

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 67

EDN: DCFCUF

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-573-582



Экологизированное использование ресурсов сернистых углей Иркутского бассейна как фактор эволюции теплоэнергетики региона

В.Ю. Рогов¹✉¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – определить возможные направления развития теплотехнологических систем Иркутской области, учитывая вовлечение ресурсов Иркутского угольного бассейна с высоким содержанием серы. В работе был использован системный анализ тенденций развития угольных энергетических котлов большой мощности с учетом возможности сокращения вредных выбросов (NO_x , CO , SO_x) преимущественно за счет рациональных конструкторских решений и использования водоугольного топлива. Показано, что вихревые процессы, реализуемые в схемах сгорания топлива, примененные на ТЭЦ Иркутской энергосистемы, позволяют повысить эколого-экономическую эффективность теплотехнических систем, главным образом за счет снижения температуры сгорания и увеличения времени нахождения в топке. Имеется опыт применения схемы низкотемпературного вихревого сжигания на Усть-Илимской ТЭЦ (котел № 6) и кольцевой топки на Ново-Иркутской ТЭЦ (котел № 8). Предложено провести реконструкцию имеющихся энергетических котлов по схеме низкотемпературного (при максимальной температуре в топке не более 1000–1100 °С) вихревого сжигания с дальнейшим использованием частично деминерализованного и десульфурированного водоугольного топлива, получаемого в месте добычи и транспортируемого по пульпопроводу. Топливо может быть сожжено в двухступенчатой топке, оно воспламеняется в ее нижней части, где размещается низкотемпературный кипящий слой инертного материала, а на второй ступени его дожигают в верхней части топки при температуре 1000–1200 °С. Таким образом, эволюция технических систем в теплоэнергетике Иркутской области в условиях роста объемов использования высокосернистого угля приводит к переводу его обогащения в контур деятельности энергетических предприятий. Основным направлением снижения выбросов сернистых соединений является сжигание топлива в низкотемпературном режиме с использованием десульфурированного водоугольного топлива.

Ключевые слова: тепловая энергетика, Иркутский угольный бассейн, высокосернистый уголь, низкотемпературное сжигание, вихревая топка, кипящий слой, водоугольное топливо

Благодарности. Автор благодарит рецензента Виктора Александровича Бочкарева за ценные советы при написании статьи.

Для цитирования: Рогов В.Ю. Экологизированное использование ресурсов сернистых углей Иркутского бассейна как фактор эволюции теплоэнергетики региона // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 573–582. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-573-582>. EDN: DCFCUF.

POWER ENGINEERING

Original article

Ecologically sound use of sulfur-containing coal resources of the Irkutsk basin as a factor in the evolution of the regional thermal power industry

Viktor Yu. Rogov¹✉¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article aims to identify possible directions for developing heat technology systems in Irkutsk Oblast, taking into account the integration of resources of the Irkutsk coal basin with high sulfur content. The study applied a systems analysis of trends in the development of high-capacity coal-fired power boilers, considering the possibility of reducing harmful emissions (NO_x , CO , SO_x) primarily through rational design solutions and the use of coal-water slurry. It is shown that swirl processes realized in fuel combustion schemes that are applied at the TPPs

of the Irkutsk power system help to improve the ecological and economic efficiency of heat technology systems, primarily by reducing the combustion temperature and increasing the residence time in the furnace. Experience is available in applying the low-temperature swirl combustion scheme at Ust-Ilimskaya TPP (boiler 6) and a circular furnace at Novo-Irkutskaya TPP (boiler No. 8). It is proposed to redesign the existing power boilers according to the scheme of low-temperature swirl combustion (i.e., the maximum temperature in the furnace is no higher than 1000–1100°C), with the subsequent use of partially demineralized and desulfurized coal-water slurry obtained at the place of extraction and transported by slurry pipeline. Fuel can be burned in a two-stage furnace: it is ignited in its lower part where the low-temperature fluidized bed of inert material is located; then, it is burned completely in the upper part of the furnace at a temperature of 1000–1200°C. Thus, in the context of the growing use of high-sulfur coal, the evolution of technological systems in the thermal power industry of Irkutsk Oblast places its cleaning within the scope of activities of power companies. The main method of reducing the emissions of sulfur compounds consists in the low-temperature combustion of fuel using desulfurized coal water slurry.

Keywords: thermal power engineering, Irkutsk coal basin, high-sulfur coal, low-temperature combustion, vortex furnace, fluidized bed, water-coal fuel

Acknowledgement. The author would like to acknowledge the reviewer Viktor Aleksandrovich Bochkarev for giving valuable advice and comments.

