

УДК 662.732:622.85 © Д.А. Логинов¹, С.Р. Исламов¹, С.Г. Степанов²,
А.П. Черных¹, Е.М. Евтушенко², 2024

UDC 662.732:622.85 © D.A. Loginov¹, S.R. Islamov¹, S.G. Stepanov²,
A.P. Chernykh¹, E.M. Evtushenko², 2024

¹ ООО «Уголь-инжиниринг», 660001, г. Красноярск, Россия

¹ Coal-engineering LLC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

² АО «СУЭК-Красноярск», 660049, г. Красноярск, Россия

² АО «SUEK-Krasnoyarsk», Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

✉ e-mail: LoginovDA@suek.ru

✉ e-mail: LoginovDA@suek.ru

Экологическая безопасность технологий серии «ТЕРМОКОКС»

Environmental safety of TERMOKOKS series technologies

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-76-83>

ЛОГИНОВ Д.А.

Доктор техн. наук, заместитель
технического директора
ООО «Уголь-инжиниринг»,
660001, г. Красноярск, Россия,
e-mail: LoginovDA@suek.ru

ИСЛАМОВ С.Р.

Доктор техн. наук, технический
директор ООО «Уголь-инжиниринг»,
660001, г. Красноярск, Россия,
e-mail: IslamovSR@suek.ru

СТЕПАНОВ С.Г.

Доктор техн. наук, начальник управления
инновационных технологий переработки
угля АО «СУЭК-Красноярск»,
660049, г. Красноярск, Россия,
e-mail: StepanovSG@suek.ru

ЧЕРНЫХ А.П.

Канд. техн. наук, начальник отдела
ООО «Уголь-инжиниринг»,
660001, г. Красноярск, Россия,
e-mail: ChernykhAP@suek.ru

ЕВТУШЕНКО Е.М.

Генеральный директор
АО «СУЭК-Красноярск»,
660049, г. Красноярск, Россия,
e-mail: EvtushenkoEM@suek.ru

В статье рассмотрены вопросы снижения удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на теплогенерирующих объектах при применении различных технологических процессов термической переработки угля серии «Термококс». Показано значительное снижение выбросов загрязняющих веществ в расчете на единицу генерируемой тепловой энергии в технологических процессах «Термококс-С», «Термококс-КС», «Термококс-ПКВД» по сравнению с процессом классического сжигания угля в слоевых топках котельных агрегатов. В определенных режимах переработки угля возможно снижение удельных выбросов вредных веществ на 20%. Особенно примечательно снижение выбросов бенз(а)пирена – вещества первого класса опасности – в 200 раз при переработке угля по технологии «Термококс-С», по данным инструментальных измерений. Удельные выбросы диоксида углерода CO_2 при переработке угля марки Д по технологии «Термококс-С» снижаются на 14%, а при переработке угля 2Б в полукокс по технологии «Термококс-КС» – на 17%. Так как в технологиях «Термококс» производятся два продукта – тепловая энергия и коксовая продукция, то валовые выбросы CO_2 при учете углеродного следа нужно распределять между ними. При отнесении части выбрасываемого диоксида углерода на параллельно производимую коксовую продукцию в размере действующих нормативов для производства кокса удельные выбросы CO_2 в сравнении с классической угольной теплогенерацией снижаются на 40% в технологических процессах «Термококс-С» и «Термококс-ПКВД» и более, чем на 80% при производстве полукокса по технологии «Термококс-КС».

Ключевые слова: термококс, уголь, газификация, полукокс, загрязняющие вещества, экология, бенз(а)пирен, парниковый эффект, климат, диоксид углерода.

Для цитирования: Экологическая безопасность технологий серии «ТЕРМОКОКС» / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, С.Г. Степанов и др. // Уголь.2024;(7):76-83. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-76-83.

Abstract

The article discusses the issues of reducing specific emissions of pollutants into the atmosphere at heat-generating facilities when using various technological

processes for the thermal processing of coal of the Termokoks series. A significant reduction in pollutant emissions per unit of generated thermal energy in the technological processes "Termokoks-S", "Termokoks-KS", "Termokoks-PKVD" was shown in comparison with the process of classical coal combustion in the furnaces of layered boiler units. In certain coal processing modes, it is possible to reduce specific emissions of harmful substances by 20%. Particularly noteworthy is the reduction in emissions of benz(a)pyrene, a substance of the first hazard class, by 200 times when processing coal using the Termokoks-S technology, according to instrumental measurements. Specific emissions of carbon dioxide CO₂ when processing grade D coal using the Termokoks-S technology are reduced by 14%, and when processing 2B coal into semi-coke using the Termokoks-KS technology by 17%. Since Termokoks technologies produce two products – thermal energy and coke products, gross CO₂ emissions must be distributed between them when taking into account the carbon footprint. When attributing part of the emitted carbon dioxide to coke products produced in parallel in the amount of current standards for coke production, specific CO₂ emissions in comparison with classical coal heat generation are reduced by 40% in the Termokoks-S and Termokoks-PKVD technological processes and by more than 80% in the production of semi-coke using the Termokoks-KS technology.

