

УДК 536.468

## СНИЖЕНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

М.А. Дмитриенко, Г.С. Няшина, Н.Е. Шлегель, С.А. Шевырев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия  
gsn1@tpu.ru

**Резюме:** Предприятия энергетического комплекса, работающие на традиционных углеводородных энергоресурсах, в частности на твердом топливе (угле), ежегодно производят десятки миллионов тонн золошлаковых отходов и сотни миллионов кубометров газообразных выбросов. В рамках настоящей работы проведен анализ современных способов снижения вредных выбросов при сжигании традиционного угольного топлива, выделены перспективные подходы, отмечены преимущества и недостатки каждого из них. Показано, что сложно обеспечить одновременно низкие показатели по выбросам в золе и газообразным продуктам сгорания. К тому же, важно сохранить высокие энергетические и экономические показатели. В качестве перспективного подхода предложено применение органоводоугольных топливных суспензий вместо пылевидного и слоевого сжигания угля. Проведены эксперименты по изучению концентраций основных газообразных выбросов ( $CO_x$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ), образующихся при сжигании суспензий на основе углей и типичных отходов их переработки и обогащения (фильтр-кеков).

**Ключевые слова:** твердое топливо, водоугольное топливо, органоводоугольная суспензия, сжигание, антропогенные выбросы, золошлаковые отходы.

**Благодарности:** Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект 15-19-10003).

## THE REDUCTION ANTHROPOGENIC EMISSION AT THE COMBUSTION OF COALS AND COAL PROCESSING WASTE AS A COMPONENT COAL-WATER SLURRY CONTAINING PETROCHEMICALS

М.А. Dmitrienko<sup>1</sup>, G.S. Nyashina<sup>1</sup>, N.E. Shlegel<sup>1</sup>, S.A. Shevyrev<sup>1</sup>

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
gsn1@tpu.ru

**Abstract:** Coal-fired power stations produce of tens millions tons of ash and slag waste, and hundreds of millions cubic meters of gas emissions annual. As part of this work analysis of current methods to reduce anthropogenic emissions in the ash produced by the processing (combustion) of traditional coal fuels was made, advantages and disadvantages of each methods were highlighted. It is shown that both low levels of emissions in the ash and combustion products is difficult to ensure. As a result, it was proposed to use promising coal-water slurry containing petrochemicals instead of pulverized coal. The experimental research into maximum concentrations of anthropogenic emissions from the combustions of coal-water slurry

*containing petrochemicals. The experimental research into maximum concentrations of anthropogenic emissions by the combustions of coal-water slurry containing petrochemicals based filter-cakes were conducted*

**Keywords:** *solid fuel, coal-water slurry, coal-water slurry containing petrochemicals, anthropogenic emissions, ash, slag waste*

**Acknowledgments:** *Research was funded by Russian Science Foundation (project 15–19–10003).*

## **Введение**

Интенсивное развитие топливно-энергетического комплекса на протяжении последних 30–40 лет привело к тому, что для удовлетворения растущих потребностей производств и населения в увеличивающихся объемах тепловой и электрической энергии ежегодно необходимо сжигать все больше твердых топлив: угля, торфа, сланца и др. Сжигание углей на тепловых электростанциях (ТЭС) приводит к большому выходу антропогенных газообразных выбросов и золошлаковых отходов (ЗШО), накапливающихся в золоотвалах и требующих дальнейшей утилизации. В настоящее время годовой объем производства угольной золы во всем мире оценивается примерно в 600 миллионов тонн, из них на долю летучей золы приходится 450–500 миллионов тонн [1]. Помимо образования большого количества ЗШО при пылевидном или слоевом сжигании угля выделяются азото- и серосодержащие ( $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ ) оксиды, большое количество углекислого ( $\text{CO}_2$ ) и угарного (CO) газа на единицу произведенной энергии. Таким образом, изменение топливного баланса в сторону твердых энергоресурсов однозначно негативно скажется на состоянии окружающей среды и всей экосистемы планеты в целом [2].

На основании результатов работ [1–4] сформулированы заключения о том, что сокращение примерно 50 % вредных выбросов угольных станций можно обеспечить за счет повышения эффективности сжигания угля и введения дополнительных мер защиты, а другие 50 % – за счет изменения структуры энергопотребления, а именно увеличения доли использования низкосортного угля и отходов углеперерабатывающих предприятий, а также утилизации золошлаковых отходов в производстве.

В настоящий период времени использование золы в мировых масштабах варьируется от 5 до 70 %, что, в среднем, составляет лишь 25 % от произведенного объема [2–5]. Большая часть до сих пор вывозится на золоотвалы. Объяснить низкий показатель использования этих отходов в ряде государств (в частности, в России) можно несколькими причинами [2, 3]: отсутствием целенаправленной государственной политики в области использования золошлаковых отходов; нехваткой финансирования работ по созданию производств для утилизации ЗШО; технической неподготовленностью теплоэнергетических предприятий по сортировке золошлаковых отходов, их складированию и выдаче потребителям [5].