For citation: Rogov V.Yu. Ecologically sound use of sulfur-containing coal resources of the Irkutsk basin as a factor in the evolution of the regional thermal power industry. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):573-582. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-573-582>. EDN: DCFCUF.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективное развитие энергетики Иркутской области связано преимущественно с увеличением производства электроэнергии на тепловых электростанциях, поскольку потенциал гидроэнергии для строительства новых крупных гидроэлектростанций во многом исчерпан. Использование природного газа Сибирской платформы связано преимущественно с экспортными поставками и развитием газохимических производств, поэтому добываемый в регионе природный газ не рассматривается как конкурирующий ресурс углю, запасы которого как топлива на порядки превосходят запасы газа. В то же время современные требования к строительству угольных тепловых электрических станций (ТЭС) (например, в Китае) таковы, что их экологические параметры должны быть не ниже, чем при использовании природного газа [1].

Современный объем потребления угля на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) Иркутской области составляет 10,86 млн т при объеме добычи в регионе 8,51 млн т [2]. В топливном балансе преобладают угли месторождений, расположенных в Тулунском районе: Мугунского – 28,6% (содержание серы 0,6–4%) и Азейского – 9,84% (содержание серы 0,5–1,9%). Доля привозного ирбейского угля (Канско-Ачинский бассейн) составляет 19,6% (содержание серы – 0,5%). Балансовые запасы намеченного к освоению Ишидейского месторождения (также Тулунский район) составляют

848,6 млн т (содержание серы – 0,5–1,8%). Каменные угли крупнейшего месторождения Каранцайского (Куйтунский район) являются высокосернистыми. Балансовые запасы угля здесь составляют по категориям А+В+С1 3080 млн т и категории С2 – 3032 млн т. Содержание серы в западной зоне составляют 0,5–4,6%, в восточной – 0,8–7,5%. Запасы Новометелкинского каменноугольного месторождения (Заларинский район) составляют 733 млн т (содержание серы – 1,1–7%). Приемлемой с экологической точки зрения считается содержание серы в угле не выше 1% (например, для углей Канско-Ачинского бассейна, согласно ГОСТ Р 57021–2016²). Та же норма определена и для углей Восточной Сибири (ГОСТ 32352–2013³), за исключением углей Мугунского месторождения – не выше 4% и Азейского – не выше 3%. Очевиден корпоративный приоритет обеспечения рентабельного объема добычи перед экологическими параметрами.

Предположительно, образование серы в углях центральной части Иркутского бассейна связано с сероводородными водами, образовавшимися в загипсованной и битуминозной осадочной толще нижнего кембрия при участии сульфат-редуцирующих бактерий. Проникновение сероводородных вод в угленосную толщу происходило по тектоническим трещинам и ослабленным трещиноватым зонам [3]. Возможно, поэтому с ростом глубины залегания содержание серы в углях возраста-

²ГОСТ Р 57021–2016. Угли Канско-Ачинского бассейна для энергетических целей. М.: Стандартинформ, 2016.

³ГОСТ 32352–2013. Угли Восточной Сибири для энергетических целей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

ет [4]. В малосернистых углях (при содержании общей серы 1,1–2,5%) преобладает органическая форма серы (65–84% от общей серы), практически неизвлекаемая при механических методах обогащения. В высокосернистых углях возрастает доля пиритной серы.

Проектным топливом для ТЭЦ Братско-Усть-Илимского территориально-производственного комплекса на севере Иркутской области является малосернистый уголь Ирша-Бородинского месторождения (Канско-Ачинский бассейн, Красноярский край), а также уголь Азейского бурогоугольного месторождения (Иркутский бассейн). К настоящему времени эти угли в значительной мере вытеснили уголь Ирбейского разреза (Канско-Ачинский бассейн). В то же время проведены испытания по замене привозных бурых углей каменным углем Жеронского месторождения, расположенного в 40 км севернее г. Усть-Илимск, с содержанием серы $S_d = 0,56–0,77\%$ [5]. В качестве проектного топлива на ТЭЦ Иркутско-Черемховского промышленного узла предусмотрено использование угля Азейского и Ирша-Бородинского месторождений. В связи с сокращением объемов добычи, в настоящее время вместо проектного азейского угля используется уголь Мугунского месторождения с более высоким средним содержанием серы (0,9 против 0,5%) [6]. Отметим, что содержание серы на сухую массу в мугунском угле за период с 2006 г. по 2014 г. возросло с 1,2 до 2,2% [6]. Данные о содержании серы и запасах угля месторождений Иркутского бассейна приведены в таблице.

