



ОПЫТ СЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ УГОЛЬНОГО ШЛАМА НА ТЭЦ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль, М.И. Ижганайтис

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Оценить возможность сжигания угольного шлама (отходов углеобогащения) в топках энергетических котлов на ТЭЦ Иркутской области. *МЕТОДЫ.* Для анализа сжигания отходов углеобогащения применялись технологические и математические методы исследований. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье представлен опыт использования отходов углеобогащения черемховского каменного угля на ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго». Представлены результаты тепловых испытаний котла ТП-30 ТЭЦ-12 при проведении пробного сжигания гранулированных отходов углеобогащения совместно с отходами мраморного производства в смеси с головинским углём. В результате выявлено, что основные параметры работы котла практически не изменились, наблюдалось незначительное снижение температуры аэросмеси на выходе из мельниц по сравнению с чистым головинским углём, что обусловлено большей влажностью получаемой смеси, кроме того, наблюдается снижение выбросов диоксидов серы на 18-30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Опытные исследования, проводимые на ТЭЦ-12 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения в количествах до 50% от общего количества смеси, свидетельствуют о том, что гранулированные отходы углеобогащения возможно сжигать без особых ограничений в работе оборудования ТЭЦ. На основании полученных результатов произведён анализ и разработаны рекомендации по сжиганию отходов углеобогащения.

Ключевые слова: угольный шлам, отходы углеобогащения, угольная энергетика, топливные гранулы, сжигание, экология окружающей среды, безотходные технологии.

Для цитирования: Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 33-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45.

EXPERIENCE OF COMBUSTION COMPOSITE FUEL AT A THERMAL POWER STATION IN THE IRKUTSK REGION

AN. Kudryashov, TV. Koval, M, Izhganaytis

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* To assess the possibility of burning coal sludge, waste of coal preparation, in the furnaces of power boilers at the thermal power station of the Irkutsk region. *METHODS.* Technological and mathematical research methods were used to analyze the incineration of coal preparation waste. *RESULTS.* The article presents the experience of using coal preparation wastes from Cheremkhovsky coal at CHPP-12 of Irkutskenergo. Presented are the results of thermal tests of the TP-30 boiler at CHPP-12 during the trial combustion of granular waste from coal enrichment together with waste from marble production mixed with Golovinsky coal. As a result, it was revealed that the main parameters of the boiler operation practically did not change, there was a slight decrease in the temperature of the air mixture at the outlet of the mills in comparison with pure Golovinsky coal, which is due to the higher moisture content of the resulting mixture, in addition, there is a decrease in sulfur dioxide emissions by 18-30% in depending on the proportion of granular waste of coal preparation in the mixture. *CONCLUSIONS.* Experimental studies carried out at CHPP-12 when burning Golovinsky coal

mixed with granular waste of coal preparation in amounts up to 30% of the total amount of the mixture indicate that granular waste of coal preparation can be burned without any special restrictions in the operation of the equipment of the CHPP. Based on the results obtained, an analysis was carried out and recommendations for the incineration of coal preparation wastes were developed.

Keywords: coal slurry, coal preparation wastes, coal energy, fuel granules, combustion, environment, non-waste technologies.

For citation: Kudryashov AN, Koval TV, Izhganaytis MI. Experience of combustion composite fuel at a thermal power station in the Irkutsk region. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):33-45. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45.

Введение

Уголь играет важную роль в современном мире. Кроме того, уголь – самое распространенное в мире и в России топливо [1]. Согласно данным международного энергетического агентства [2] в настоящее время мир сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю [3,4]. Стоит отметить, что в мире уделяется большое внимание использованию твердого топлива [5-8]. Россия является одним из мировых лидеров по производству угля, она занимает шестое место по объемам угледобычи после Китая, США, Индии, Австралии и Индонезии [9-11]. Кроме энергетических целей уголь используется и в различных отраслях промышленности, например, при производстве стали в металлургии применяется переработанный, обогащенный уголь – кокс.

В России переработка угля осуществляется на 65 обогатительных фабриках и установках. В 2018 году на обогатительных фабриках было переработано 199 млн. т, в том числе для коксования – 92,9 млн. т [12]. После обогащения углей остаются отходы – угольные шламы, которые накапливаются в отстойниках, не находят широкого практического применения и являются постоянным источником загрязнения окружающей среды. При этом вокруг многих углеперерабатывающих предприятий в гидроотвалах и отстойниках скапливается большое количество переработанного угля. Существенное изменение зольности и влажности таких отходов не позволяет использовать их в качестве топлива в существующих энергетических агрегатах [13]. Однако научные исследования [14,15] показывают возможность сжигания высокозольных шламов. Поэтому необходимо рассматривать различные способы сжигания отходов углеобогащения, что позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионах, но и получить существенный экономический эффект. Кроме того, сжигание отходов углеобогащения является одной из актуальных тем, особенно в тех регионах, где уже накоплено значительное количество таких отходов.

