

УДК 662.61

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ УГЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КОТЛОВ

© 2020 г. В. К. Любов^{1,*}

¹ Высшая школа энергетики, нефти и газа,

ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002 Архангельск, Россия

*e-mail: v.lubov@narfu.ru

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

После доработки 05.03.2020 г.

Принята к публикации 03.06.2020 г.

Показано, что модернизация котлоагрегатов на низкотемпературную вихревую (НТВ или ВИР) технологию сжигания углей может обеспечить комплексное повышение их энергоэкологических показателей и эффективность работы золоуловителей. Удельные выбросы тяжелых металлов с частицами золы, уносимыми в атмосферу, отнесенные к единице выработанной энергии, для котлоагрегата с ВИР-технологией значительно меньше, чем для котла с традиционной схемой сжигания.

Ключевые слова: котлоагрегат, уголь, вредные вещества, топка, золоуловитель, тяжелые металлы, выбросы, коэффициент полезного действия

DOI: 10.31857/S0023117720050060

В соответствии с программой развития электроэнергетики до 2030 г. планируется, что почти половина угольной энергетики должна быть обеспечена генерирующими мощностями на базе новых “чистых” технологий производства энергии с современными системами очистки дымовых газов от оксидов серы, азота и летучей золы, а системы золоулавливания и очистки дымовых газов уже существующих ТЭС подвергнуты глубокой модернизации. Однако в настоящее время угольные электростанции – это серьезный источник загрязнения окружающей среды, так как при сжигании углей образуются золошлаковые отходы, частички несгоревшего пылевидного топлива, серный и сернистый ангидрид, оксиды азота, газообразные продукты неполного сгорания, бенз(а)пирен и др. При этом в золошлаковых отходах и летучей золе, выбрасываемой с дымовыми газами в атмосферный воздух, происходит концентрация тяжелых металлов и других вредных веществ.

Доминирующей технологией сжигания угольного топлива является схема прямоточного пылеугольного факела (ППФ) различной модификации. Данная схема сжигания позволила успешно решить многие проблемы энергетики [1–15]. Однако для нее характерна повышенная взрывоопасность систем пылеприготовления, эмиссии значительных количеств вредных веществ в высокотемпературной зоне горения, шлакование поверхностей нагрева. Подавляющее большинство угольных энергоблоков как у нас в стране,

так и за рубежом продолжают работать по данной технологии пылесжигания. При этом миллионы тонн топлива измельчаются в пыль, часть которой попадает в атмосферу, способствуя в совокупности с другими факторами образованию смога. Немедленный полный отказ от угольной генерации во всем мире по экологическим соображениям нереален, однако и долгосрочное сохранение ею своих позиций уже невозможно. В этой ситуации компромиссный переходный путь открывает технологии, обеспечивающие возможность низкоэмиссионного сжигания топлив [7–14].

Внедрение низкоэмиссионных схем сжигания твердого топлива в топках с кипящим и циркулирующим кипящим слоем (КС и ЦКС) и в топках с низкотемпературным вихрем (НТВ- или ВИР-технология) позволяет значительно снизить воздействие угольных ТЭС на окружающую среду.

Котлы с КС и ЦКС лучше приспособлены для сжигания углей разных сортов с неблагоприятными теплотехническими характеристиками, чем с ППФ, более экологичны, однако единичная мощность таких котлов в разы меньше крупнейших пылеугольных, и пока на котлоагрегатах с КС и ЦКС не внедрены ультрасверхкритические параметры пара (35 МПа, 700–720°C), что ограничивает их эффективность.

Существенным техническим и коммерческим преимуществом ВИР-технологии является то, что она предназначена для всего действующего парка котельных установок, в том числе с ультрасверх-

критическими параметрами пара, и может быть реализована в сроки плановых ремонтов [10–13].

Все низкоэмиссионные топочные процессы должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать низкотемпературный топочный процесс при высоких энергетических и экологических показателях;
- обеспечивать ступенчатое сжигание топлива и иметь высокую экономичность при малых выбросах воздуха;
- иметь продолжительную кампанию между остановками для чистки поверхностей нагрева;
- допускать ввод сорбентов для обеспечения очистки дымовых газов от оксидов серы.

Данным требованиям отвечают топки с ВИР-технологией сжигания и топки с КС и ЦКС. В настоящее время большинство пылеугольных энергоблоков оборудовано золоуловителями мокрого типа, степень очистки в которых не превышает 95–96%, или оснащены электрофильтрами, КПД которых при благоприятных условиях может достигать 99.5–99.9% [16, 17]. Тем не менее они не в состоянии уловить мелкие стекловидные частицы, образующиеся из минеральной части топлива в высокотемпературных зонах котлоагрегатов с ППФ и имеющие большое удельное электрическое сопротивление.

Цель данной работы – экспериментальное исследование влияния результатов модернизации котлов на низкотемпературную вихревую (НТВ или ВИР) технологию сжигания углей, на их энергоэкологические показатели, эффективность работы золоуловителей и удельные выбросы тяжелых металлов с частицами золы, уносимыми в атмосферу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В процессе промышленно-эксплуатационных испытаний котлоагрегатов, выполняемых по третьей категории сложности [18], проводили отбор проб топлива до и после систем пылеприготовления, а также очаговых остатков (золы и шлака). После предварительной подготовки и сокращения отобранных проб исследовался гранулометрический состав угольной пыли и летучей золы с помощью ситового метода и анализатора *Retzsch AS 200 Control* в соответствии с требованиями ГОСТ 2093-82. Для отобранных проб очаговых остатков, а также каждой фракции летучей золы, выделенной в процессе ситового анализа, определяли содержание горючих веществ в соответствии с ГОСТ 11022-95 и выполняли микроскопические исследования.