Согласно Федеральному закону № 19-ФЗ от 2014 г., кроме обеспечения норматива ка-

чества окружающей среды, а именно средне-суточной предельно-допустимой концентрации (ПДК_{с.с.}) на уровне дыхания, предприятия должны выполнять и технологические нормативы выбросов. Технологический норматив – это норматив допустимых выбросов в расчете на единицу выпускаемой продукции. Разработанным информационно-техническим справочником (ИТС) по наилучшим доступным технологиям сжигания топлива⁴ на крупных установках в целях производства энергии установлено, что допустимые значения концентраций оксидов серы для котельных установок мощностью более 400 т/ч, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000 г., массовая концентрация SO_2 в дымовых газах⁴ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,4$ не должна превышать 3000 мг/м³. Учитывая реальные коррозионные процессы в котлоагрегатах Ново-Иркутской ТЭЦ и других электростанциях Иркутской энергосистемы, примем данный норматив как основание для перспективной реконструкции указанного оборудования. Замеренная концентрация SO_2 сернистых соединений за дымососом одного из котлов Ново-Иркутской ТЭЦ при содержании серы в угле 2,5% составляет около 1350 ppm [6], что соответствует 3630 мг/м³. В последние годы на ТЭЦ Иркутской энергосистемы проводится масштабная реконструкция котлоагрегатов, что позволяет рассматривать это оборудование как вновь введенное. В соответствии с требованиями технологических нормативов для котельного оборудования (с указанной мощностью), введенного после 1 января 2001 г., концентрация SO_x в дымовых газах⁵ не должна превышать 700 мг/м³.

Запасы и сернистость углей крупнейших месторождений Иркутского бассейна
 Reserves and sulfur content of coals from the largest Irkutsk basin deposits

Месторождение, состояние использования	Запасы кат. А+В+С ₁ , млн т	Запасы С ₂ , млн т	Забалансовые запасы, млн т	Содержание серы, %
Азейское (используется)	369,0	25,2	20,8	0,5–1,9
Вознесенское (не используется)	515,1	13,2	109,9	0,5–2,14
Головинское (используется)	561	2121,7	356	0,4–1,5
Ишидейское (намечено для эксплуатации)	831	17,6	259,4	0,5–1,8
Карандайское (не используется)	3080	3032	7602,9	0,6–6 и выше
Ишинское (используется)	16,5	507,2	95	0,3–0,7
Мугунское (используется)	1725,3	433	747	0,5–4
Новометелкинское (не используется)	662,8	13,6	657,2	1,1–7

⁴ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2017. 271 с.

⁵ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Госстандарт России, 1996. 24 с.

В Иркутске основным источником выбросов соединений серы в атмосферу являются предприятия теплоэнергетики, на них приходится 89% выбросов. Проведенные расчеты с использованием математической модели, основанной на аналитическом решении уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси, показывают максимальную частоту превышения ПДК_{с.с.} – в декабре 714 ч, в июле – 598 ч (из 720 ч в месяце) [7].

Основной объем добычи и использования угля в ближайшие 10–15 лет будет приходиться на Мугунское месторождение, содержание серы в угле которого колеблется от 0,5 до 4%. Принятый руководством АО «Востсибуголь» подход к усреднению содержания серы в товарном угле⁶ представляется ненадежным. Балансовые запасы категорий А+В+С1 Ишидейского месторождения составляют 0,85 млрд т, содержание золы – 17–20%, серы – 0,5–1,8%. Для строительства электростанции предполагается создание нового угольного разреза мощностью 12 млн т/год [2].

Угли крупнейшего Каранцайского месторождения имеют содержание серы 0,6–6% и выше. Ввиду того, что сера в иркутских углях находится преимущественно в органической форме, основным способом подавления сернистых выбросов является применение топок с низкой температурой сжигания и применение серопоглощающих добавок (известняка, доломитов, магнезитов).

Важнейшим условием снижения уровня образования сернистых газов в топке энергетического котла является обеспечение температуры горения топлива не выше 1100 °С. Сернистые соединения, поглощенные оксидами щелочных металлов, входящими в состав минеральной части углей либо введенные в топку в качестве поглотителей сернистых газов при повышенных температурах, разлагаются. Сульфат кальция разлагается при температуре 1200 °С, сульфат магния – при температуре 1137 °С. Показано также, что введение известняка (CaCO₃) и магнезита (MgCO₃) в качестве серопоглощающего реагента в составе водоугольного топлива эффективно до температуры 1100 °С,

при дальнейшем повышении температуры в продуктах горения появляется SO₂ [8].