Материалы и методы

В Иркутской области действует Ново-Гришевская обогатительная фабрика (ОФ), которая обогащает каменные угли Черемховского месторождения Иркутского бассейна, зольность которого составляет 30%, а обогащенный концентрат имеет зольность около 10%. Запасы отходов углеобогащения (ОУ) Ново-Гришевской ОФ ориентировочно составляют порядка 36 млн.т. На рис.1 представлен план гидроотвала Ново-Гришевской обогатительной фабрики. Габаритные размеры шламохранилища примерно 500×500м. Всего в окрестностях г.Черемхово расположено 9 полей с общим объемом около 100 млн.т.

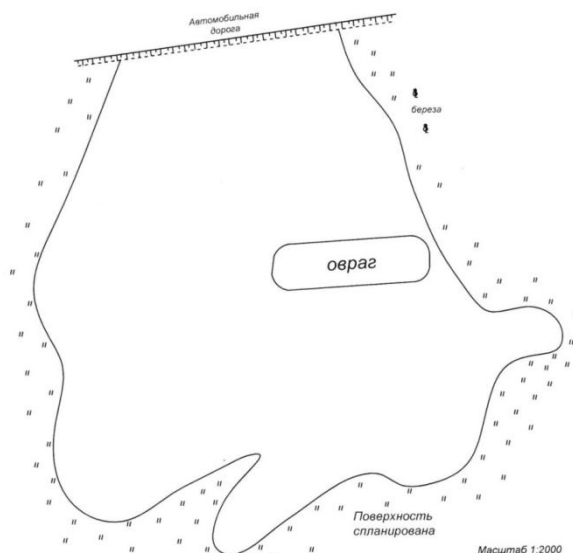


Рис.1. Схема гидроотвала Ново-Гришевской ОФ
Fig.1. Scheme of the Novo-Grishevskaya hydraulic dump OF

С целью снижения негативного влияния отходов углеобогащения на окружающую среду было принято решение рассмотреть варианты полезного использования отходов рассматриваемого производства.

Пробы ОУ с гидроотвала Ново-Гришевской ОФ отбирались методом «конверта» в соответствии со стандартной методикой. Метод «конверта» — способ отбора проб поштучного материала или материала, хранящегося насыпью, отбор проб осуществляется из углов и центра квадрата. Таким образом, гидроотвал ОФ представляет собой территорию площадью 11,8 га, строение — однородное. Точечные пробы отбирались в пределах однородного участка по равномерной сети, при этом была составлена схема участка с фиксацией мест отбора точечных проб (№ 4,5,6,7, и 8). На рис.2 показаны и пронумерованы места отборов проб ОУ. Кроме того, на гидроотвале находится овраг, поэтому для представительности результатов исследований отдельные точечные пробы были взяты со дна, середины и поверхности данного оврага (пробы № 1,2 и 3 соответственно). Полученные пять проб собирались вместе и тщательно перемешивались, после чего был получен усредненный образец. После отбора и приготовления проб были проведены анализы, результаты которых приведены в табл.1.

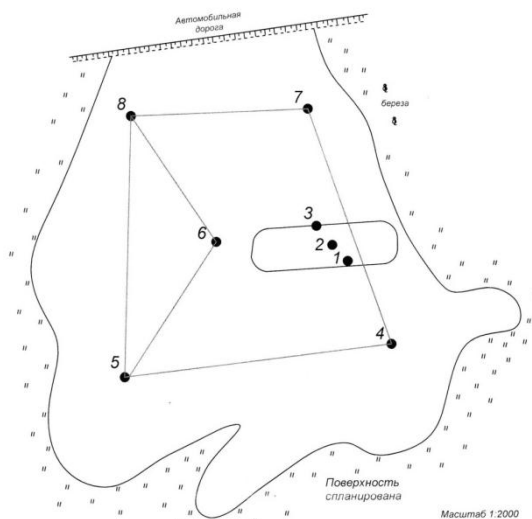


Рис. 2. Схема отбора проб отходов углеобогащения с гидроотвала Ново-Гришевской ОФ
Fig. 2. Scheme of sampling of waste of coal enrichment from the hydro dump of Novo-Grishevskaya OF

В 2011г. проводились первые опытные сжигания ОУ на ТЭЦ-12 ПАО

«Иркутскэнерго». Сжигание самих отходов в существующих котлах ТЭЦ не вызвало особых затруднений, однако возникли трудности в процессе подачи ОУ в мельницы на помол. На всем тракте топливоподачи наблюдались зависания и отложения частиц отходов, которые ограничивали производительность системы пылеприготовления котла. Анализируя сложившуюся ситуацию, было принято решение гранулировать ОУ, чтобы не возникало проблем с подачей их в мельницы с последующим сжиганием. Кроме того, для подавления оксидов серы в процессе сжигания в топливные гранулы на стадии их получения были добавлены кальцийсодержащие вещества. В качестве флюсующих добавок использовались отходы различных производств, а именно, мраморная крошка – отход добычи исходного продукта для Ангарского цементного завода (г. Слюдянка, «Карьер»), доломит Ново-Олхинского известкового завода (г. Шелехов, «ст. Известковая»), отходы производств АЭХК (г. Ангарск). Как известно, в составе мраморной крошки содержатся элементы, необходимые для процесса десульфуризации. Состав мраморной крошки представлен в табл.2.