Для определения элементного состава разных фракций предварительно высушенной летучей золы использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр *EDX-8000*, принцип работы которо-

го основан на измерении интенсивности флуоресцентного излучения, испускаемого атомами определяемых элементов, содержащихся в исследуемой пробе, под воздействием рентгеновских лучей. Интенсивность излучения пропорциональна содержанию соответствующего элемента. При этом каждый элемент, входящий в состав образца, флуоресцирует на специфической для него длине волны. Прибор позволяет одновременно обнаружить, измерить и зафиксировать интенсивность излучения различных элементов.

При исследовании состава продуктов сгорания использовался газоанализатор электрохимического типа *Testo-350 XL*. Теплотехнические характеристики исследуемых углей определяли согласно ГОСТ 27314-91, ГОСТ 11022-95 и ГОСТ 6382-2001. Удельную теплоту сгорания измеряли с помощью калориметрической бомбы *IKA C 2000 Basic Version 2* с жидкостным криотермостатом *LOIP FT-216-25* в соответствии с ГОСТ 147-95.

При определении расходов дымовых газов использовали пневмометрическую трубку системы ВТИ и микроанометр прецизионного прибора *Testo-435*. Результаты исследования полей скоростей использовали для определения концентраций твердых частиц в дымовых газах и степени их очистки в золоуловителях. При этом применялись методы внешней и внутренней фильтрации, для реализации которых использовалась аспирационная установка ОП-442 ТЦ, пылезаборная трубка, фильтровальные патроны и др.

Вся обработка экспериментальных данных по исследованию работы котлоагрегатов проводилась с помощью многомодульного программно-методического комплекса [19], при этом КПД-брутто определялись по уравнению обратного баланса.

Результаты внедрения ВИР-технологии на котлоагрегатах, оборудованных электрофильтрами. Модернизация котельных агрегатов на основе низкотемпературного вихревого метода организации топочного процесса обеспечивает комплексное повышение технико-экономических и экологических показателей работы [1, 7–14]. Так, при проведении испытаний реконструированных котлов ПК-10 ТЭЦ “Явожно” и ОР-215 ТЭЦ “Пулавы” в Польше было отмечено, что наряду с увеличением КПД котлоагрегатов и снижением эмиссий оксидов азота (рис. 1) наблюдается повышение эффективности работы электрофильтров без их модернизации.

Исследование проб золы, отобранной из-под электрофильтров котла ОР-215 станционный (далее – ст.) № 4 ТЭЦ “Пулавы”, модернизированного на низкотемпературную вихревую схему, и котлоагрегата ст. № 1 (сжигание в ППФ), показало (рис. 2, кривая 2), что летучая зола реконструированного котла имеет более тонкий гранулометрический состав (коэффициент, характеризу-

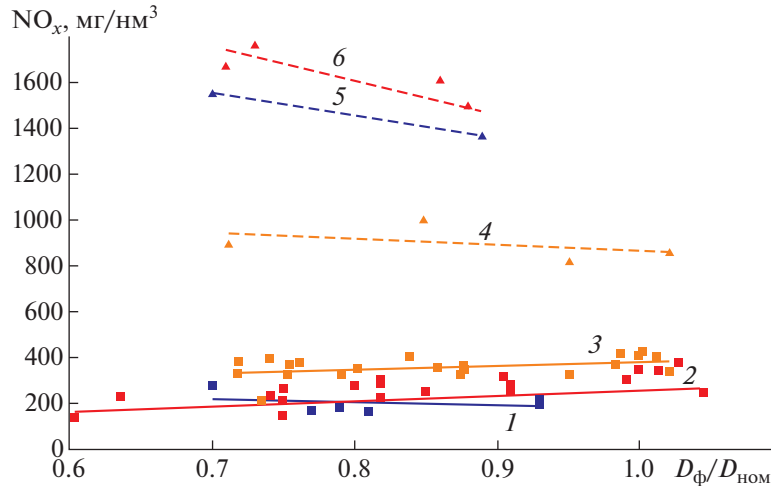


Рис. 1. Влияние технологии сжигания и нагрузки котлоагрегатов ПК-10 на выбросы оксидов азота по данным ООО «Политехэнерго»: 1 – ст. № 8 СТЭЦ-1 (хакасский уголь, ВИР); 2 – ст. № 4, 8 СТЭЦ-1 (кузнецкий + интинский угли, ВИР); 3 – ТЭЦ «Явожно» (Польша, ВИР); 4 – ТЭЦ «Явожно-2» (Польша, ППФ); 5 – ст. № 5 СТЭЦ-1 (хакасский уголь, ППФ); 6 – ст. № 5 СТЭЦ-1 (кузнецкий + интинский угли, ППФ).

ющий тонкость состава, $b = 0.043$), что вызвано большим временем пребывания крупных и средних топливных частиц в топке модернизированного котлоагрегата и большей полнотой их выгорания. Более тонкий гранулометрический состав золы на выходе из топки реконструированного котла (рис. 2, кривая 2) обеспечил ей более высокую внешнюю удельную поверхность [9]. Аналогичные результаты были получены при исследовании летучей золы, образующейся при сжигании березовского угля в котлоагрегатах с ППФ- и ВИР-технологией [1].