Необходимость рационального использования золы и шлаков диктуется не только экономическими соображениями, но и требованиями по охране окружающей среды. Накопление и хранение отходов, а также неполное удаление летучей золы являются причинами загрязнения воздушного и водного бассейнов, деградации земель и изменения химико-минерального состава почв. К тому же золоотвалы являются очагами скопления тяжелых металлов и обладают повышенной радиоактивностью.

В табл. 1 представлены общие диапазоны изменения концентраций химических соединений в золе, в зависимости от типа сжигаемого угля [2–4].

Состав летучей золы, полученной из различных видов угля [2–4]

Вид угля	Компоненты (мас. %)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI
Каменный уголь	20–60	5–35	10–40	1–12	0–5	0–4	0–4	0–3	0–15
Бурый уголь	15–45	10–25	4–15	5–30	3–10	0–10	0–6	0–4	0–5
Антрацит	52–56	21–24	5,9–7	0,3–0,5	0,9–1,2	0–0,3	0,2–0,35	2,8–3	9,5–13

К настоящему времени проведено множество исследований (например, [2–6]) во всем мире по поиску рациональных методов утилизации отходов золы (с целью улучшения экономической и экологической обстановки). Индустриальное использование золы и золошлаков ведется по следующим направлениям: добавление к цементу и бетонным изделиям; использование в качестве сырьевых материалов для дорожной промышленности; применение в виде добавок к укрывному материалу; дополнение к строительным материалам в качестве достаточно легкого заполнителя.

Если рассматривать экологические аспекты вопроса, то летучую угольную золу можно использовать в виде дешевого абсорбента в процессе сухой десульфуризации дымовых газов [7]. В этом же направлении ведутся работы [8] по исследованию процессов, происходящих при смешении активированного угля с летучей золой, для адсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> из промышленных дымовых газов. Эта смесь имеет аналогичные характеристики типичного активированного угля, который добавляется в топку для очистки газов [3].

Помимо адсорбции оксидов NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> летучая зола также используется для захвата ртути, которая в противном случае выбрасывается в атмосферу. Хотя роль неорганических компонентов летучей золы в этом захвате до сих пор неясна, проводится множество исследований в этом направлении [9,10]. Летучая зола имеет потенциальное применение в очистке сточных вод из-за своих химических и физических свойств. Кроме того, щелочной характер летучей золы делает ее хорошим нейтрализующим агентом [9,10].

Экономический эффект использования угольной золы в производстве заключается в снижении себестоимости изготавливаемых изделий, расширении сырьевой базы промышленности, нередко – в отказе от строительства новых золоотвалов и, соответственно, в экономии капитальных вложений.

Вопросы снижения летучей золы нередко пытаются решать при использовании водоугольных суспензий. Но для последних характерны пониженные температуры горения и, соответственно, больший недожог по сравнению с пылевидным и слоевым сжиганием угля. Эту проблему можно решить за счет добавления в состав водоугольных топлив (ВУТ) жидкого горючего компонента, даже с небольшой концентрацией (10–15 % по массе). Таким образом получают так называемые органоводоугольные топлива (ОВУТ). Нередко суспензии ВУТ и ОВУТ также называют композиционными жидкими топливами (КЖТ). При использовании ВУТ и ОВУТ доля твердого горючего компонента (угля или продуктов углепереработки) в топливе, как правило, не превышает 50–60 %. В таких условиях можно обеспечить приемлемые показатели по экологии (антропогенным газообразным выбросам и зольному остатку), энергетике и экономике (так как основными компонентами ВУТ и ОВУТ могут быть типичные отходы угле- и нефтепереработки, отработанные горючие и легковоспламеняющиеся жидкости).

Цель настоящей работы – анализ способов снижения антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив, а также перспективных водоугольных и органоводоугольных суспензий.

### **Перспективные подходы снижения газообразных выбросов (летучей золы, оксидов серы, азота, углерода и др.) при сжигании угольных топлив**

Для выделения твердых частиц из дымовых газов наибольшее применение получили следующие золоуловители: циклонные сепараторы [11, 12], рукавные фильтры [11, 13] и электрофильтры [11, 14, 15]. Циклонный сепаратор представляет собой устройство, принцип действия которого заключается в отделении взвешенных частиц из потока дымовых газов путем применения центробежной силы [11, 12]. Более грубые частицы осаждаются на стенках камеры сепаратора вследствие приложенной центробежной силы, которая противостоит в радиальном направлении аэродинамическому сопротивлению. Эффективность циклонного сепаратора зависит от размера и плотности частицы, топочных скоростей подачи газа и его вязкости, от конструкции устройства [11]. К достоинствам циклонных сепараторов можно отнести простоту конструкции, низкую стоимость, компактность и способность выдерживать высокое давления и температуры. Циклоны не имеют движущихся частей, что делает их простыми в обслуживании и не влечет больших энергетических затрат [11, 12]. Однако их низкая эффективность при сборе мелких частиц ограничивает широкое применение.