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ В ИРКУТСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

К настоящему времени реализованы проекты реконструкции некоторых ТЭЦ в Иркутской энергосистеме, позволяющие снизить выбросы вредных веществ, включая сернистые соединения:

- низкотемпературное вихревое сжигание;
- кольцевая вихревая топка.

В 2006 г. на Усть-Илимской ТЭЦ введен в опытно-промышленную эксплуатацию котлоагрегат БКЗ-420-140-9 ст. № 6 с вихревой топкой, который является головным образцом, реализующим сжигание немолотого (мелкодробленного) угля в топке с низкотемпературным вихревым факелом по схеме Ленинградского политехнического института [9]. Вихревая топка встраивается в существующий топочный объем котла без дорогостоящей переделки или замены большей части топочных экранов, которая требуется при реконструкциях по другим схемам. Организация вихревого движения удлиняет время нахождения топлива в котле, что предполагает также применение немолотого угля взамен угольной пыли и снижение температуры горения [9]. Поэтому, очевидно, в вихревых топках в качестве меры по снижению сернистых выбросов совместное сжигание канско-ачинских и местных углей будет более эффективным.

В качестве примера высокой экологической эффективности применения вихревого метода можно привести реконструкцию котла БКЗ-220-100 на Новомосковской ГРЭС с переводом сжигания высокосернистых подмосковных бурых углей на низкотемпературное вихревое (НТВ), при котором максимальная температура в топке не превышает 1000–1100 °С; степень связывания оксидов серы в котле только за счет основных окислов собственной золы топлива составила 40–45% [10]. Расчетная (теоретическая) температура горения топлива для котлов

⁶Для стабилизации содержания серы Востсибуголь приобрел новый участок недр в Иркутской области за 45 млн руб. Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/coal/200080-dlya-stabilizatsii-soderzhaniya-sery-vostsibugol-priobrel-novyy-uchastok-neдрv-irkutskoy-oblasti-za/> (дата обращения: 20.02.2024).

БКЗ-420-149 Ново-Иркутской ТЭЦ составляет 1884 °С [3]; однако при испытании котла БКЗ-420-140 в 2022 г. при нагрузке котла 360 т/ч была зарегистрирована температура 1350 °С. Предполагается, что в ближайшей перспективе (15–20 лет), до момента массового вывода котлов из эксплуатации, перевод на НТВ-схемы в процессе их капитального ремонта может оказаться основным методом повышения их экологической и экономической эффективности.

Проведенные опыты по совместному сжиганию углей Канско-Ачинского бассейна (месторождение Латынцевское, разрез Ирбейский) и Мугунского месторождения показали, что для эффективного связывания диоксидов серы из дымовых газов необходимо, чтобы содержание щелочных металлов в золе находилось в диапазоне 20–25% (при зольности ирбейского угля во время испытаний, равной 14,66–15,56%, содержание Са, Na, Mg в золе находилось в диапазоне 5–10%) [4]. Фактически требуется введение дополнительных серопоглощающих агентов, что неудивительно, поскольку температура сжигания углей превышает указанные (рекомендованные) 1000 °С.

В качестве серопоглощающего агента при сжигании углей Иркутского бассейна предлагается использовать ресурсы магнезитов Онотского месторождения, которые составляют 198,43 млн т по категориям В+С1 и 11,19 млн т по категории С2.

Другим направлением низкотемпературного сжигания угля является применение кольцевых топок. На Ново-Иркутской ТЭЦ в 2003 г. в промышленную эксплуатацию введен котел № 8 марки Е-820-140-1С производительностью 820 т пара в час и давлением 13,8 МПа с температурой пара на выходе 560 °С. Кольцевые топочные устройства, в сущности, являются развитием широко распространенных в энергетике тангенциальных топок, и поэтому при их расчете и проектировании используются рекомендации для тангенциальных топок с некоторыми уточнениями. Сравнительно низкий температурный уровень в зоне горения (ниже 1200 °С) и высокая интенсивность смесеобразования при вихревом движении газов в кольцевой топке обе-

спечивают относительно низкие концентрации⁷ вредных выбросов NO_x – 370,4 мг/нм³ и СО – 20,70 мг/нм³. Капитальные вложения на строительство кольцевого котла на 8–10% меньше вложений на строительство П-образных котлов аналогичной паропроизводительности. Наряду с созданием новых энергоблоков котлы с кольцевой топкой, в связи с их меньшими габаритами, могут быть применены при замене отработавших блоков с установкой в существующую ячейку станции с сохранением или даже увеличением мощности нового блока.