Сравнительный анализ показал, что увеличение внешней удельной поверхности летучей золы при ВИР-технологии сжигания наблюдается не только при соизмеримой тонкости помола топлива, но и при более грубом помоле для ВИР-технологии [1]. Из результатов изучения микроструктуры летучей золы видно, что это происходит за счет меньшей степени оплавленности и большей рельефности золовых частиц, что объясняется снижением уровня максимальных температур в топочных камерах модернизированных котлов на $150\text{--}200^\circ\text{C}$ и температур на выходе из нее на $80\text{--}120^\circ\text{C}$ [9, 10].

В зоне короны электрофильтров образуются газовые ионы различной полярности. Золовые частицы вследствие адсорбции на их поверхности газовых ионов приобретают соответствующий электрический заряд и под действием сил электрического поля движутся к электродам и осаждаются на них. Исследование формы золовых частиц, выполненное с помощью микроскопа, показало, что особенно существенное различие в форме наблюдается для золовых частиц размером $50 \leq x < 100$ мкм [10]. Для котла ст. № 1 с обычной камерной топкой частицы золы данного размера

имеют форму сферическую или близкую к ней. Частицы летучей золы тех же фракций модернизированного котлоагрегата имеют менее правильную форму и большую внешнюю удельную поверхность. С увеличением размеров золовых

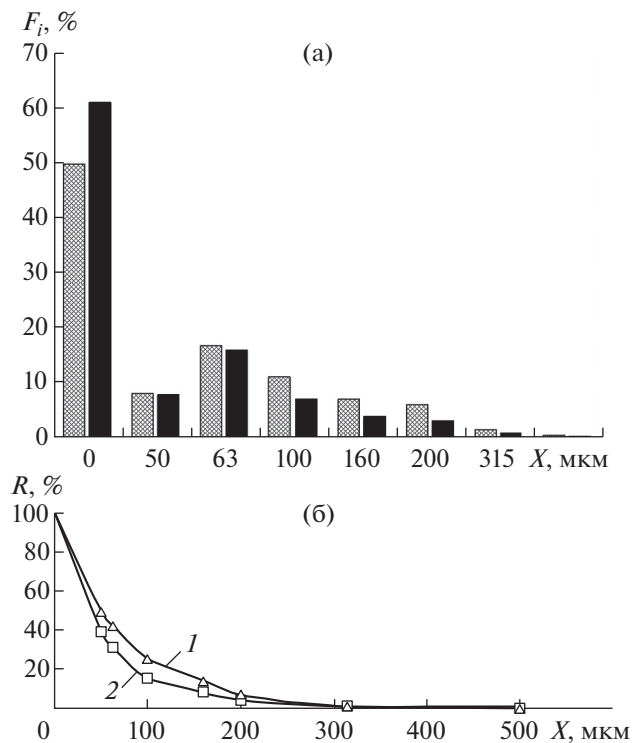


Рис. 2. Гранулометрический состав золы из-под электрофильтров котлоагрегата ст. № 1 с ППФ (штриховка) и № 4 с ВИР-технологией (заливка) ТЭЦ «Пулавы»: (а) – фракционные остатки, (б) – интегральные характеристики для котла с ППФ (1), с ВИР-технологией (2).

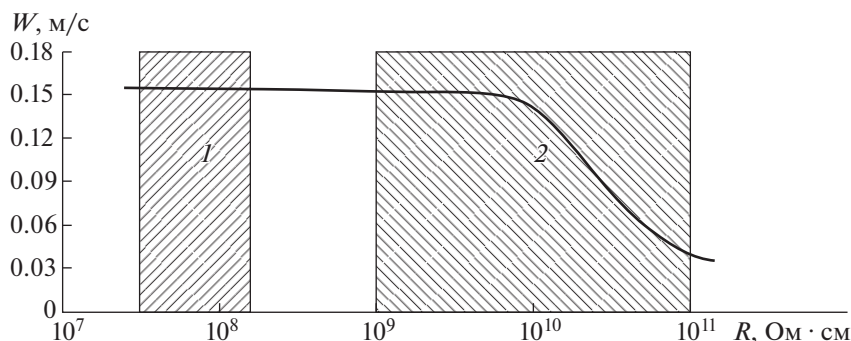


Рис. 3. Влияние технологии сжигания углей шахты Богданка на поверхностное электрическое сопротивление золы [17]: 1 – зола котлов с ВИР-технологией; 2 – зола котлов с ППФ ТЭЦ “Пулавы”.

частиц степень правильности формы уменьшаются и различия в форме частиц летучей золы для котлов ст. № 1 и № 4 сглаживаются. Повышение адсорбционной способности золовых частиц за счет увеличения внешней удельной поверхности позволяет им воспринимать больший электрический заряд, что повышает скорость дрейфа частиц к осадительным электродам.

Сильное влияние на скорость дрейфа частиц оказывает и поверхностное удельное электрическое сопротивление золы. Для обеспечения эффективной работы электрофильтров этот параметр должен быть в пределах 10^7 – 10^9 Ом см [17].

Частицы золы способны адсорбировать на своей поверхности и присутствующие в газе компоненты, обладающие низким удельным сопротивлением, прежде всего пары воды и оксиды серы. Процесс адсорбции резко усиливается, а удельное сопротивление падает, когда температура продуктов сгорания приближается к точке росы. Модернизация котлоагрегатов на низкоэмиссионную схему позволила снизить температуру уходящих газов на 40 – 50°C , что интенсифицировало процесс адсорбции паров воды и диоксида серы поверхностью золовых частиц и обеспечило снижение ее удельного сопротивления. Однако для исключения коррозии температура дымовых газов на входе в электрофильтр должна превышать температуру точки росы не менее чем на 5°C [17]. Как показали исследования поверхностного удельного сопротивления летучей золы, образующейся при сжигании углей шахты Богданка в котлах ОР-215 ТЭЦ “Пулавы” [20], перевод котлоагрегатов на ВИР-технологии сжигания обеспечил значительное снижение удельного сопротивления золы (рис. 3).