Таблица 1

Данные приближенно-количественного рентгенофлуоресцентного анализа
шлама Ново-Гришневской ОФ

Пр о- бы	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SrO	ZrO ₂
1	67,61	17,91	7,06	1,53	2,96	1,46	0,78	0,44	0,15	0,04	0,017	0,0095	0,011	0,0085
2	61,35	20,54	9,69	2,02	2,38	2,43	0,71	0,49	0,21	0,058	0,036	0,0219	0,012	0,012
3	58,80	21,96	10,04	2,28	2,87	2,21	0,87	0,61	0,21	0,055	0,029	0,0181	0,0218	0,012
4	63,78	18,93	9,71	2,12	1,96	2,07	0,64	0,43	0,22	0,045	0,03	0,0272	0,0099	0,012
6	64,47	18,74	9,38	2,09	1,92	1,97	0,65	0,42	0,21	–	0,032	0,0293	0,011	0,011
9	66,89	17,68	9,01	1,73	1,48	1,83	0,59	0,40	0,21	–	0,029	0,0254	0,0094	0,011

Таблица 2

Состав мраморной крошки

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SrO	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O
46,13	17,52	13,55	0,379	0,0893	0,075	0,057	0,052	0,0225	0,0094	0,00524

Для дальнейшего исследования были получены топливные гранулы, смесь шлама ОФ и мраморной крошкой, внешний вид которых приведен на рис.2. Гранулы производились при помощи гранулятора тарельчатого типа. В качестве связующего использовалась битумная эмульсия (до 10 % от общего состава). Гранулы обычно имели шарообразную форму, средний диаметр которых колебался в диапазоне от 3 до 20 мм.



Рис. 3. Внешний вид гранул
Fig.3. Appearance of pellets

Результаты анализа гранул представлены в табл. 3.

Таблица 3

Состав гранул из отходов углеобогащения и мраморной крошки

Проба	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CO ₂	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃
7	63,52	17,44	8,292	2,25	3,015	2,15	1,44
8	58,9	19,46	9,07	2,79	3,581	2,32	1,715
Проба	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	MnO	SrO	ZrO ₂
7	1,07	0,423	0,166	0,11	0,0115	0,0115	0,0086
8	1,29	0,482	0,183	0,10	0,0155	0,0142	0,011

В 2012-2013 гг. были проведены испытания на котле ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго» при сжигании отходов углеобогащения в смеси с головинским углём. Отходы углеобогащения были предварительно гранулированы с применением специального связующего материала (битумной эмульсии типа ЭБА-1) и добавлением флюсующей присадки (мраморная крошка). Общая масса отходов углеобогащения, сожженных на котле ст. № 7, составила около 30 т.

Котлоагрегат ТП-30 номинальной производительностью 30 т/час, с рабочим давлением 2,2 МПа, работающий на пыли каменного и бурого углей, вертикально-водотрубный, двухбарабанный с естественной циркуляцией, предназначен для выработки перегретого пара с температурой 375°C. На ТЭЦ-12 в котельной 1-й очереди установлены четыре котлоагрегата ТП-30, стационарные номера № 5-8. Основные технические характеристики работы котла ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 представлены в табл.4.

Таблица 4

Техническая характеристика котлоагрегата ТП-30 ст. № 7

Наименование показателей	Размерность	Котел ст. №7
Паропроизводительность	т/час	30
Давление пара в барабане	МПа	2,2
Температура перегретого пара	°C	375
Температура уходящих газов	°C	173
Площади поверхностей нагрева:		
кипятильного пучка	м ²	238
экранов	м ²	106
водяного экономайзера	м ²	137
пароперегревателя	м ²	225
воздухоподогревателя	м ²	1035
Водяной экономайзер	-	Змеевиковый
Пароперегреватель	-	Змеевиковый
Воздухоподогреватель	-	Трубчатый из 3-х секций
Барабан верхний, диаметр наружный	мм	1387
Длина	мм	6105
Толщина стенки	мм	32
Барабан нижний, диаметр наружный	мм	761
Длина	мм	6105
Толщина	мм	20
Количество предохранительных клапанов на барабане	шт.	2
Количество предохранительных клапанов на пароперегревателе	шт.	1
Тип мельниц для пылеприготовления	-	ММА-1300/944
Питатель сырого угля	-	ШПСУ
Дутьевой вентилятор	-	ВД-10
Дымосос	-	Д-10
Золоулавливание	-	Сухое, батарейные циклоны

Котел ТП-30 ст. №7 ТЭЦ-12 рассчитан на сжигание черемховского каменного угля марки Д со следующими техническими характеристиками: $Q_i^r = 19,5$ МДж/кг (4660 ккал/кг), $W^r = 14\%$, $A^r = 21,5\%$, $V^{daf} = 45,0\%$, который является проектным топливом на

ТЭЦ-12. В качестве замещающего топлива используется уголь Головинского месторождения со следующими техническими характеристиками: $Q_i^r = 20,5$ МДж/кг (4900 ккал/кг), $W^r = 14\%$, $A^r = 21,5\%$, $V^{daf} = 45,0\%$.

В табл. 5 представлены данные по техническому составу смеси угля с гранулированными отходами углеобогащения (ГОУО) на период проведения испытаний. Значительный разброс величин по теплоте сгорания (см.табл.5) свидетельствует о неравномерном смешивании угля и ГОУО и существенном влиянии технических характеристик топлива на режим работы системы пылеприготовления и собственно котла.