К сожалению, исследования по проблеме снижения выбросов сернистых загрязнений при использовании кольцевых топок не проводились, хотя само по себе снижение температуры горения угольного топлива (до 1200 °С) не способствует снижению интенсивности процессов разложения соединений щелочных металлов и серы. Предполагается, что, как и в случае с низкотемпературной вихревой топкой, возможно достижение температуры горения, позволяющей образовывать и сохранить связанные сульфаты щелочных металлов, в том числе за счет сорбентов.

Большинство котлоагрегатов в Иркутской энергосистеме имеет сверхнормативный срок службы (свыше 35 лет). Поэтому вопрос о технологической парадигме в процессе реконструкции угольной теплоэнергетики региона становится неизбежным.

На сегодняшний день наиболее эффективной с эколого-экономической позиции является технология сжигания угля в низкотемпературных котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) [1]. Температура сжигания топлива в таких котлах составляет 800–900 °С. Отметим, что в Болгарии и Румынии устаревшие котлы марки БКЗ заменены на современные с циркулирующим кипящим слоем [11]. Как и в котлах с использованием НТВ-схемы, снижение температуры сгорания позволяет также снизить выбросы соединений NO_x. Представляется, что сжигание углей в котлах с ЦКС без предварительной десульфурации угля допустимо при содержании серы в угле 1,0–1,5%, поскольку связывание серы в углях с большим содержанием серы неэффективно из-за того, что сульфат

⁷Серант Ф.А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле паропроизводительностью 820 т/ч: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14. Новосибирск, 1999. 58 с. EDN: ZLIDGV.

кальция в форме расплава образует корку на поверхности оксида кальция, что резко снижает дальнейшее прохождение реакции. Поэтому обеспечить использование CaO при оптимальной температуре в топке 850°C вряд ли возможно более чем на 40% его содержания в известняке [1].

ПАРАДИГМА ПЕРЕХОДА НА ДЕСУЛЬФУРИРОВАННОЕ ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО

Вовлечение угля с более высоким содержанием серы (свыше 2%) обуславливает необходимость его переработки в водоугольное топливо, предусматривающей его десульфурацию и деминерализацию. Примером такой технологии может служить метод, разработанный в Институте импульсных процессов и технологий (Украина). В процессе электроразрядной десульфурации часть органической серы выгорает под воздействием высокой температуры плазмы, а часть серы, находящейся в пирите, оседает на дно электроразрядного дезинтегратора и удаляется в виде шлама при изготовлении водоугольной суспензии; содержание серы в угле может быть снижено примерно на 80% (например, с 3,5 до 0,5%). Расход электроэнергии на дезинтеграцию угля на фракции ниже 50 мкм при использовании электрогидравлического метода составляет 30 кВт·ч/т [12], что сопоставимо с затратами на подготовку пылеугольного топлива. В процессе электростатического воздействия на уголь и подготовке водоугольной суспензии, при отсутствии воздушного дутья, основная часть серы находится в виде сероводорода, методы очистки от которого освоены в газовой промышленности.

Другим примером технологии производства деминерализованного водно-угольного топлива является способ, при котором в рабочей камере применен сверхвысокочастотный (СВЧ) генератор для измельчения пористой органической части методом «внутривзрывного взрыва» под действием СВЧ электромагнитного поля до получения требуемого класса крупности [18]. Отметим, что электростатическими методами предложено измельчать уголь и в патенте RU2636740C1

[14]. Здесь также отмечается частичное испарение серы и углеводородных продуктов в процессе электро- и термоактивации мелкодисперсных частиц угля в суспензии электрическим разрядом. Были испытаны угли месторождений Республики Бурятия: Окино-Ключевского (среднее содержание серы – 0,87%), Тугнуйского (содержание серы – 0,32–0,5%) и Адуун-Чулунского (Монголия). В процессе электротермического воздействия зольность образцов угля упала с 29 до 18% из-за выделения окиси газов S, N и O.