Снижение температуры уходящих газов, организация эффективного сгорания топлива при сверхмалых избытках воздуха в топке позволили снизить скорость газов в активной зоне фильтра, что также оказало существенное влияние на степень очистки газов. Максимальная эффективность очистки достигается при скоростях газов

0.5 – 1.5 м/с и времени пребывания газа в активной зоне электрофильтра не менее 8 с [17].

Внедрение ВИР-технологии на котлоагрегатах, оборудованных золоуловителями мокрого типа. На Северодвинской ТЭЦ-1 (СТЭЦ-1) установлены угольные котлоагрегаты Е-220/100 (ПК-10), обеспечивающие выработку перегретого пара давлением 10 МПа и температурой 540°C . Они оснащены индивидуальными системами пылеприготовления, оборудованными шаровыми барабанными мельницами, питателями пыли, промежуточными бункерами угольной пыли и др. Котельные агрегаты имеют сухое шлакоудаление, естественную циркуляцию рабочей среды и П-образную компоновку. Каждый котел оборудован угловыми горелочными устройствами с тангенциальной компоновкой и мокрыми золоуловителями МП-ВТИ с горизонтальными трубами Вентури. При сжигании сильношлакующего интинского каменного угля, а также его смесей с другими углями наблюдалось интенсивное шлакование радиационных поверхностей нагрева топки, а также фестона, что ограничивало нагрузку котлов по условиям шлакования и вызывало недовыработку тепловой и электрической энергии. Кроме этого, сжигание каменных углей по схеме ППФ вызывало интенсивную генерацию оксидов азота.

Для устранения данных недостатков была проведена модернизация котлоагрегатов ст. № 4, 6, 8 СТЭЦ-1 на ВИР-технологии сжигания. Для создания многократной принудительной циркуляции крупных и средних топливных частиц в нижней части топочной камеры были модернизированы горелочные устройства и в шлаковом бункере смонтировано устройство нижнего дутья, состоящее из сопла и дефлектора, при этом была реализована “пропеллерная” схема [9, 14].

Промышленно-эксплуатационные испытания котлоагрегатов ПК-10 СТЭЦ-1, реконструированных на ВИР-технологии сжигания, показали снижение выбросов оксидов азота в 3.5 – 4 раза (рис. 1), а также значительное уменьшение шлакования фестона и радиационных поверхностей нагрева топочных камер [9, 14]. Кроме этого, бы-

ло отмечено увеличение КПД брутто модернизированных котлоагрегатов (в среднем на 1.0%). Повышение экономичности работы данных котлов объясняется несколькими причинами: — переводом на ВИР-технологии сжигания угля, позволившую уменьшить потери тепла с уходящими газами и механическим недожогом топлива; — проведением капитальных ремонтов котлоагрегатов; — поставкой топлива более высокого качества.

Исследование проб летучей золы, отобранных из-под золоуловителей котлоагрегатов с ВИР-технологией сжигания и с традиционной схемой ППФ при сжигании угольной пыли (коэффициент полидисперсности $n = 0.823$; $b = 0.0365$, $R_{90} = 18\%$), показало, что летучая зола реконструированного котла (ст. № 6) имеет более тонкий гранулометрический состав ($b = 0.107$), что обеспечило ей большую величину наружной удельной поверхности (рис. 4). Дополнительное увеличение внешней удельной поверхности летучей золы обеспечивается за счет меньшей оплавленности и большей рельефности золовых частиц при ВИР-технологии сжигания, что было подтверждено результатами сравнительной микроскопии (рис. 5).

Результаты микроскопии золы-уноса показали (рис. 5), что особенно существенное различие в форме наблюдается для частиц размером $0 < x < 125$ мкм. Для котла с ППФ частицы золы данного размера имеют форму сферическую или близкую к ней. Частицы летучей золы тех же фракций котлоагрегата с ВИР-технологией имеют менее правильную форму и большую наружную поверхность.

С увеличением размеров золовых частиц степень правильности формы уменьшается и различия в форме частиц сглаживаются, однако рельефность наружной поверхности золовых частиц котлоагрегата с ВИР-технологией остается существенно больше.

Для определения доли отдельных фракций летучей золы в величине суммарной потери тепла с механическим недожогом топлива был выполнен пофракционный анализ золы на содержание горючих веществ. Исследования проводились при работе котлов на смеси интинского (63% по массе) и кузнецкого (37%) каменных углей и показали, что для котлоагрегата с традиционной схемой сжигания с увеличением размера частиц содержание горючих увеличивается (рис. 6, а). Однако определяющее влияние на величину механического недожога оказывает содержание горючих веществ в частицах $63 \leq x < 500$ мкм (рис. 6, б).