Таблица 5

Опыт	Технические характеристики угля				
	Качественные характеристики угля				
	W^r	A^r	S_t^d	Q_i^r	
	%	%	%	ккал/кг	МДж/кг
1, 2	11,6	21,2	1,00	5101	21,37
3, 4	12,4	19,8	1,01	5143	21,55
5, 6	12,6	22,7	0,97	4905	20,55
7, 8	8,7	20,8	1,05	5376	22,53

Результаты

При опытах №1 и 2 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения составило 70/30 %. При средней нагрузке на котле 23,6 т/ч и теплоте сгорания топлива 21,37 МДж/кг (5101 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,44, что выше номинального, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 130 мг/нм³. Коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне 1,44.

При опытах №3 и 4 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения было 50/50 %. При средней нагрузке на котле 30,3 т/ч и теплоте сгорания топлива 21,55 МДж/кг (5143 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,39, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 160 мг/нм³.

При опытах №5 и 6 соотношение угля и гранулированных отходов углеобогащения составило 70/30 %. При средней нагрузке на котле 23,5 т/ч и теплоте сгорания топлива 20,55 МДж/кг (4905 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,45, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 325 мг/нм³.

Опыты №7 и 8 проводились на чисто головинском угле. При средней нагрузке на котле 28,4 т/ч и теплоте сгорания топлива 22,53 МДж/кг (5376 ккал/кг) коэффициент избытка воздуха составлял в среднем 1,49, при этом по результатам анализа дымовых газов наблюдалось наличие СО до 390 мг/нм³.

В табл. 6-7 приведены результаты работы котла ТП-30 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами, полученные при опытах №1,3,5 и 7. В табл.8 представлены результаты анализа дымовых газов.

Таблица 6

Расчетные показатели работы котла ТП-30 ТЭЦ-12 (опыты №1 и 3)

Наименование величин	Обозн	Разм	Формула или обоснование	Значения	
				Опыт № 1	Опыт № 3
Доля ГОУО в топливе	—	%	—	30	50
Содержание балласта в топливе	B^r	%	$W^r + A^r$	32,8	32,2
Содержание углерода в топливе	C^r	%	$C_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	52,49	52,95
Содержание водорода в топливе	H^r	%	$H_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	3,76	3,80
Содержание серы в топливе	S^r	%	$S_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	1,00	1,01
Содержание азота в топливе	N^r	%	$N_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	0,87	0,88
Содержание кислорода в топливе	O^r	%	$O_T^r(100 - B^r)/(100 - B_T^r)$	9,07	9,15

Низшая теплота сгорания	Q_i^r	ккал/кг МДж/кг	Данные лаборатории ТЭЦ-12	5101,4 21,37	5142,8 21,55
Приведенный углерод	K^p	%	$C^r + 0,375S^r$	52,86	53,33
Топливная характеристика	β	—	$2,35(H^r + 0,04N^r - 0,126O^r)/K^p$	0,12	0,12
Давление острого пара	$P_{оп}$	кг/см ²	$P_{пп} + P_{бпр}/735,5$	20,6	20,6
Давление питательной воды	$P_{пв}$	кг/см ²	$P_{пв} + P_{бпр}/735,5$	22,1	22,1
Приведенная паропроизводительность котла	D_k^p	т/ч	$D_k \left(\frac{D_{пп}^p}{D_{пп}} \right)^{0,5}$	23,2	30,9
Приведенная влажность топлива	W^{np}	%·кг/ккал	$\frac{1000 \cdot W^r}{Q_i^r}$	2,35	2,49
Коэффициент	K	—	$3,5 + 0,02 \cdot W^{np}$	3,547	3,549
Коэффициент	C	—	$0,4 + 0,04 \cdot W^{np}$	0,49	0,50
Коэффициент	b	—	$0,12 + 0,014 \cdot W^{np}$	0,15	0,15
Множитель n	n	—	$\alpha''_{взп}/(\alpha''_{взп} + b)$	1,03	1,03
Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%	$0,01(K\alpha''_{взп} + C)(t_{yx.g} - nt_{xb})(1 - 0,01 \cdot q_4)$	7,71	7,89
Потеря теплоты с химическим недожогом	q_3	%	$0,00000254 \cdot (\alpha - 0,02) \cdot C_{CO}$	$3,81 \cdot 10^{-6}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$
Потеря теплоты с механическим недожогом	q_4	%	$7830 A^r (a_{пл} C_{пл}^r / (100 - C_{пл}^r)) + a_{yh} C_{yh}^r / (100 - C_{yh}^r) / Q_i^r$	2,697	2,810
Потеря теплоты в окружающую среду	q_5	%	$0,75 \frac{D_k^{ном}}{D_k^p}$	1,486	1,118
Потеря теплоты со шлаком и золой	q_6	%	$684 \cdot A^r / Q_i^r / (100 - C_{пл}^r)$	0,028	0,027
КПД котла брутто	$\eta_k^{бр}$	%	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$	88,080	88,151
Расход топлива	B_k	т/ч	$(D_k^p (i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр} (i_6 - i_{пв})) / (\eta_k^{бр} Q_i^r \cdot 10^{-2})$	3,261	4,296