Рукавные фильтры используются для удаления достаточно мелких частиц из дымовых газов [11, 13]. Частицы пыли осаждаются в порах фильтрующего материала. По мере того, как растет слой пыли, возрастает сопротивление ткани движению воздуха и снижается пропускная способность фильтров [11]. Рукавные фильтры имеют более высокую эффективность очистки газов, по сравнению с любыми видами электрофильтров и аппаратами мокрой газовой очистки [11, 13]. Существуют определенные недостатки подобного способа очистки топочных газов, в их числе высокие затраты на техническое обслуживание; ограничения по температуре (не должна превышать 290 °С); значительные размеры всей системы [11].

Среди всех выделенных газоочистительных устройств наиболее часто применяемыми считаются электрофильтры [14, 15]. Им характерна более высокая эффективность удаления частиц – до 99,95 % (<0,01 мкм), широкий диапазон рабочих температур, а также пригодность для агрессивных условий окружающей среды. Электрофильтры используют электрическое поле для разделения содержащихся в дымовых газах взвешенных частиц от пыли. При прохождении пылегазовой среды через активную зону электрофильтра взвешенные частицы (аэрозоли) попадают в зону действия коронного разряда в неоднородном электродном поле [15]. Частицы, находящиеся в потоке, в результате адсорбции на их поверхности ионов, приобретают в межэлектродном промежутке электрический заряд и под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, на поверхности которых и осаждаются [12, 14, 15]. К недостаткам электрофильтров относятся большие габариты и их высокая стоимость, обусловленная необходимостью применения устройства для получения постоянного тока высокого напряжения [14, 15].

На сегодняшний день применение только одной технологии золоулавливания (из перечисленных выше) с трудом может обеспечить предельно допустимые нормы выбросов в атмосферу. На любой крупной ТЭС необходимо обеспечивать очистку дымовых газов от газо- и парообразных токсичных примесей. Для этого используют следующие методы: абсорбция жидкостями [16] и твердыми поглотителями [17]; каталитическая очистка [18]. Абсорбционные методы основаны на избирательной растворимости газообразных примесей в жидкости (физическая абсорбция) или на избирательном извлечении примесей химическими реакциями с активным компонентом поглотителя (хемосорбция). В качестве абсорбентов применяют воду, растворы аммиака, суспензий гидроксида кальция, едких и карбонатных щелочей, оксидов марганца и магния [16]. Степень очистки в комплексных абсорбционных методах удаления SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> обычно составляет от 70 до 90 % [16]. Этот метод характеризуется масштабными размерами аппаратуры и значительными

капитальными затратами. В качестве промышленных адсорбентов нередко используют активированный уголь, силикагель, алюмогель, природные и синтетические цеолиты [17]. К достоинствам адсорбционных методов можно отнести глубокую очистку газов от токсичных примесей и сравнительную легкость регенерации этих примесей. Недостатками большинства адсорбционных установок принято считать [17] периодичность процесса, высокую стоимость, капиталоемкость.

Существуют также каталитические методы очистки газов, основанные на реакциях в присутствии катализаторов [18]. В результате каталитических реакций примеси, находящиеся в газе, трансформируются в практически безвредные соединения. В качестве эффективных катализаторов, находящихся применение на практике, используются платина, железо, молибден, хром, родий, палладий, рутений, а также кобальт, никель, цинк и их оксиды [18]. При сравнительно невысоких температурах и давлениях каталитические методы обеспечивают глубокую очистку газов от токсичных примесей (до 99,9 %) [18].

Общим недостатком всех вышеперечисленных методов является то, что каждый из них должен сопровождаться предварительным процессом пылеочистки дымовых газов, что существенно усложняет и удорожает в целом весь процесс очистки. В таких условиях использование типового технологического оборудования и традиционных методов очистки не всегда позволяет обеспечить удовлетворительный уровень антропогенных выбросов (летучей золы, оксидов серы, азота, углерода и др.) при сжигании угольных топлив.

#### **Возможные перспективы замены угольного топлива на органоводоугольные композиции**

К способам снижения концентраций летучей золы, поступающей в атмосферу вместе с дымовыми газами, относится не только применение золоулавливающих устройств. Также в настоящее время активно ведутся работы по созданию новых типов топлива, которые по своему физико-химическому составу будут являться более экологичными и практически безотходными. В качестве таких топлив выступают водоугольные и органоводоугольные композиции [19–22].

Применение водоугольного и органоводоугольного топлив позволяет повысить эффективность сжигания угля, утилизировать угольные шламы, уменьшить взрывоопасность тонкодисперсной угольной пыли, снизить количество выбросов в атмосферу оксидов азота и серы [19, 20]. Технологии сжигания ВУТ и ОВУТ считаются практически безотходными. Мелкие частицы в составе суспензий (размером 50 микрон и меньше) либо целиком сгорают в топке, либо принципиально не горят (оксиды металлов). В вихревом потоке они сталкиваются с препятствиями (стенками), теряют энергию и попадают в устройства золоотделения. Все летучие и горючие частицы полностью сгорают в топке. В отходах остается лишь зола в виде мелкодисперсных частиц оксидов металлов, поскольку при температуре горения ниже 1100 °С они не спекаются между собой [21].