Keywords

Termokoks, coal, gasification, semi-coke, pollutants, ecology, benz(a)pyrene, greenhouse effect, climate, carbon dioxide.

For citation

Loginov D.A., Islamov S.R., Stepanov S.G., Chernykh A.P., Evtushenko E.M. Environmental safety of TERMOKOKS series technologies. *Ugol'*. 2024;(7):76-83. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-76-83.

ВВЕДЕНИЕ

В контексте ратифицированного Россией Парижского соглашения, а также в соответствии с Энергетической стратегией России до 2035 года переход экономики России к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике является приоритетной задачей государственной энергетической политики страны. Традиционная угольная энергетика, технологические основы которой заложены еще во времена промышленной революции, не способна в полной мере ответить экологическим и экономическим вызовам современности. Для обеспечения возможности функционирования угольной генерации России на принципах экологической чистоты и ресурсосбережения необходимы разработка и внедрение инновационных низкоэмиссионных процессов энерготехнологического использования угля с целью производства тепловой и электрической энергии. Такие технологии непременно должны обеспечивать энергетиче-

скую и экономическую эффективность, высокую производительность и экологическую безопасность.

Единственными действующими в промышленных масштабах в настоящее время в России технологиями с такими возможностями являются технологии серии «Термококк», позволяющие в результате частичной газификации энергетического угля наряду с тепловой энергией производить высококалорийное топливо, высокорреакционные углеродистые восстановители для металлургии, углеродные сорбенты и бездымное бытовое топливо. Номенклатура технологических процессов «Термококк» включает: переработку угля в стационарном слое с обращенным дутьем «Термококк-С»; в кипящем слое «Термококк-КС»; полукоксование угля под давлением «Термококк-ПКВД». Каждый из этих процессов к настоящему времени имеет различные варианты исполнения с различными марками и характеристиками используемого угля, параметрами дутья и, как следствие, различные свойства производимой продукции и различные удельные выбросы загрязняющих веществ и CO₂.

В настоящей работе приведена оценка удельных выбросов загрязняющих веществ и диоксида углерода, в том числе результаты расчетов и инструментальных измерений при энерготехнологической переработке угля по технологиям серии «Термококк». Показано, что технологии «Термококк» обеспечивают существенное снижение удельных выбросов в расчете на единицу производимой тепловой энергии.

КОНЦЕПЦИЯ «ТЕРМОКОКС»

На сегодняшний день использование процессов частичной газификации угля серии «Термококк» с целью переработки энергетических углей в высококарбонизированные продукты представляется одним из самых перспективных направлений развития угольной отрасли. Суть концепции состоит в разделении органической массы угля с высоким выходом летучих веществ (*рис. 1*) на два продукта – газовое топливо и коксовый остаток (полукокк, среднетемпературный кокс). Причем за счет выбора процесса для переработки угля и рабочих параметров преобладающим продуктом технологии может являться коксовый остаток или горючий газ.

На *рис. 2* представлена принципиальная схема энерготехнологической концепции «Термококк».

В технологиях «Термококк» две трети углерода выводится из энергетического цикла в твердом виде в составе термококка, а для генерации энергии сжигается газовое топливо с повышенным содержанием водорода, что в определенных режимах работы дает снижение эмиссии CO₂ по сравнению со сжиганием угля. В карбонизате также остается часть азота и серы, что в конечном итоге обеспечивает снижение удельной эмиссии загрязняющих веществ при сжигании газа. В дальнейших расчетах не будем сравнивать выбросы твердых

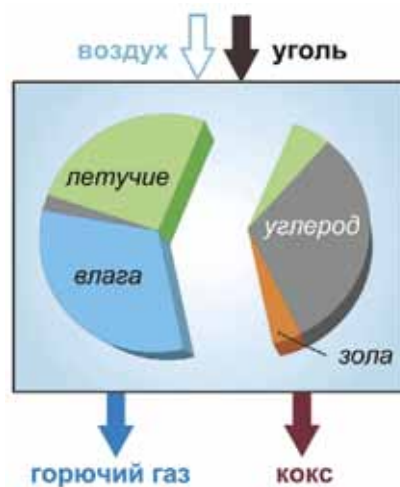


Рис. 1. Принцип частичной газификации угля

Fig. 1. The principle of partial coal gasification

частиц в различных технологиях, так как этот показатель довольно легко регулируется широко применяемыми в энергетике средствами улавливания пыли. Основной интерес для сравнения представляют газовые выбросы: оксиды азота, серы, углерода, а также выбросы бенз(а)пирена.

