № 3. – С. 25–29.
24. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – Изд. 3-е. перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ – ВТИ, 1998. – 257 с.
25. Митор, В.В. Проектирование топок с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания // В.В. Митор, Ю.Л. Маршак. – Л.: ВТИ – НПО ЦКТИ, 1981. – Вып. 42. – 118 с.
26. Морозов, А.Г. Гидроударные технологии для получения водугольного топлива / А.Г. Морозов, Н.В. Коренюгина // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 7. – С. 18–21.
27. Овчинников, Ю.В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко // Материалы научно-практической конференции «Перспективные энергосберегающие

технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности», 15–18 ноября 2005 г. – Кемерово, 2005. – С. 10.

28. Овчинников, Ю.В. Физические процессы и механохимические эффекты в дезинтеграторах и кавитаторах при производстве ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко, Е.А. Евтушенко // Энерго-

системы, электростанции и их агрегаты: сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: НГТУ, 2005. – Вып. 9. – С. 310.

29. Интенсификация процесса горения угольной суспензии с помощью присадок / В.И. Бабий, Н.И. Кузина, В.С. Вдовченко, В.М. Барабаш // Электрические станции. – 1991. – № 11. – С. 6–8.

**Осинцев Константин Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679395, e-mail: osintcev2008@yandex.ru

Поступила в редакцию 9 октября 2013 г.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2014, vol. 14, no. 1, pp. 5–14**

## DEVELOPMENT OF COAL-WATER SLURRY BURNING SYSTEM

**K.V. Osintsev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
osintcev2008@yandex.ru

The article discusses the possibility of coal-water slurry usage in the energy sector. The article presents the results of data analysis concerning the use of various technologies for producing and burning that fuel. The author suggests using multifunctional burners as major advanced technologies for combustion. These burners have proven to be highly reliable as energy equipment, and they can operate in a wide range by ash content, moisture and volatile.

*Keywords: burner, coal-water slurry.*

### References

1. Kantorovich B.V., Delyagin G.N. *Szhiganie vysokoobvodnennogo topliva v vide vodougolnykh suspenziy* [Firing Highly Watered Fuel in the Form of Coal-Water Slurries]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 194 p.
2. Morozov A.G., Mosin S.I., Murko V.I. [Use of Coal-Water Fuel in Thermal Power Engineering]. *Energetika, Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya* [Energy, Economy, Engineering. Ecology], 2007, no. 4, pp. 29–32. (in Russ.)
3. Khodakov G.S. [Coal-Water Suspensions in Power Engineering]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 2007, no. 1, pp. 35–45. (in Russ.)
4. Serant F.A., Pugach L.I., Ovchinnikov Yu.V. [Fuel Combustion Technologies at Boiler Houses and Power Stations]. *Akademia Energetiki, Seriya Nauka i Tekhnologii* [Energy academy, science and engineering], 2008, no. 6 (26), pp. 54–65. (in Russ.)
5. Tsepenyuk A.I., Lutsenko S.V., Serant F.A., Karpov E.G. [Preparation of Coal-Water Fuel and Firing It in Different Furnace Devices]. *Proceedings of the International Conference on Thermal Power Engineering and Its Sustainable Development*, the Republic of Serbia, Bosnia and Herzegovina, Uglzhevik, 2010, pp. 61–66.
6. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Dubovtsev L.I. [Prospects, Main Results of Studies, and Problems Connected with Using Coal-Water Slurries in Power Engineering]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1988, no. 9, pp. 2–12. (in Russ.)
7. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Gordeev S.V. [Results from Shifting a Coal-Fired Boiler with a Steam Output of 89 kg/s for Firing Coal-Water Slurry]. *Teploenergetika* [HeatPower Engineering], 1987, no. 1, pp. 5–11. (in Russ.)
8. Dzhundubaev A.K., Khidiyatov A.M., Osintsev V.V. [Simulating the Process Schemes Used for Firing Kavak Brown Coal Delivered to a Thermal Power Station by Hydraulic Transport]. *Teploenergetika* [HeatPower Engineering], 1987, no. 5, pp. 1–8. (in Russ.)
9. Dzhundubaev A.K., Khidiyatov A.M., Osintsev V.V. [Estimating the Effect of Moisture Content on the Ignition Stability of Kavak Brown Coal]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 1988, no. 1, pp. 8–13. (in Russ.)
10. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Khidiyatov A.M. [Analyzing the Thermal Stability of Combusting Kirgiz Coals in Flames]. *Izvestiya Akademii Nauk KirgSSR, Fiziko-Tekhnicheskie i Matematicheskie Nauki* [Bulletin of the Academy of Sciences of the KirgSSR, Physical and Engineering Sciences], 1989, no. 1, pp. 56–65. (in Russ.)