Зола от сжигания ВУТ и ОВУТ отличается от золы, полученной при сжигании угля в пылевидной форме. Отличие состоит, прежде всего, в объемных характеристиках частиц золы, что связано с отличием в процессах горения и выжигания частиц угля. При горении суспензий ВУТ вода, входящая в состав топлива (30–40 %), выступает в роли окислителя, что ускоряет процесс выгорания угля в составе суспензии. В табл. 2 представлен типовой состав золы, полученной при сжигании водоугольных суспензий [23],

Таблица 2

Химический состав золы от сжигания ВУТ [23]

Компоненты золы ВУТ (мас. %)												
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	BaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
55–58	18–22	6–10	2–4	1–2	0–0,21	0–2	0–3	0,8–1	0–0,14	0–0,002	0–0,004	0–0,031

Из табл. 2 видно, что содержание  $\text{SiO}_2$  достигает почти 60 %, магнетита и гематита колеблется в пределах 1–5 %, кварца – до 3 %, сажистых обломков (спеков) со смоляным блеском – до 2 %, силикатов – до 15 %. Компонентный состав золы указывает на возможность получения из нее дорогостоящих материалов [23].

Экологические риски, связанные с содержанием в золе тяжелых металлов, могут быть минимизированы путем совместного сжигания водоугольных суспензий с нефтяными шламами. В работе [24] рассматривается система сжигания подобного топлива в псевдооживленном слое для изучения характеристик горения минералогического состава золы, регистрации газообразных выбросов. Результаты исследований [24, 25] показали, что совместное сжигание нефтяного шлама и водоугольной суспензии имеет удовлетворительные энергетические характеристики. Концентрации газообразных выбросов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) не превышают установленных стандартов. Количество тяжелых металлов (табл. 3) в полученной золе существенно ниже, чем в золе, образующейся при сжигании угля [24, 25].

Таблица 3

Сравнительный анализ микроэлементов золы разных топлив [24, 25]

Тип золы	Концентрация элемента, (мг/кг)						
	Cr	Pb	Zn	Cd	Cu	Hg	As
Угольная зола [25]	47–281	40–175	70–294	1–6	39–254	<0,01–1,4	22–162
Зола от совместного сжигания ВУТ и нефтешламов [24]	14–48	8–38	25–70	0,05–0,1	20–56	–	3–8

Но вместе со всеми представленными достоинствами технологий использования суспензий ВУТ существуют и принципиальные недостатки. В частности, основным недостатком в процессе горения водоугольной суспензии является снижение температуры в топочном пространстве, что приводит к росту физического и химического недожога. Данная проблема в работах [19–21] была решена путем добавления жидкого горючего компонента (отработанного турбинного, трансформаторного, моторного масла с относительной массовой концентрацией в суспензии от 5 до 15%) к водоугольным композициям. Однако данных о масштабах влияния подобного изменения состава суспензии ВУТ на объемы образующихся антропогенных выбросов практически нет.

В рамках исследования [21] определена масса зольного остатка процесса «низкотемпературного» сгорания ВУТ и ОВУТ, а также доля несгоревших горючих компонентов в зольном остатке при различных температурах сжигания. Экспериментально установлено, что доля несгоревших горючих компонентов, достигающая 25 % при температурах 460 °С, нелинейно снижается с увеличением температуры до 1–2 % (при температуре 685 °С) [21].

Для изучения влияния основного компонента ОВУТ на зольность процесса «низкотемпературного» сгорания дополнительно определялась доля несгоревших горючих компонентов топливных суспензий на основе продуктов углепереработки и углеобогащения – фильтр-кеков (КЕКов «СС» и «Т») без добавления жидкого горючего компонента и с турбинным маслом) [21]. Устойчивое горение данных составов ОВУТ наблюдалось при температуре сжигания не менее 700 °С. Доля несгоревших горючих компонентов при данных условиях составила 38,25 и 17,73 % для ОВУТ на основе КЕКов «СС» и «Т», соответственно. При добавлении в ВУТ 10 % турбинного масла доля несгоревших горючих компонентов уменьшалась до 8,37 и 0,44 %. С увеличением зольности и уменьшением выхода летучих исходных КЕКов общий объем летучих, формирующихся при термическом разложении органической массы угля, значительно уменьшался. Последнее приводило к недогреву капли топлива и значительному недожогу. Добавление в состав ОВУТ жидкого

горючего компонента компенсировало уменьшение объема летучих и позволило уменьшить недожог. В этом проявляется одно из преимуществ ОВУТ по сравнению с ВУТ [21].