Особенности аэродинамики котлоагрегата с ВИР-технологией сжигания сказываются на характере выгорания топлива, при этом определяющую роль на величину механического недожога оказывает содержание горючих веществ в частицах менее 250 мкм (рис. 6, б). Суммарное содер-

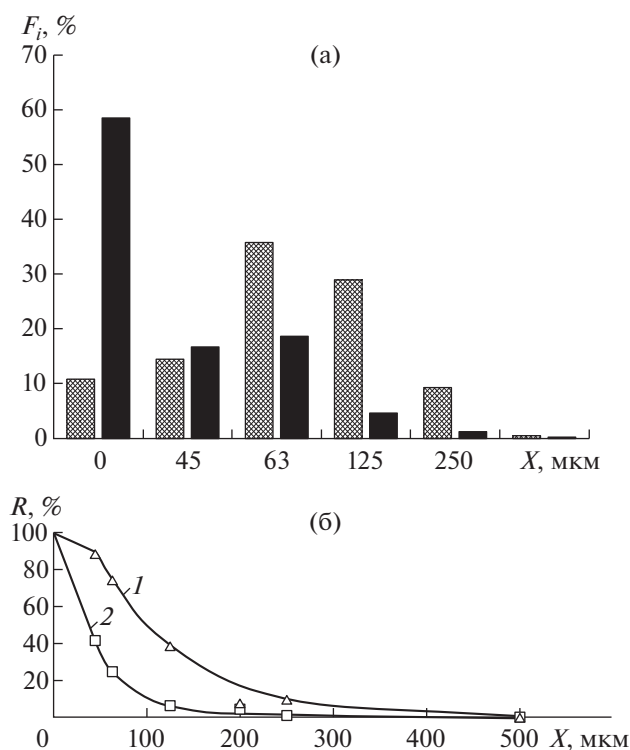


Рис. 4. Гранулометрический состав золы из-под золоуловителей МП–ВТИ котлоагрегата ст. № 9 с ППФ (штриховка) и № 6 с ВИР-технологией (заливка) СТЭЦ-1: (а) — фракционные остатки, (б) — интегральные зерновые характеристики для котла с ППФ (1), с ВИР-технологией (2).

жание горючих веществ в летучей золе котла с ВИР-технологией составило $C_{\text{ун}}^r = 6.67\%$, а для котлоагрегата с ППФ — 12.90% .

Результаты испытаний модернизированных котлоагрегатов СТЭЦ-1 показали, что степень очистки дымовых газов в золоуловителях МП–ВТИ увеличилась на 0.2%. При этом скорость дымовых газов в горловине трубы Вентури уменьшилась в среднем на 15–18%. Увеличение степени очистки может быть объяснено более тонкодисперсным гранулометрическим составом летучей золы котлов с ВИР-технологией сжигания. Повышение фракционной степени очистки газов с уменьшением размера золовых частиц при разных скоростях газов в горловине и степени орошения было выявлено при испытаниях центробежных скрубберов Вентури на Верхнее-Тагильской и Серовской ГРЭС, Безымянской ТЭЦ и Ярославской ТЭЦ-2 [21].

Выбросы тяжелых металлов с летучей золой котлов. В химическом составе неорганического вещества угля выделяются две группы элементов. Первая группа — главные золообразующие элементы: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, S, P — на их долю в углях приходится ~99% всей массы неорганического вещества. Вторая группа — микроэлементы, составляющие обычно не более 1% всего неорга-