Использование водоугольного топлива (ВУТ) в котлах с ЦКС позволяет обеспечить снижение избытка воздуха в топочном процессе, поскольку содержащаяся в ВУТ вода выполняет функцию промежуточного окислителя. Одной из особенностей горения ВУТ является более низкая температура воспламенения, которая ниже аналогичной температуры для обычного пылеугольного топлива. Температура слоя, при которой наблюдается минимальное количество выбросов диоксида серы, равняется $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ [15]. Примером решения проблемы сжигания ВУТ в топке кипящего слоя является полезная модель [16], согласно которой мелкие фракции угля (менее 10 мм), еще не загоревшись, «втягиваются» продольным перемешиванием внутрь слоя. На возможность сжигания кавитационного водоугольного топлива в топках с кипящим слоем показывает решение, при котором сжигание ВУТ в агрегате производится в две ступени: на первой ступени топливо воспламеняют в нижней части топки, где размещается низкотемпературный кипящий слой инертного материала при температуре $930\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ и недостатке кислорода, а на второй ступени его дожигают в верхней части топки при температуре $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ с добавлением вторичного воздуха [17]. Для котлов, производительность которых от 700 т пара в час и выше, объемную часть топки целесообразно принять кольцевой, что позволит снизить высоту котла на 15–18%, его вес и стоимость почти на 30% по сравнению с котлами, оборудованными топками с ЦКС⁸. Таким образом, имеются технологические предпосылки для применения ВУТ топлива в топках с циркулирующим кипящим слоем, в

⁸Водоугольное топливо – технология будущего. Режим доступа: <https://www.rosteplo.ru/news/2007/06/06/1181067282-vodougolnoe-toplivo-tekhnologiya-budushchego> (дата обращения: 20.02.2024).

том числе в процессе осуществления реконструкции действующих котлов.

Имеются технологические предпосылки для сжигания ВУТ и в вихревой камере [18]. Однако довольно высокий механический недожог (5%), на наш взгляд, требует доработки предлагаемой схемы.

Дополнительными предпосылками использования ВУТ на ТЭЦ юга Иркутской области являются:

- возможность осуществлять процессы частичной десульфурации и деминерализации в местах добычи угля, оставляя минеральную часть для использования в качестве закладочной массы, снижая объем транспортируемого топлива и затраты на транспортировку с использованием пульпопроводов, а также затраты на хранение и утилизацию золошлаковых отходов в районах размещения ТЭЦ;

- возможность централизованного обеспечения водоугольным топливом ТЭЦ юга Иркутской области с использованием пульпопроводов от мест добычи (месторождения Мугунское, Ишидейское, Каранцайское и др.). Расстояние от центра добычи (г. Тулун) до Иркутска – около 400 км. При этом обеспечиваются поставки ВУТ во все ТЭЦ Иркутско-Черемховского промышленного узла, это города Зима, Усолье-Сибирское, Ангарск, Иркутск, Шелехов.

В Черемховском районе, где размещались углеобогащательные фабрики, накоплено около 100 млн т углесодержащих шламов с содержанием золы 30%, что позволяет их использовать даже на действующих котлах. Для

связывания сернистых соединений в процессе подготовки композиционного топлива из шламов применялись различные местные компоненты, что позволило снизить выбросы диоксидов серы на 18–30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси, сжигаемой в опытном порядке на ТЭЦ-12 (г. Черемхово) [18–20]. Представляется перспективной возможность организации сжигания водоугольного топлива, приготавливаемого из указанных шламов (в том числе для наработки опыта его десульфурации) и реконструкции энергетических котлов.

Одним из преимуществ водоугольного топлива является перспективная возможность его сравнительно простой газификации с последующим сжиганием синтез-газа в высокоэффективных парогазовых установках. Синтез-газ очищается от вредных примесей, включая сероводород и сернистый газ известными способами, например, путем продувки через воду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование высокосернистых углей Иркутского бассейна обуславливает реконструкцию действующих котлов по низкотемпературной вихревой схеме. В дальнейшем, по мере роста объемов потребления высокосернистого угля, целесообразно перейти на использование десульфурированного и частично деминерализованного водоугольного топлива. Предлагается строительство пульпопровода от мест добычи угля до центров его использования в Иркутско-Черемховском промышленном узле.

Список источников

1. Рябов Г.А. Обзор результатов зарубежных и отечественных исследований в области использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое // Теплоэнергетика. 2021. № 2. С. 41–60. <https://doi.org/10.1134/S0040363621020053>. EDN: AFKXUZ.
2. Такайшвили Л.Н., Агафонов Г.В. Перспективы использования энергетических углей Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 6. С. 1277–1284. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>. EDN: NYGCQA.
3. Джумаян Н.Р., Наставкин А.В. Мацеральный и химический составы бурых углей Мугунского месторождения // Химия твердого топлива. 2019. № 4. С. 3–8. <https://doi.org/10.1134/S0023117719040054>. EDN: JPFVOC.
4. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловой электроцентрали ПАО «Иркутскэнерго» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 3. С. 639–648. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>. EDN: SXGWGD.
5. Кудряшов А.Н., Кулагин Н.В., Сеницкая А.В., Бибилова Ю.Д. Оценка возможности сжигания жеронского каменного угля на котлоагрегатах БКЗ-420-140 ПТ-2 Усть-Илимской ТЭЦ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 2. С. 106–117. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-106-117>.
6. Бочкарев В.А., Перфильев А.О. Опытное сжигание смеси мугунского и ирбейского углей в котлоагрегате БКЗ-500-140 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 222–227. EDN: TALHYN.