Для получения полной картины об экологических аспектах сжигания суспензий ВУТ и ОВУТ в дополнение к исследованию [21] в настоящей работе для тех же составов (КЕКи «СС» и «Т», КЕКи «СС» и «Т» с добавлением 10 % турбинного масла) измерялись концентрации основных антропогенных выбросов ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ).

С этой целью стенд [21] дополнительно оснащался специализированным газоанализатором *Testo 340*, в корпусе которого размещены измерительные сенсоры, определяющие концентрацию компонентов газовой смеси ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ). Модульный зонд газоанализатора, встроенный в технологическое отверстие в камере сгорания, осуществлял отбор проб дымовых газов, образующихся при горении топлива. Полученные концентрации газообразных выбросов передавались на ПК в режиме реального времени. При дальнейшем анализе рассматривались максимальные концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ .

На рис. 1, а показаны аппроксимационные кривые (получены при обработке экспериментальных значений), характеризующие выбросы  $\text{CO}_2$  (сплошные) и  $\text{CO}$  (пунктирные), образующиеся при сжигании исследованных топлив.

Установлено, что концентрации  $\text{CO}_2$  (рис. 1, а) максимальны для суспензий ОВУТ, по сравнению с суспензиями ВУТ. Это обусловлено тем, что содержащиеся в составе ОВУТ горючие жидкости испаряются и формирующиеся пары реагируют с окислителем (воздухом), инерционность процесса зажигания образца топлива снижается, что приводит к росту интенсивности выхода газообразных веществ.

Исходя из трендов (рис. 1, а), можно сделать заключение о том, что для уменьшения выбросов  $\text{CO}_2$  целесообразно снижение температуры  $T_g$ . С другой стороны, значительное уменьшение последней может привести к существенному недожогу топлива и снижению эффективной теплоты сгорания. В этом случае целесообразно стремиться к некоторым оптимальным условиям с точки зрения экологической нагрузки и энергетических индикаторов.

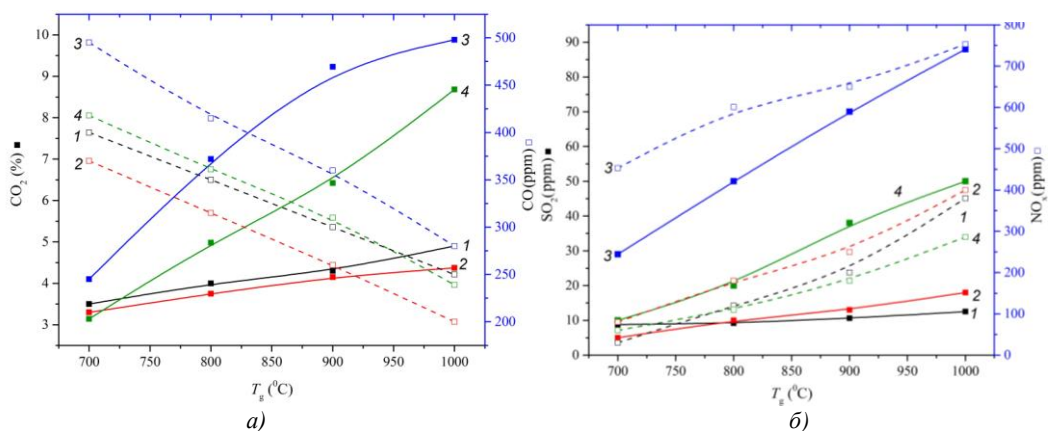


Рис. 1. Максимальные концентрации  $\text{CO}_2$  (сплошные линии),  $\text{CO}$  (пунктирные линии) (а) и  $\text{SO}_2$  (сплошные линии),  $\text{NO}_x$  (пунктирные линии) (б) в зависимости от температуры сжигания при сжигании ВУТ и ОВУТ (1 – 100% КЕК «СС»; 2 – 100% КЕК «Т»; 3 – 90 % КЕК «СС», 10 % турбинного масла; 4 – 90 % КЕК «Т», 10 % турбинного масла)

Максимальные значения концентраций угарного газа (рис. 1, а) также характерны для составов ОВУТ по сравнению с ВУТ. Однако по представленным экспериментальным данным можно отметить ключевую особенность, заключающуюся в том, что при высоких температурах концентрации  $\text{CO}$  практически идентичны для всех исследованных топлив и

лежат в диапазоне от 200 до 275 ppm. В области низких температур (700 °С) для большинства составов прослеживалась аналогичная тенденция (диапазон концентраций СО от 350 до 400 ppm) за исключением топлив на основе КЕКа «СС» с примесью 10 % турбинного масла. Подобное можно объяснить высокой зольностью исходного КЕКа «СС» (50,89 %) [21], которая больше, чем у КЕКа «Т» почти в 2 раза (21,2 %) [21]. Отрицательная роль последней заключается в том, что зольная масса обволакивает горючие компоненты топлива и препятствует доступу к ним кислорода. В результате горючая масса топлива не догорает.