11. Osintsev V.V., Kuznetsov G.F., Osintsev K.V., Toropov E.V. *Sposob Utilizacii Zhidkikh Smazochnikh Otkhodov s Tverdotoplivnymi Vklyucheniymi* [A Method for Utilizing Liquid Lubrication Wastes with Solid-Fuel Inclusions], Patent RF No. 2324860, 2008.
12. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Kostovetskii S.P. [Selecting the Technology for Firing Thickened Sludges in Power-Generating Boilers]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1990, no. 6, pp. 12–15. (in Russ.)
13. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Dubovtsev L.I., *Sposob sovmestnogo szhiganiya ugol'noy pyli i dispergirivannogo toplivnogo koagulyanta* [A Method for Firing Pulverized Coal Jointly with Dispersed Fuel Coagulant]. USSR Inventor's Certificate No. 1366785, 1988.
14. Osintsev V.V., Khidiyatov A.M., Dubovtsev L.I. *Forsunka* [An Atomizer]. USSR Inventor's Certificate No. 1523842, 1989.
15. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Vasileva E.N. *Forsunka* [An Atomizer]. USSR Inventor's Certificate No. 1322006, 1987.
16. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V. [Controlling the Thermal Structure of the Flame in the Furnaces of BKZ-210-140F Boilers with Single-Tier Arrangement of Multifunctional Burners when Burning Various Kinds of Fuel]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 2005, no. 9, pp. 14–23. (in Russ.)
17. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V. [Improving the Fuel Combustion Process in BKZ-210-140F Boilers]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2006, no. 11, pp. 13–19. (in Russ.)
18. Osintsev V.V., Kuznetsov G.F., Petrov V.V., Sukharev M.P. [Specific Features and Organization of Flame Process in a Furnace Fitted with Multifunctional Burners]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2002, no. 11, pp. 14–19. (in Russ.)
19. Osintsev K.V. [Calculating the Parameters Characterizing the Initial Part of a Polydispersed Flame with Reagents Admitted into the Furnace in a Frontal Straight-Flow Manner]. *Teplovyte Protssessy v Tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2009, no. 1 (9), pp. 379–382. (in Russ.)
20. Osintsev V.V., Kuznetsov G.F., Petrov V.V., Sukharev M.P. [An Analysis of the Results of the Pilot Firing of Highly Reactive Brown Coal in a BKZ-210-140F Boiler]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 2003, no. 8, pp. 27–32. (in Russ.)
21. Osintsev K.V., Osintsev V.V. [Taking into Account the Nonuniform and Unstable Thermal Structure of a Furnace Fireball when Using Multifunctional Burners]. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 2007, no. 6, pp. 66–70. (in Russ.)
22. Osintsev K.V. [A Method for Decreasing Heat Flux Directed toward the Burner Throats]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2009, no. 11, pp. 13–17. (in Russ.)
23. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Gigin V.Ya. [Shifting a BKZ-160 Boiler for Using a Staged Fuel Combustion Technology]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1993, no. 3, pp. 25–29. (in Russ.)
24. *Teplovoy raschet kotlov. Normativny metod* [Thermal Design of Boilers. A Standard Method]. St. Petersburg, NPO TsKTI, 1998. 257 p.
25. Mitor V. V., Marshak Yu. L. *Proektirovanie topok s tverdyim shlakoudaleniem (dopolnenie k normativnomu metodu teplovogo rascheta kotelnykh agregatov)* [Designing Furnaces with Dry-Ash Removal (a Supplement to the Standard Method for Thermal Design of Boiler Units)]. Leningrad, NPO TsKTI, 1981, iss. 42. 118 p.
26. Morozov A.G., Korenyugina N.V. [Use of Water Hammer Technologies for Obtaining Coal–Water Fuel]. *Novosti Teplosnabzheniya* [Thermal News], 2010, no. 7, pp. 18–21. (in Russ.)
27. Ovchinnikov Yu.V., Lutsenko S.V. [Artificial Composite Fuel Prepared from Coal and Effectiveness of Using It]. *Perspektivnye energosberegayushchie tehnologii i sposoby szhiganiya tverdogo topliva v kotlakh maloy i sredney moshchnosti* [Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Prospective Energy-Saving Technologies and Methods for Firing Solid Fuel in Small- and Medium-Capacity Boilers], Kemerovo, November 15–18, 2005, p. 10. (in Russ.)
28. Ovchinnikov Yu.V., Lutsenko S.V., Evtushenko E.A. [Physical Processes and Mechanochemical Effects in Disintegrators and Cavitators during the Production of Artificial Composite Liquid Fuel]. *Trudy NGTU* [Files of Novosibirsk State Technical University], 2005, no. 9, p. 310. (in Russ.)
29. Babii V.I., Kuzina N.I., Vdovichenko V.S., Barabash V.M. [Enhancing the Combustion of Coal-Water Slurry Using Additives]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1991, no. 11, pp. 6–8. (in Russ.)

*Received 9 October 2013*