7. Ахтиманкина А.В., Аргучинцева А.В. Загрязнение атмосферного воздуха промышленными предприятиями г. Иркутска // Известия Иркутского государственного университета. 2013. Т. 6. № 1. С. 3–19. EDN: QCKRLN.
8. Мурко В.И., Карпенко В.И., Сенчукова Ю.А., Тайлаков О.В., Хмяляйнен В.А. Возможности снижения вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива в котлах различной мощности // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016: сб. матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 23–24 ноября 2016 г.). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. С. 182. EDN: XGMXBJ.
9. Финкер Ф.З., Капица Д.В., Кубышкин И.Б. От вихревой топки ЛПИ до ВИР-сжигания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Наука и образование. 2011. № 1. С. 309–317. EDN: NRERWV.
10. Тринченко А.А. Внедрение низкотемпературной вихревой технологии сжигания в энергетических котлах как способ повышения их экологических показателей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Наука и образование. 2014. № 4. С. 61–70. EDN: TFNUWZ.
11. Пузырёв Е.М., Саломатов В.В. Перспективы и возможность промышленного освоения ЦКС технологии сжигания топлива // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 132–136. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.024>. EDN: YTXPDI.
12. Rizun A.R., Denisyuk T.D., Golen' Y.V., Kononov V.Y., Rachkov A.N. Electric discharge disintegration and coal desulphurization in the manufacture of water-coal fuel // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Т. 47. № 1. С. 100–102. <https://doi.org/10.3103/S1068375511010170>. EDN: XKMKFT.
13. Пат. № 2266313, Российская Федерация, С10L 1/32. Способ приготовления деминерализованного водоугольного топлива / А.С. Кондратьев; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение (НПО) «Гидротрубопровод». Заявл. 16.07.2004; опубл. 20.12.2005. Бюл. № 36.
14. Пат. № 2636740, Российская Федерация, С10L 1/00, С10L 1/32/25. Способ получения водоугольной суспензии и установка для его осуществления / С.Л. Буянтуев, А.Б. Хмелев, А.С. Кондратенко, Ю.Ю. Стебенькова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. Заявл. 29.12.2016; опубл. 28.11.2017. Бюл. № 34.
15. Каримов А.А. Особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из бурых углей Республики Узбекистан // Молодой ученый. 2017. № 9. С. 73–76. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/143/40239/> (дата обращения: 07.02.2024).
16. Пат. № 151389, Российская Федерация, U1 F23C 10/00. Устройство для ввода водоугольного топлива в топку с кипящим слоем / Т.Ф. Богатова, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, В.А. Микула, Е.И. Левин, П.В. Осипов, И.А. Берг; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
17. Пат. № 2546351, Российская Федерация, C2 F23C 10/00. Способ сжигания кавитационного водоугольного топлива в топке кипящего слоя инертного материала, снижающий образование вредных выбросов оксидов азота и серы / Е.Г. Карпов, Ф.А. Серант, И.В. Листратов; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОТЭС». Заявл. 19.07.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
18. Мурко В.И., Федяев В.И., Прошунин Ю.Е., Почечуев А.А., Карпенко В.И., Хмяляйнен В.А. Результаты сжигания суспензионного водоугольного топлива в котле типа «Теплотрон» // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. № 11. С. 560–566. Режим доступа: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/71582>. (дата обращения: 07.02.2024).
19. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 1. С. 33–45. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45>. EDN: KHQBHK.
20. Murko V.I., Fedyayev V.I., Karpenok V.I., Zasyupkin I.M., Senchurova Y.A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel // Thermal Science. 2015. Vol. 19. Iss. 1. P. 243–251. <https://doi.org/10.2298/TSCI120618095M>. EDN: UFOGCR.

References

1. Ryabov G.A. A review of the research results into the technologies of solid-fuel combustion in a circulating fluidized bed conducted abroad and in Russia. *Thermal Engineering*. 2021;2:41-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363621020053>. EDN: AFKXUZ.
2. Takaishvili L.N., Agafonov G.V. Application prospects of Irkutsk region thermal coals. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1271-1284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>. EDN: HYGQA.
3. Dzhumayan N.R., Nastavkin A.V. Maceral and chemical compositions of brown coals from the Mugunsk deposit. *Himiya tverdogo topliva*. 2019;4:3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0023117719040054>. EDN: JPFVOC.
4. Koval T.V., Kudryashov A.N. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, JSC. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):639-648. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>. EDN: SXGWGD.