Зависимости, представленные на рис. 1, б характеризуют несколько ключевых аспектов. Во-первых, температура сжигания в процессе горения ВУТ и ОВУТ играет определяющую роль в процессе образования оксидов SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>. Установлено, что с ростом температуры газовоздушной среды интенсивность выхода оксидов азота и серы при горении возрастает. Основное образование топливных оксидов начинается при температурах свыше 600 °С. При таких температурах обеспечивается устойчивое зажигание и последующее горение летучих.

Во-вторых, из рис. 1, б можно сделать вывод о том, что концентрации NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> для ВУТ (на примере КЕКов) меньше, чем ОВУТ. Это обусловлено наличием в суспензиях горючей жидкости (турбинного масла), в химическом составе которой присутствуют серосодержащие и азотосодержащие компоненты, способствующие образованию вредных газов. Однако, как можно заметить из полученных зависимостей, имеющийся прирост концентраций NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> не превышает установленных экологических нормативных значений [26].

Полученные данные позволяют сделать заключение о том, что добавление в суспензии ВУТ жидкого горючего компонента может способствовать некоторому росту концентраций вредных выбросов. Однако наличие 10 % турбинного масла в составе ОВУТ приводит к уменьшению времен задержки зажигания коксового остатка за счет прогрева от газофазного горения не только продуктов разложения частиц угля, но и паров горючей жидкости, а также к снижению температуры зажигания на 20–50 °С. Как следствие, можно за счет снижения температуры компенсировать возможный рост концентраций выбросов СО<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub>. К тому же, добавление жидкого горючего компонента приведет к небольшому росту температуры в зоне горения, что может оказывать существенное влияние на полноту и характеристики зольного остатка.

Анализ литературных данных [19–26] и проведенные эксперименты позволили сделать вывод о целесообразности развития технологий сжигания ВУТ и ОВУТ. Данные топлива являются экологически перспективными с точки зрения объемов образующихся выбросов, а также формирующейся (в результате сжигания) золы, которая может быть пригодна для утилизации в разных отраслях промышленности, например в производстве строительных материалов или на цементном заводе, что позволяет полностью решить проблемы с отходами сгорания подобного топлива.

### **Выводы**

1. Выполненный анализ позволяет сделать заключение о целесообразности перехода от традиционного использования угля к технологиям сжигания органоводоугольных суспензий, что, в конечном итоге, позволит получить золоотходы с меньшим количеством несгоревшего топлива, которые в дальнейшем могут быть использованы в разных отраслях промышленности.
2. В качестве перспективных компонентов органоводоугольных суспензий, помимо углей разной степени метаморфизма, целесообразно использовать типичные отходы их обогащения и переработки, в частности фильтр-кеки. Ежегодные объемы получения и аккумуляции таких отходов исчисляются десятками миллионов тонн. Их применение в качестве основных твердых горючих компонентов ОВУТ и сжигание



последних на тепловых электрических станциях позволят решить крупные проблемы утилизации отходов. Применение в качестве дополнительного жидкого горючего компонента отработанных масел способствует повышению энергетических характеристик работы соответствующих установок.

3. Результаты выполненных экспериментов показали, что, применяя органоводоугольные топлива, можно добиться удовлетворительных экологических показателей (по сравнению с традиционным подходом, основанным на пылевидном сжигании углей). При правильном учете всех особенностей процесса (свойств топлива, технологии и температуры сжигания) у такого топлива могут быть большие энергетические, экологические и экономические перспективы.

### Литература

1. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. 2017. V. 144. P. 373-384. DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.
2. Blissett R.S., Rowson N.A., A review of the multi-component utilisation of coal fly ash // Fuel. 2012. V. 97. P. 1-23. DOI.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024.
3. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash // Prog. Energy Combust. Sci. 2010. V. 36. I. 3. P. 327-363. DOI.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003.
4. Ribeiro J., Valentim B., Ward C., Flores D. Comprehensive characterization of anthracite fly ash from a thermo-electric power plant and its potential environmental impact // Int. J. Coal Geol. 2011. V. 68. I. 2-3. P. 204-212. DOI.org/10.1016/j.coal.2011.01.010.
5. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash // Earth-Sci. Rev. 2015. V. 141. P. 105-121. DOI.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016
6. Афанасьева О.В., Мингалева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С. 26–36.
7. Zhai M., Guo L., Sun L., Zhang Y., Dong P., Shi W. Desulfurization performance of fly ash and CaCO<sub>3</sub> compound absorbent // Powder Technol. 2017. V.305. P. 553-561. DOI.org/10.1016/j.powtec.2016.10.021
8. Davini P. Flue gas treatment by activated carbon obtained from oil-fired fly ash // Carbon. 2002. V. 40. P. 1973-1979. DOI.org/10.1016/S0008-6223(02)00049-0
9. Suárez-Ruiz I., Hower J.C., Thomas G.A. Hg and Se capture and fly ash carbons from combustion of complex pulverized feed blends mainly of anthracitic coal rank in Spanish power plants // Energy Fuel. 2007. V. 21. P. 59-70. DOI:10.1021/ef0603481
10. López-Antón M.A., Díaz-Somoano M. Mercury retention by fly ashes from coal combustion: influence of the unburned coal content // Ind. Eng. Chem. Res. 2007. V. 46. P. 927-931. DOI:10.1021/ie060772p
11. Shanthakumar S., Singha D.N., Phadke R.C. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations // Prog. Energy Combust. Sci. 2008. V. 34. I. 6. P. 685-695. DOI.org/10.1016/j.peccs.2008.04.001
12. Jiao J., Zheng Y. A multi-region model for determining the cyclone efficiency // Sep. Purif. Technol. 2007. V. 53. P. 266-273. DOI.org/10.1016/j.seppur.2006.07.011
13. Saleem M., Krammer G. Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter // J. Hazard. Mater. 2007. V. 144. P. 677-681. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.094
14. Peukert W., Wadenpohl C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties // Powder Technol. 2001. V. 118. I. 1-2. P. 136-148. DOI.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7
15. Hanne O., Timo N., Hannu K. Increase the utilization of fly ash with electrostatic precipitation // Miner. Eng. 2006. V. 19. P. 1596-1602. DOI.org/10.1016/j.mineng.2006.07.002