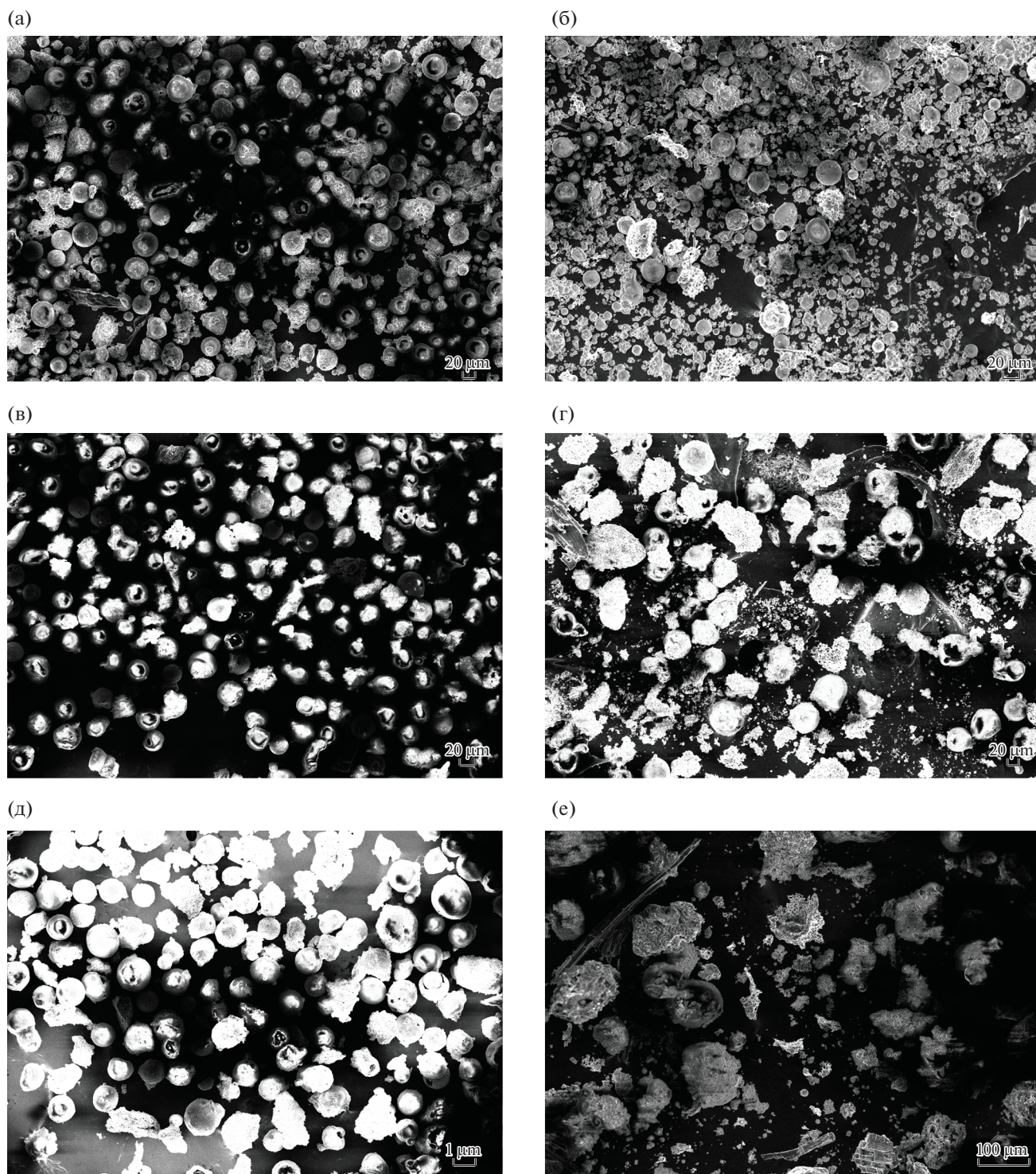


Рис. 5. Форма и рельеф наружной поверхности золовых частиц для котлоагрегатов с ППФ (а), (в), (д) и ВИР-технологией сжигания (б), (г), (ж): (а), (б) – зола с размером частиц $x < 45$; (в), (г) – $45 \leq x < 63$; (д), (ж) – $63 \leq x < 125$ мкм.

нического вещества угля. В соответствии с геохимической классификацией, по концентрированному признаку к микроэлементам относят: собственно малые элементы 0.1–0.001% (В, F, Cl, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Zr, Ba, Pb), редкие 0.001–0.00001% (Li, Be, Sc, Co, Ga, Ge, Se, Sr, Br, Y, Nb,

Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, La, Yb, W, Bi, U, Hg) и ультра-редкие с содержанием менее 0.00001% (Ag, Re, Au, Pt) [22]. При использовании углей происходит накопление значительных количеств опасных элементов, оказывающих существенное негативное влияние на человека и окружающую

среду, в первую очередь тяжелых металлов, обладающих токсичными, канцерогенными и мутагенными свойствами. Тяжелые металлы способны усиливать негативные свойства в присутствии друг друга. При этом значительная часть микроэлементов, содержащихся в углях, поступает в атмосферу не с золой, а с субмикронными аэрозолями или в газообразной фазе, которые практически не улавливаются электрофильтрами [22]. Так, при выгорании органического вещества угля происходит испарение металлов, содержащихся в угле, часть из которых конденсируется на аэрозолях и улетучивается с дымовыми газами. Другая часть испарившегося металла конденсируется на частицах летучей золы.

В соответствии с [6] при сжигании углей в атмосферу поступает в среднем не менее 10% общей массы, содержащихся в них Al, Co, Fe, Mn, Na, Se; 30% – Cr, Cu, Ni, V; 50% – Ag, Cd, Pb, Zn; 100% – As, Br, Cl, Hg, Sb и Sc. Расстояния, на которые могут разноситься частицы золы-уносов и осаждение их вместе с атмосферными осадками, зависит от физических свойств золы, погодных условий, розы ветров и т.д. Частицы диаметром 10 мкм и более осаждаются довольно быстро, и их воздействие проявляется в непосредственной близости от источника на расстоянии до 3 км. Частицы размером менее 10 мкм и особенно 2.5 мкм могут преодолевать сотни километров и воздействуют на все компоненты окружающей среды [2].

Тяжелые металлы сравнительно быстро накапливаются в почве и крайне медленно из нее выводятся, приводя к повышенному их содержанию по сравнению с фоновым уровнем [2]. При увеличении числа взвешенных частиц, выбрасываемых ТЭС в воду, возникает угроза жизнедеятельности представителей водной фауны. Высвобождение из пылевых частиц потенциально опасных элементов As, B, Mo, Se, Sr, V в воду и почву приводит к накоплению их в сельскохозяйственных растениях, и они могут попасть в организм животных и человека.

Отбор золоводяной пульпы проводился в период проведения промышленно-эксплуатационных испытаний котлоагрегатов СТЭЦ-1 в соответствии с РД 153-34.1-27.301-2001 при паропроизводительности, близкой к номинальной. Элементный состав разных фракций летучей золы определялся с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра *EDX-8000*. В процессе экспериментов было определено содержание 22 элементов, однако в соответствии с поставленными задачами в табл. 1, 2 приведены содержания только тяжелых металлов. Для проведения сравнительного анализа содержание тяжелых металлов в летучей золе котла с ППФ скорректировано с учетом различия в содержании горючих веществ в золе котлоагрегатов с ППФ- и ВИР-технологией.