Таблица 7

Расчетные показатели работы котла ТП-30 ТЭЦ-12 (опыты №5 и 7)

Наименование величин	Обозн.	Разм.	Формула или обоснование	Значения	
				Опыт № 5	Опыт № 7
Доля ГОУО в топливе	—	%	—	30	0
Содержание балласта в топливе	B^r	%	$W^r + A^r$	35,28	29,46
Содержание углерода в топливе	C^r	%	$C_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	50,55	55,09
Содержание водорода в топливе	H^r	%	$H_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	3,63	3,95
Содержание серы в топливе	S^r	%	$S_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	0,97	1,05
Содержание азота в топливе	N^r	%	$N_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	0,84	0,92
Содержание кислорода в топливе	O^r	%	$O_T^r (100 - B^r) / (100 - B_T^r)$	8,74	9,52
Низшая теплота сгорания	Q_i^r	ккал/кг МДж/кг	Данные лаборатории ТЭЦ-12	4904,7 20,55	5376,1 22,53

Приведенный углерод	K^p	%	$C^r + 0,375S^r$	50,91	55,49
Топливная характеристика	β	—	$2,35(H^r + 0,04N^r - 0,126O^r) / K^p$	0,12	0,12
Давление острого пара	$P_{оп}$	кг/см ²	$P_{пп} + P_{бар} / 735,5$	20,6	20,5
Давление питательной воды	$P_{пв}$	кг/см ²	$P_{пв} + P_{бар} / 735,5$	21,8	21,8
Приведенная паропроизводительность котла	D_K^p	т/ч	$D_K \left(\frac{D_{пп}^p}{D_{пп}} \right)^{0,5}$	23,4	28,3
Приведенная влажность топлива	W^{up}	% · кг/ккал	$\frac{1000 \cdot W^r}{Q_i^r}$	2,66	1,66
Коэффициент	K	—	$3,5 + 0,02 \cdot W^{up}$	3,55	3,53
Коэффициент	C	—	$0,4 + 0,04 \cdot W^{up}$	0,51	0,47
Коэффициент	b	—	$0,12 + 0,014 \cdot W^{up}$	0,16	0,14
Множитель n	n	—	$\alpha''_{взп} / (\alpha''_{взп} + b)$	1,03	1,04
Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%	$0,01(K\alpha''_{взп} + C)(t_{ухг} - nt_{xb})(1 - 0,01 \cdot q_4)$	7,89	7,85
Потеря теплоты с химическим недожогом	q_3	%	$0,00000254 \cdot (\alpha - 0,02) \cdot C_{CO}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$
Потеря теплоты с механическим недожогом	q_4	%	$7830 A^r \left(a_{шл} C_{шл}^r / (100 - C_{шл}^r) \right) + a_{ун} C_{ун}^r / (100 - C_{ун}^r) / Q_i^r$	2,587	2,648
Потеря теплоты в окружающую среду	q_5	%	$0,75 \frac{D_K^{ном}}{D_K^p}$	1,476	1,221
Потеря теплоты со шлаком и золой	q_6	%	$684 \cdot A^r / Q_i^r / (100 - C_{шл}^r)$	0,032	0,027
КПД котла брутто	$\eta_K^{бр}$	%	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$	88,018	88,256
Расход топлива	B_K	т/ч	$\left(D_K^p (i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр} (i_6 - i_{пв}) \right) / \left(\eta_K^{бр} Q_i^r \cdot 10^{-2} \right)$	3,416	3,759

Таблица 8

Результаты анализа дымовых газов (ДГ)

Параметр	Обозн.	Размерность	Значения			
			Опыт №1	Опыт №3	Опыт №5	Опыт №7
Содержание кислорода в ДГ перед ЗУУ	$O_{2\text{ЗУУ}}'$	%	7,2	7,4	7,3	8,0
Содержание оксида углерода в ДГ перед ЗУУ	$CO_{\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	29	24	35	37
Содержание оксида азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	124	176	147	188
Содержание диоксида азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{2\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	678	688	687	624
Содержание оксидов азота в ДГ перед ЗУУ	$NO_{x\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	868	958	912	912
Содержание диоксида серы в ДГ перед ЗУУ	$SO_{2\text{ЗУУ}}'$	мг/м ³	1233	985	1126	1426
Содержание диоксида углерода в ДГ перед ЗУУ	$CO_{2\text{ЗУУ}}'$	%	16,1	16,3	15,8	16,5
Коэффициент избытка воздуха перед ЗУУ	$\alpha'_{\text{ЗУУ}}$	%	1,52	1,54	1,53	1,61
Содержание кислорода в ДГ за ВЗП	$O_{2\text{ВЗП}}''$	%	8,8	9,0	8,9	9,5
Содержание оксида углерода в ДГ за ВЗП	$CO_{\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	27	23	33	35
Содержание оксида азота в ДГ за ВЗП	$NO_{\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	101	156	121	148
Содержание диоксида азота в ДГ за ВЗП	$NO_{2\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	624	638	630	560
Содержание оксидов азота в ДГ за ВЗП	$NO_{x\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	779	877	815	787
Содержание диоксида серы в ДГ за ВЗП	$SO_{2\text{ВЗП}}''$	мг/м ³	916	959	999	1286
Содержание диоксида углерода в ДГ за ВЗП	$CO_{2\text{ВЗП}}''$	%	15,1	15,1	14,2	16,4
Коэффициент избытка воздуха за ВЗП	$\alpha''_{\text{ВЗП}}$	%	1,57	1,52	1,57	1,62