16. Sun W.-Y., Wang Q.-Y., Ding S.-L., Su S.-J. Simultaneous absorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> with pyrolusite slurry combined with gas-phase oxidation of NO using ozone: Effect of molar ratio of O<sub>2</sub> / (SO<sub>2</sub> + 0.5NO<sub>x</sub>) in flue gas // Chem. Eng. J. 2013. V. 228. P. 700-707.
17. Mathieu Y., Tzanis L., Soularida M., Patarin J., Vierling M., Molière M. Adsorption of SO<sub>x</sub> by oxide materials: A review // Fuel Process. Technol. 2013. V. 114. P. 81-100. DOI.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.019
18. Thirupathi B., Smirniotis P.G. Nickel-doped Mn/TiO<sub>2</sub> as an efficient catalyst for the low-temperature SCR of NO with NH<sub>3</sub>: Catalytic evaluation and characterizations // J. Catal. 2012. V. 288. P. 74-83. DOI.org/10.1016/j.jcat.2012.01.003
19. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak, P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // Fuel Process. Technol. 2016. V. 148. P. 224-235. DOI.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.008
20. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., Strizhak, P.A. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste // Energy Fuels. 2016. V. 30. I. 4. P. 3441-3450. DOI:10.1021/acs.energyfuels.5b02881
21. Лыршиков С.Ю., Стрижак П.А., Шевырев С.А. Характеристики зольного остатка сжигания капель органоводоугольных топливных композиций при разных температурах окислителя // Кокс и химия. 2016. № 5. С. 11–19.
22. Ильин А.К., Ильин Р.А., Горбанов Т.Р. О дисперсном составе водотопливных эмульсий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 11-12. С. 33–40.
23. Лысак Д.В., Ростовщикова Д.В., Перминова Л.Г. Водоугольное топливо в теплоэнергетике // Молодёжь и наука: Сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. 2011. С. 1–4.
24. Liu J., Jiang X., Zhou L., Wang H., Han X. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler // J. Hazard. Mater. 2009. V. 167. P. 817-823. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.061
25. Medina A., Gamero P., Querol X., Moreno N., León B., Almanza M., Vargas G., Izquierdo M., Font O. Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization // J. Hazard. Mater. 2010. V. 181. P. 82-90. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.096
26. Nyashina G., Legros J.C., Strizhak P. Environmental potential of using coal-processing waste as the primary and secondary fuel for energy providers // Energies. 2017. V.10 (3). P 405.

#### Авторы публикации

**Дмитриенко Маргарита Александровна** – аспирант кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Энергетического института Томского политехнического университета.

**Няшина Галина Сергеевна** – аспирант кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Энергетического института Томского политехнического университета.

**Шлегель Никита Евгеньевич** – студент кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Энергетического института Томского политехнического университета.

**Шевырев Сергей Александрович** – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Энергетического института Томского политехнического университета.

#### References

1. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. 2017. V. 144. P. 373-384. DOI.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.