5. Kudryashov A.N., Kulagin N.V., Sinitskaya A.V., Bibikova Yu.D. Assessing possibility of burning Zheronsky coal by Ust-Ilim CHP boiler units BKZ-420-140PT-2. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(2):106-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-106-117>.
6. Bochkarev V.A., Perfiliev A.O. Experimental combustion of Mugunsky and Irbeisky coal mixture in BKZ-500-140 boiler plant. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;11:222-227. (In Russ.). EDN: TALHYN.
7. Akhtimankina A.V., Arguchintseva A.V. Air pollution caused by Irkutsk industrial enterprises. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2013;6(1):3-19. (In Russ.). EDN: QCKRLN.
8. Murko V.I., Karpenok V.I., Senchurova Yu.A., Tajlakov O.V., Hyamyalyajnen V.A. Possibility to reduce harmful emissions when combusting suspension coal fuel in various capacity boilers. In: *Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs 2016: sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Natural and Intellectual Resources of Siberia. Sibresurs 2016: Collected materilas of the 16th International Research and Practical Conference*. 23–24 November 2016, Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2016, p. 182. (In Russ.). EDN: XGMXBJ.
9. Finker F.Z., Kapica D.V., Kubyshkin I.B. From LPI swirl-type furnace to VIR combustion. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2011;1:309-317. (In Russ.). EDN: NRERWV.
10. Trichenko A.A. Adoption of low-temperature swirl combustion technology in power boilers as a way for improving their environmental specifications. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2014;4:61-70. (In Russ.). EDN: TFNUWZ.
11. Puzyryov E.M., Salomatov V.V. Development and industrial prospects of circulating fluidized bed fuel combustion technology. *Polzunovskiy vestnik*. 2019;1:132-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.024>. EDN: YTXPDI.
12. Rizun A.R., Denisyuk T.D., Golen' Y.V., Kononov V.Y., Rachkov A.N. Electric discharge disintegration and coal desulphurization in the manufacture of water-coal fuel. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011;47(1):100-102. <https://doi.org/10.3103/S1068375511010170>. EDN: XKMKFT.
13. Kondrat'ev A.S. Method to prepare demineralized coal-water fuel. Patent RF, no. 2266313; 2005. (In Russ.).
14. Buyantuev S.L., Khmelev A.B., Kondratenko A.S., Steben'kova Yu.Yu. A method to produce coal-water slurry and an installation to implement it. Patent RF, no. 2636740; 2017. (In Russ.).
15. Karimov A.A. Combustion features of coal-water fuel from Uzbekistan Republic brown coals in a fluidized bed. *Molodoj uchenyj*. 2017;9:73-76. Available from: <https://moluch.ru/archive/143/40239/> [Accessed 7th February 2023]. (In Russ.).
16. Bogatova T.F., Berg B.V., Ryzhkov A.F., Mikula V.A., Levin E.I., Osipov P.V., Berg I.A. Device for introducing coal-water fuel into a fluidized bed furnace. Patent RF, no. 151389; 2015. (In Russ.).
17. Karpov E.G., Serant F.A., Listratov I.V. Method of burning cavitation coal-water fuel in a fluidized bed furnace of inert material reducing nitrogen and sulfur oxide harmful emission formation. Patent RF, no. 2546351; 2015. (In Russ.).
18. Murko V.I., Fedyaev V.I., Proshunin Yu.E., Pochechuev A.A., Karpenok V.I., Hyamyalyajnen V.A. The combustion results of suspension water coal fuel in the "Teplotron" type boiler. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11:560-566. Available from: <https://elibrary.sfu-kras.ru/handle/2311/71582> [Accessed 7th February 2024]. (In Russ.).
19. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Experience of combustion composite fuel at a thermal power station in the Irkutsk region. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;1:33-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45>. EDN: KHWBHK.
20. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Zasyrkin I.M., Senchurova Y.A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel. *Thermal Science*. 2015;19(1):243-251. <https://doi.org/10.2298/TSCI120618095M>. EDN: UFOGCR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рогов Виктор Юрьевич,

д.э.н., доцент,
профессор кафедры автоматизации и управления,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, Россия
✉ rogovvu@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Viktor Yu. Rogov,

Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Professor of the Department of Automation and Control,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ rogovvu@mail.ru

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the manuscript for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.04.2024 г.; принята к публикации 08.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 08.05.2024.