Обсуждение

За время проведения испытаний технический состав средней пробы угля по двум пылесистемам изменялся в следующих диапазонах:

- влажность топлива W^r от 8,66% до 12,58%;
- зольность топлива A^r от 19,8% до 22,7%;
- низшая теплота сгорания топлива Q_i^r от 20,55 МДж/кг (4904 ккал/кг) до 22,53 МДж/кг (5376 ккал/кг).

Зависимость КПД котла брутто от паропроизводительности и от содержания ГОУО в смеси с головинским углём представлены на рис. 4 и 5 соответственно. На рис. 4-6 номера экспериментальных точек соответствуют номерам опытов.

Зависимость коэффициента избытка воздуха перед золоуловителем от содержания ГОУО в смеси с головинским углём показана на рис. 5.

Кроме того, в процессе анализа сжигания ГОУО был рассмотрен вопрос абразивного износа поверхностей нагрева котлоагрегата ТП-30. Как правило, абразивный износ проявляется в зоне температур дымовых газов ниже 600°C, когда золовые частицы теряют поверхностную пластичность и становятся твердыми, то есть в верхней части конвективной шахты котельного агрегата. Если температура стенки труб конвективных поверхностей нагрева парогенераторов не превышает 350°C, то золовой износ можно рассматривать как чисто механический процесс. При определении золового износа конвективных поверхностей нагрева коэффициент износа можно принимать равным коэффициенту абразивности золы, определяемому относительно материала котельных труб. Коэффициент абразивности золы определяется в зависимости от содержания в золе ($SiO_2 + Al_2O_3$), % и рассчитывается по формуле $a_{20} = 0,045 \cdot (SiO_2 + Al_2O_3 - 44) \cdot 10^{-12}$, м²/Н. Результаты расчетов сведены в табл.8.

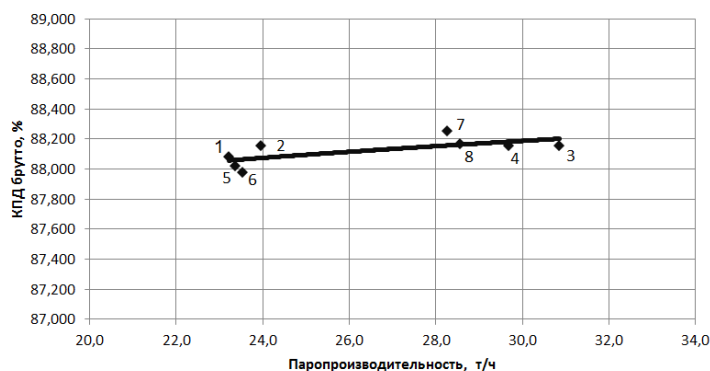


Рис. 4. Зависимость КПД котла брутто от паропроизводительности

Fig.4. Dependence of the gross boiler efficiency on the steam capacity

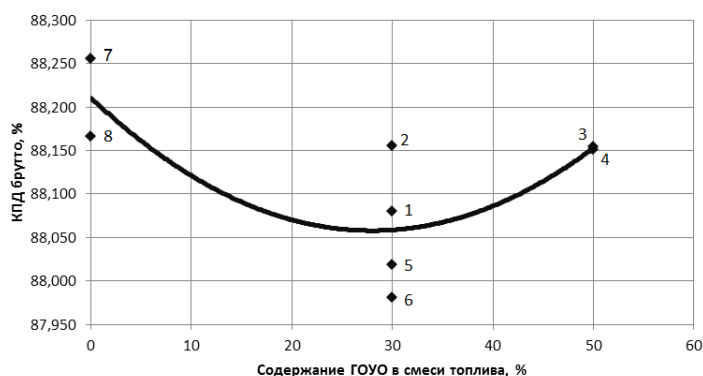


Рис. 5. Зависимость КПД котла брутто от содержания ГОУО в смеси с головинским углем

Fig.5. Dependence of the efficiency of the gross boiler on the content of GOO in the mixture with Golovinsky coal

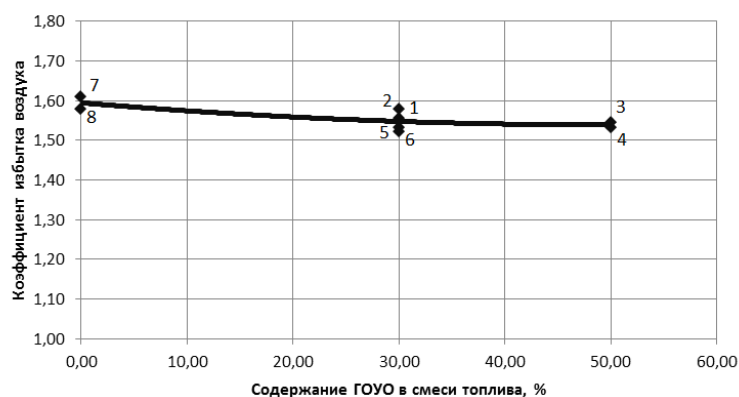


Рис. 6. Зависимость коэффициента избытка воздуха перед ЗУУ от содержания ГОУО в смеси с головинским углём