2. Blissett R.S., Rowson N.A., A review of the multi-component utilisation of coal fly ash // *Fuel*. 2012. V. 97. P. 1-23. DOI.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024.
3. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010. V. 36. I. 3. P. 327-363. DOI.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003.
4. Ribeiro J., Valentim B., Ward C., Flores D. Comprehensive characterization of anthracite fly ash from a thermo-electric power plant and its potential environmental impact // *Int. J. Coal Geol.* 2011. V. 68. I. 2-3. P. 204-212. DOI.org/10.1016/j.coal.2011.01.010.
5. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 141. P. 105-121. DOI.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016
6. Afanaseva O.V., Mingaleeva G.R., Dobronravov A.D., Shamsutdinov E.V. Complex use of ash and slag waste // *Proceedings of higher educational establishments. Energy problem.* 2015. I. 7-8. P. 26-36.
7. Zhai M., Guo L., Sun L., Zhang Y., Dong P., Shi W. Desulfurization performance of fly ash and CaCO<sub>3</sub> compound absorbent // *Powder Technol.* 2017. V.305. P. 553-561. DOI.org/10.1016/j.powtec.2016.10.021
8. Davini P. Flue gas treatment by activated carbon obtained from oil-fired fly ash // *Carbon.* 2002. V. 40. P. 1973-1979. DOI.org/10.1016/S0008-6223(02)00049-0
9. Suárez-Ruiz I., Hower J.C., Thomas G.A. Hg and Se capture and fly ash carbons from combustion of complex pulverized feed blends mainly of anthracitic coal rank in Spanish power plants // *Energy Fuel.* 2007. V. 21. P. 59-70. DOI:10.1021/ef0603481
10. López-Antón M.A., Díaz-Somoano M. Mercury retention by fly ashes from coal combustion: influence of the unburned coal content // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. V. 46. P. 927-931. DOI:10.1021/ie060772p
11. Shanthakumar S., Singha D.N., Phadke R.C. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2008. V. 34. I. 6. P. 685-695. DOI.org/10.1016/j.peccs.2008.04.001
12. Jiao J., Zheng Y. A multi-region model for determining the cyclone efficiency // *Sep. Purif. Technol.* 2007. V. 53. P. 266-273. DOI.org/10.1016/j.seppur.2006.07.011
13. Saleem M., Krammer G. Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 144. P. 677-681. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.094
14. Peukert W., Wadenpohl C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties // *Powder Technol.* 2001. V. 118. I. 1-2. P. 136-148. DOI.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7
15. Hanne O., Timo N., Hannu K. Increase the utilization of fly ash with electrostatic precipitation // *Miner. Eng.* 2006. V. 19. P. 1596-1602. DOI.org/10.1016/j.mineng.2006.07.002
16. Sun W.-Y., Wang Q.-Y., Ding S.-L., Su S.-J. Simultaneous absorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> with pyrolusite slurry combined with gas-phase oxidation of NO using ozone: Effect of molar ratio of O<sub>2</sub> / (SO<sub>2</sub> + 0.5NO<sub>x</sub>) in flue gas // *Chem. Eng. J.* 2013. V. 228. P. 700-707.
17. Mathieu Y., Tzanis L., Soularida M., Patarin J., Vierling M., Molière M. Adsorption of SO<sub>x</sub> by oxide materials: A review // *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 114. P. 81-100. DOI.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.019
18. Thirupathi B., Smirniotis P.G. Nickel-doped Mn/TiO<sub>2</sub> as an efficient catalyst for the low-temperature SCR of NO with NH<sub>3</sub>: Catalytic evaluation and characterizations // *J. Catal.* 2012. V. 288. P. 74-83. DOI.org/10.1016/j.jcat.2012.01.003
19. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak, P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // *Fuel Process. Technol.* 2016. V. 148. P. 224-235. DOI.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.008
20. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevryev S.A., Strizhak, P.A. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste // *Energy Fuels.* 2016. V. 30. I. 4. P. 3441-3450. DOI:10.1021/acs.energyfuels.5b02881

21. Lyrshchikov S.Y., Strizhak P.A., Shevyrev S.A. Ash residue from droplets of organic coal–water fuels burned at different oxidant temperatures// *Coke and Chemistry*. V. 59. I. 5. P. 178-185. DOI: 10.3103/S1068364X16050033

22. Ilyin A.K., Ilyin R.A., Gorbanov T.R. About disperse structure of water fuel emulsion // *Proceedings of higher educational establishments. Energy problem*. 2012. I. 11-12. P. 33-40.

23. Lysak D.V., Rostovshikova D.V., Perminova L.G. Water-coal fuel in heat power engineering // *Proceedings of 5<sup>th</sup> scientific and technical conference of students and young scientists*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University: 2011. C. 1-4.

24. Liu J., Jiang X., Zhou L., Wang H., Han X. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 167. P. 817-823. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.061

25. Medina A., Gamero P., Querol X., Moreno N., León B., Almanza M., Vargas G., Izquierdo M., Font O. Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 181. P. 82-90. DOI.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.096

26. Nyashina G., Legros J.C., Strizhak P. Environmental potential of using coal-processing waste as the primary and secondary fuel for energy providers // *Energies*. 2017. V.10 (3). P 405.

#### **Authors of the publication**

***Dmitrienko Margarita Aleksandrovna*** – PhD student at the Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University.

***Nyashina Galina Sergeevna*** – PhD student at the Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University.

***Shlegel Nikita Evgenievich*** – student at the Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University.

***Shevyrev Sergey Aleksandrovich*** – Candidate of Technical Sciences, Researcher of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University.

***Поступила в редакцию***

***30 января 2017 г.***