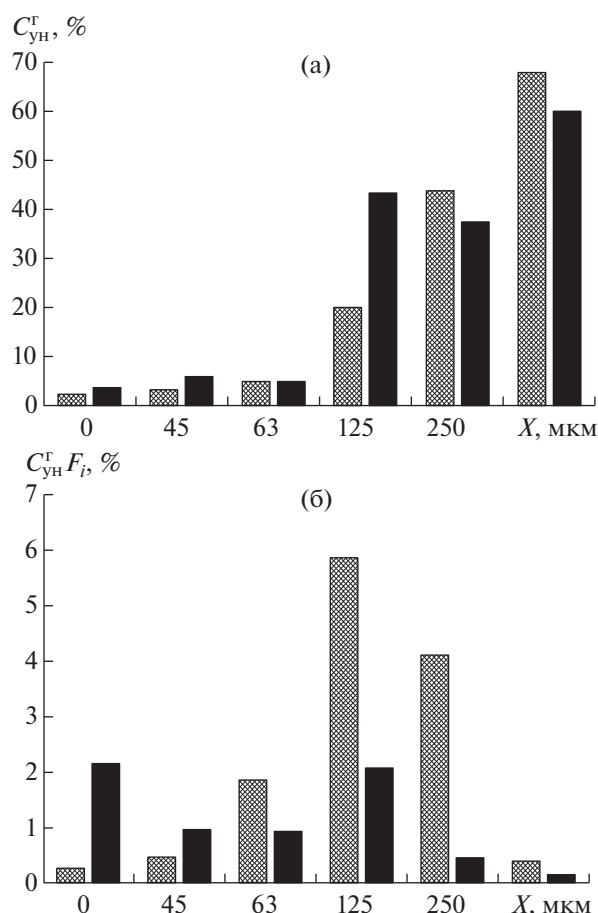


Рис. 6. Содержание горючих веществ в летучей золе котлов ст. № 9 с ППФ (штриховка) и ст. № 6 с ВИР-технологией (заливка) СТЭЦ-1: (а) – содержание горючих веществ по фракциям; (б) – содержание горючих веществ с учетом массовых долей различных фракций.

Из полученных результатов видно, что суммарное содержание тяжелых металлов в летучей золе котла с ВИР-технологией почти на 23% меньше, чем для котла с ППФ.

Содержание тяжелых металлов в летучей золе, независимо от схемы сжигания топлива, повышается с уменьшением размера частиц (табл. 1, 2), что, очевидно, связано с увеличением наружной удельной поверхности мелких частиц. Исходя из этого, следует ожидать, что мелкая зола, не уловленная золоуловителями ТЭС, содержит больше токсичных микроэлементов, чем средняя по составу зола исходного топлива [22].

По результатам исследования содержания тяжелых металлов в различных фракциях летучей золы были рассчитаны их выбросы в атмосферный воздух с частицами золы, не уловленными в золоуловителях МП–ВТИ с горизонтальными трубами Вентури (табл. 3). При выполнении расчетов использовались данные по содержанию тя-

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в различных фракциях летучей золы котла ПК-10 с ВИР-технологией сжигания, мас. %

Элемент	Размер частиц, мкм				
	$x < 45$	$45 \leq x < 63$	$63 \leq x < 125$	$125 \leq x$	объединенная проба $0 < x < 500$
Цинк	0.0179	0.0109	0.0106	0.0103	0.0149
Медь	0.0162	0.0158	0.0156	0.0143	0.0159
Никель	0.0220	0.0181	0.0177	0.00164	0.0202
Железо	9.790	8.860	8.730	6.290	9.220
Марганец	0.0628	0.0617	0.0511	0.0397	0.0590
Хром	0.0413	0.0405	0.0352	0.0213	0.0388

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в различных фракциях летучей золы котла ПК-10 с ППФ, мас. %

Элемент	Размер частиц, мкм					
	$x < 45$	$45 \leq x < 63$	$63 \leq x < 125$	$125 \leq x < 250$	$250 \leq x$	объединенная проба $0 < x < 500$
Цинк	0.0158	0.0114	0.0090	0.0084	0.0082	0.00984
Медь	0.0299	0.0177	0.0171	0.0170	0.0159	0.0185
Никель	0.0282	0.0239	0.0217	0.0215	0.0209	0.0226
Железо	15.02	14.17	11.32	11.00	10.81	11.99
Марганец	0.1261	0.0949	0.0893	0.0860	0.0853	0.0928
Хром	0.0583	0.0500	0.0456	0.0415	0.0408	0.04599

Таблица 3. Расчетное содержание тяжелых металлов в летучей золе углей, сжигаемых в котлах ПК-10 на СТЭЦ-1, мг/кВт · ч

Наименование	Zn	Cu	Ni	Fe	Mn	Cr
Котел с ППФ	0.319	0.604	0.569	303.3	2.546	1.177
Котел с ВИР-технологией	0.343	0.311	0.422	187.7	1.204	0.792

желых металлов для частиц менее 45 мкм, значения КПД котлоагрегатов при нагрузках, близких к номинальной, и полученные степени очистки газов в золоуловителях СТЭЦ-1. Удельные выбросы тяжелых металлов с мелкими частицами золы, не уловленными золоуловителями, отнесенные к 1 кВт · ч выработанной энергии для котлоагрегата с ВИР-технологией, на 38.2% меньше, чем для котла с традиционной схемой сжигания в ППФ. Это объясняется более высоким КПД котлоагрегата с ВИР-технологией и степенью очистки газов в его золоуловителях, а также меньшим содержанием тяжелых металлов в летучей золе. Содержание тяжелых металлов в золе и шлаке, выводимом из топки котлоагрегата с ВИР-технологией через шлаковый комод, увеличилось.

Сравнение содержания тяжелых металлов в золе-уноса с размером частиц менее 45 мкм, выбрасываемой в атмосферный воздух котлами с ППФ, с фоновыми значениями для пахотных почв Северо-Запада России [23], показало, что имеет место значительное превышение фоновых

значений: по цинку в 3.3; меди – 33.2; никелю – 28.2; марганцу – 2.7; хрому – 19.4 раза медианных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Угольные электростанции – серьезный источник загрязнения окружающей среды вследствие выбросов вредных веществ в газообразном и твердом виде. При этом в золошлаковых отходах и летучей золе, выбрасываемой с дымовыми газами в атмосферный воздух, происходит концентрация тяжелых металлов и других вредных веществ. Внедрение низкоэмиссионных схем сжигания твердого топлива: в топках с КС, ЦКС и в топках с низкотемпературным вихрем (НТВ или ВИР-технология), позволяет значительно снизить воздействие угольных ТЭС на окружающую среду. При этом ВИР-технология предназначена для всего действующего парка котельных установок и может быть реализована в сроки плановых ремонтов. Промышленно-эксплуатационные испытания котлоагрегатов, реконструированных на ВИР-технологии сжигания, показали снижение выбросов оксидов азота в 3.5–4 раза, значительное уменьшение загрязнения поверхностей нагрева, увеличение КПД котлов и эффективности работы электрофильтров и золоуловителей мокрого типа без их модернизации. Сравнительный анализ летучей золы котлоагрегатов с ППФ и ВИР-технологией показал, что для ВИР-технологии сжигания она имеет более тонкодисперсный