Fig.6. The dependence of the coefficient of excess air in front of the DCS on the content of the DCS in the mixture with Golovinsky coal

Таблица 7

Скорость абразивного износа конвективных поверхностей теплообмена						
Поверхность теплообмена	Скорость абразивного износа, мм/7000 час					
	30% гранул без мраморной крошки	30% гранул с мраморной крошкой	50% гранул без мраморной крошки	50% гранул с мраморной крошкой	70% гранул без мраморной крошки	70% гранул с мраморной крошкой
водяной экономайзер	0,25	0,264	0,272	0,299	0,298	0,341
воздухоподогреватель	0,0252	0,0266	0,0274	0,0301	0,03	0,0343

Связывание серы топлива с использованием отходов мраморного производства (мраморной крошки), содержащих в своем составе значительное количество оксидов CaO, MgO, определяет значительное связывание окислов серы.

Данный способ имеет ряд особенностей:

- изменяется химический состав и свойства золы, что приводит к увеличению шлакования поверхностей нагрева;
- изменяется количество золы, что приводит к увеличению абразивного износа;
- снижается концентрация диоксида серы и, как следствие, температура сернокислотной точки росы.

В табл.8 представлены расчетные исследования скорости низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя котлоагрегата ТП-30.

Таблица 8

Скорость низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя							
Показатель	Опыт						
	2	3	4	5	6	7	8
Температура точки росы, °C	114,5	109,28	104,94	105,16	94,82	100,28	78,47
Минимальная температура стенки трубок ВЗП, °C	79,95	80,9	80,7	81,64	81,31	82,34	82
Расчетная скорость низкотемпературной коррозии, мм/год	0,093	0,0982	0,097	0,1019	0,1	0,1048	0,1

Зависимость содержания SO₂ в дымовых газах от содержания ГОУО в смеси с головинским углём приведена на рис. 6.

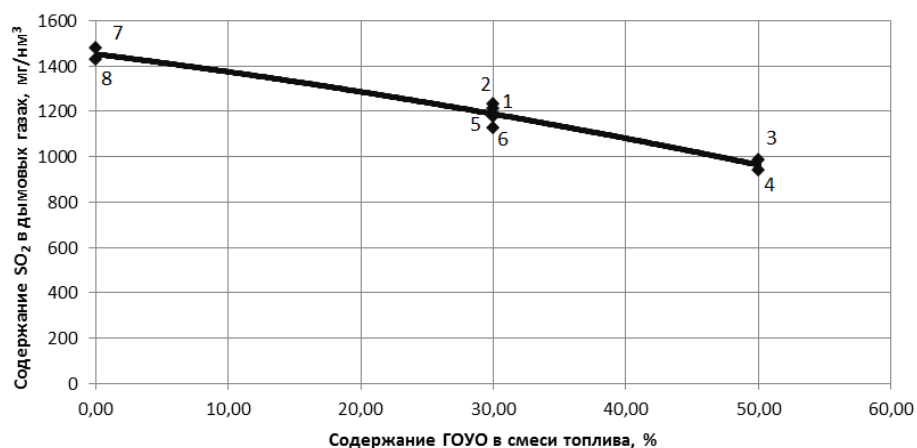


Рис. 7. Зависимость содержания SO₂ в дымовых газах от содержания ГОУО в смеси с головинским углем

Fig.7. Dependence of the SO₂ content in the flue gases on the content of the SOO in the mixture with Golovinsky coal

Выводы

Проведенные испытания при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения на котле ТП-30 ст. № 7 ТЭЦ-12 позволяют определить основные моменты, которые необходимо учитывать при разработке мероприятий при сжигании отходов углеобогащения на ТЭЦ-12 ПАО «Иркутскэнерго»:

основные параметры работы котла практически не изменились;

незначительное снижение температуры аэросмеси на выходе из мельниц по сравнению с чистым головинским углем обусловлено большей влажностью смеси;

в режиме работы тракта топливоподачи от разгрузочной эстакады до бункера сырого угля при транспортировке смеси существенных отклонений не выявлено;

наблюдается снижение выбросов диоксидов серы на 18-30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси.

Таким образом, отходы углеобогащения Ново-Гришевской ОФ достаточно эффективно можно сжигать в топках энергетических котлов на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго». Кроме того, опытные исследования, проведенные на ТЭЦ-12 при сжигании головинского угля в смеси с гранулированными отходами углеобогащения в количествах до 50% от общего количества смеси, свидетельствуют о том, что ГОУО возможно сжигать без особых ограничений в работе оборудования ТЭЦ.

Литература

- Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. 37-44.
- Medium Term Coal Market Report 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p.
- Coal information: overview. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. [Электронный ресурс]. Доступно по URL: <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en> (20.03.2020).
- Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., и др. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на ортаногольные топливные композиции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. 72-82.
- Lei Cai., Chun Zou., Yang Liu., et al. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres // Fuel. 2015. V. 139. P. 198-205.
- Briceland C.L., Khinkis M.J., Waibel R.T. Combustion Characteristics of Fine_Ground Coal // Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc. Int. Symp. Akron, Ohio, 1983. Paper no. 10.
- The US Coal Crash. Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p.
- Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospheric Environment. 2014. V. 92. pp. 449–460.

9. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. 2017. № 8. С.10-14.
10. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // Уголь. 2018. № 3. С. 58-73.
11. Глинина О.И. Угольная промышленность в России: 295 лет истории и новые возможности // Уголь. 2017. № 10. С. 4-11.
12. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2018 года // Уголь. 2019. № 3. С. 64-79.
13. Мурко В.И., Карпенко В.И. Разработка технологии комплексного использования побочных продуктов обогащения угля // Уголь. 2018. № 2. С.54-58.
14. Козлов В.А., Гарбер В. Сжигание высокосольных шламов как путь к безотходной технологии обогащения углей // Уголь. 2017. № 8. С.140-145.
15. Komilis D., Kissas K., Symeonidis A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram, Waste Management, 34 (2014), pp. 249–255.
16. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В. Использование вторичных ресурсов (отходов углеобогащения) для сжигания в топках ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» // Журнал «Новости теплоснабжения»/ 2014. №3 (163). С.30-31.
17. Целуйко О.В., Волкова Т.П. К вопросу использования отходов углеобогащения. Материалы конференции. ДонНТУ, 2007. 43-47 с.
18. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Комплексные исследования возможности использования отходов предприятий углеобогащения в качестве альтернативного топлива // Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск: изд-во ИрННТУ, 2013. С.156-160.

Авторы публикации

Кудряшов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Институт энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Россия, e-mail: kan@istu.irk.ru.

Коваль Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Институт энергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, e-mail: kovaltv@istu.irk.ru.

Ижганайтис Максим Иозо – магистрант, институт энергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия.

References

1. Kuznetsov AV, Butakov EB. Investigation of mechanical activation influence on fuel combustion. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016; 327(6): 37-44. Available at: URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30948/1/bulletin_tpu-2016-v327-i6-04.pdf.
2. *Medium Term Coal Market Report* 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p.
3. *Coal information: overview*. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. Available at: <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en>. Accessed to: 20th March 2020.
4. Kurgankina MA, Vershinina KYu, Ozerova IP, Medvedev VV. Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(9):72-82. Available at: URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/51030/1/bulletin_tpu-2018-v329-i9-07.pdf.
5. Lei Cai, Chun Zou, Yang Liu. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres. *Fuel*. 2015;139:198-205.
6. Briceland CL, Khinkis MJ, Waibel RT. *Combustion Characteristics of Fine_Ground Coal. Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc.* Int. Symp. Akron, Ohio, 1983. Paper no. 10.

7. *The US Coal Crash. Evidence for Structural Change*. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p.
8. Guttikunda SK, Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*. 2014;92:449-460. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057> Accessed to: 20th March 2020.
9. Yanovskii AB. The main trends and development prospects of the coal industry in Russia. *Ugol'*. 2017;8:10-14. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>.
10. Tarazanov IG. The results of the coal industry of Russia in January-December 2017. *Ugol'*. 2018;3:58-73. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>.
11. Glinina OI. Coal industry in Russia: 295 years of history and new opportunities. *Ugol'*. 2017;10:4-11. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10>.
12. Tarazanov IG. The results of the work of the coal industry in Russia for January-December 2018. *Ugol'*. 2019;3:64-79. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-3-64-79>.
13. Murko VI, Karpenok VI. Development of a technology for the integrated use of by-products of coal preparation. *Ugol'*. 2018;2:54-58. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-4-54-59>.
14. Kozlov VA, Garber V. Combustion of high-ash sludge as a way to waste-free coal preparation technology. *Ugol'*. 2017;8:140-145. Available at: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-140-145>.
15. Komilis D, Kissas K, Symeonidis A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. *Waste Management*. 2014;34:249-255.
16. Kudryashov AN, Koval TV. Use of secondary resources (coal preparation waste) for combustion in the furnaces of the CHPP of Irkutskenergo. *Novosti teplosnabzheniya*. 2014;3(163):30-31.
17. Tseluiko OV, Volkova TP. *On the issue of using waste coal*. Materials conference. DonNTU. 2007. p.43-47.
18. Tyurina EA, Izhganaitis MI. *Comprehensive studies of the possibility of using waste from coal processing enterprises as an alternative fuel*. Materialy vsenos. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri» Materials vsenos. scientific-practical conf. from the international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia». 22–27 April 2013, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk national research technical university, 2013, p. 156-160.

Authors of the publication

Alexander N. Kudryashov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
e-mail: kan@istu.irk.ru.

Tatyana V. Koval – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
e-mail: kovaltv@istu.irk.ru.

Maxim I. Izhganaitis – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

<i>Получено</i>	<i>26 января 2021г.</i>
<i>Отредактировано</i>	<i>27 января 2021г.</i>
<i>Принято</i>	<i>27 января 2021г.</i>