гранулометрический состав, меньшую оплавленность и большую рельефность золовых частиц, что вызвано большим временем пребывания крупных и средних топливных частиц в топках модернизированных котлоагрегатов и большей полнотой их выгорания, а также меньшим уровнем максимальных температур в топочных камерах на 150–200°C.

Исследования влияния степени выгорания горючих веществ в различных фракциях летучей золы показали, что для котлов с ППФ определяющее влияние на величину механического недожога оказывает содержание горючих веществ в частицах размером $63 \leq x < 500$ мкм, а для котлоагрегатов с ВИР-технологией – в частицах менее 250 мкм, что связано с особенностями аэродинамики и выгорания топлива.

Определение содержания тяжелых металлов в различных фракциях летучей золы, выполненное с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра, показало, что суммарное содержание тяжелых металлов в летучей золе котлоагрегатов с ВИР-технологией существенно меньше, чем для котлов с ППФ. Удельные выбросы тяжелых металлов с мелкими частицами золы, не уловленными золоуловителями, отнесенные к единице выработанной энергии для котлоагрегата с ВИР-технологией, на 38.2% меньше, чем для котла с традиционной схемой сжигания в ППФ. Это объясняется более высоким КПД котла и степенью очистки газов в его золоуловителях, а также меньшим содержанием тяжелых металлов в летучей золе. Сравнение содержания тяжелых металлов в летучей золе, выбрасываемой в атмосферный воздух котлами с ППФ, с фоновыми значениями для пахотных почв Северо-Запада России, показало, что имеет место значительное превышение фоновых значений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность ЦКП НО “Арктика” за проведение исследований на рентгенофлуоресцентном спектрометре и оптическом микроскопе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Умрилова Н.М., Финкер Ф.З.* // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Материалы научно-практич. конф. Т. 1. Челябинск: УралВТИ, 2007. С. 116.
2. *Глуценко Н.Н., Ольховская И.П.* // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 1. С. 20.
3. *Градецкий А.В., Митрова Т.А., Сальников В.А.* Новая генерация: “вторая угольная волна”, рынок газа и реформа теплоэнергетики. М.: Эксперт, 2007. 54 с.
4. *Григорьев А.В.* Социальные и экономические аспекты функционирования угольной генерации в регионах России. М.: ИПЕМ, 2018. 16 с.
5. *Дьяков А.Ф., Платонов В.В.* // Энергетик. 2016. № 10. С. 64.
6. *Кизильштейн Л.Я., Левченко С.В.* // Теплоэнергетика. 2003. № 12. С. 14.
7. *Любов В.К., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б.* Повышение эффективности теплообменных процессов и систем // Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГТУ, 2002. С. 125.
8. *Любов В.К., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б.* Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения // Матер. междунар. конф. Т. 2. Архангельск: ИЭП Севера УрО РАН, 2002. С. 595.
9. *Любов В.К., Романов А.Ю.* // Сб. научн. тр. АГТУ “Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов”. Вып. 73. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. С. 157.
10. *Любов В.К., Финкер Ф.З.* Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: тезисы докладов // 7-я Всерос. конф. с междунар. участием. Ярославль: Цифровая типография, 2019. С. 47.
11. *Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Шлегель А.Э., Сидоров Н.В., Царев С.А.* // Новое в российской электроэнергетике. 2005. № 5. С. 34.
12. *Финкер Ф.З., Дульнева Л.Т., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Дробышевский М.А.* // Межвуз. сб. науч. трудов “Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС”. СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2005. С. 141.
13. *Финкер Ф.З., Капица Д.В.* // Инновации в России: промышленность и строительство. 2010. № 2. С. 42.
14. *Чернов А.А., Марьяндышев П.А., Любов В.К., Панкратов Е.В.* Современные проблемы теплофизики и энергетики // Матер. междунар. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2017. Т. 2. С.107. [*Chernov A.A., Maryandyshov P.A., Lyubov V.K., Pankratov E.V.* CFD simulation of the combustion process of the low-emission vortex boiler // J. Phys.: Conf. Ser. 891 012216 2017 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012216>].
15. *Chang S., Zhuo J., Meng S.* // Engineering. 2016. № 2. P. 447.
16. *Росляков П.В.* Методы защиты окружающей среды. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 336 с.
17. *Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мяков Б.И., Русаков А.А., Урбах И.И.* Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. А.А. Русакова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
18. *Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.* Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
19. *Любов В.К., Любова С.В.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с.
20. *Кухарский Я.* Методы снижения токсичных выбросов в топках с тангенциальным расположением горелок (исследование и внедрение). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбПУ, 1999. 16 с.
21. *Кропн Л.И.* Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. М.: Энергия, 1977. 160 с.
22. *Крылов Д.А.* // Энергетик. 2012. № 11. С. 36.
23. *Матиян Н.Н., Рейман К., Бахматова К.А., Русаков А.В.* // Вестн. С.-Пб. ун-та. 2007. Сер. 3. Вып. 3. С. 123.