Расчет выбросов загрязняющих веществ при сжигании угля в качестве базы для сравнения произведен по методике [1], являющейся единственной действующей в России методикой расчета выбросов при сжигании топлив в котлах малой мощности. Расчет выбросов загрязняющих веществ от технологий «Термококк» произведен по той же методике, но с учетом разделения угля в процессе частичной газификации на два продукта – карбонизата и газового топлива. Зная характеристики угля и характеристики полученного карбонизата, выводимого из процесса производства тепловой энергии, можно определить интегральные теплотехнические свойства и элементный состав получаемого горючего газа, который и учитывается в последующих расчетах в качестве «топлива». Также, зная элементный состав угля и карбонизата, можно определить по балансу углерода выбросы CO_2 на единицу тепловой энергии. В расчетах не учитывался КПД котельного агрегата ввиду его различных значений для котлов разных конструкций.

ТЕХНОЛОГИЯ «ТЕРМОКОКС-С»

Первой промышленной реализацией технологий этой серии является одностадийный автотермический процесс энерготехнологической переработки угля «Термококк-С». Технология радикально отличается от классических процессов пиролиза и коксования тем, что при переработке угля не образуются побочные продукты в виде конденсированных вредных веществ (смолы, фусы, фенольные воды и т.п.). Технология позволяет перерабатывать как бурый уголь, так и каменный уголь марок Д, ДГ, СС. Причем переработку можно вести в различных режимах [2, 3, 4, 5]. В режиме полной газификации угля целевым продуктом является горючий газ, а в режиме частичной газификации – среднетемпературный кокс и полукокс в зависимости от температуры процесса.

Первое промышленное предприятие для производства из бурого угля среднетемпературного кокса и энергетического газа на основе этого процесса было построено компанией «Сибтермо» в 1996 г. в г. Красноярске. Это завод активированных углей ЗАО «Сорбентуголь» мощностью около 40 тыс. т угля в год (в настоящее время ООО «Карбоника-Ф») [6, 7]. Получаемый на предприятии ООО «Карбоника-Ф» мелкозернистый кокс отличается сравнительно высокими адсорбционными свойствами и уже в течение двух десятилетий используется в качестве сорбента для очистки вод от органических загрязнителей.

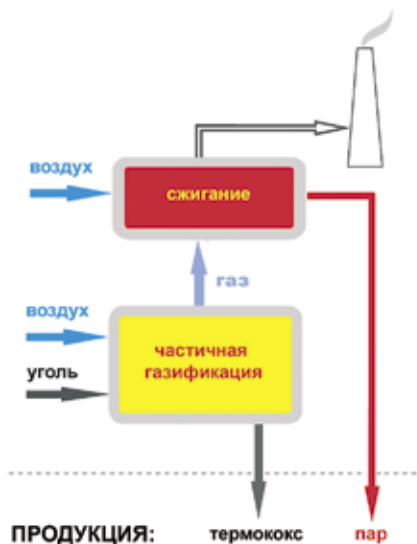


Рис. 2. Принципиальная схема энерготехнологической концепции «Термококк»

Fig. 2. A schematic diagram of the Termokoks power engineering concept

Генераторный газ сжигается в водогрейных котлах для отопления прилегающего района города. При переработке каменных углей по технологии «Термококк-С» получают также два продукта – твердый кусковой карбонизат (кокс, полукокс в зависимости от температуры) и горючий газ. Такой кокс обладает высокой реакционной способностью, достаточной для его применения в качестве углеродистого восстановителя в электротермических процессах при производстве ферросплавов, карбида кальция, фосфора. Также он может быть использован как бездымное бытовое топливо.

Рассмотрим экологическую, в том числе климатическую, составляющую реализации этой технологии при использовании различных марок угля и в нескольких режимах работы.

В работе [8] приведены характеристики угля и карбонизата, данные о материальном и энергетическом балансах процесса переработки угля

марки 2Б в различных режимах, охватывающих температурный диапазон от 650°C до 930°C, то есть от режима полукоксования до режима полной газификации, что позволяет проанализировать удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии в зависимости от температуры термообработки.

Стоит учитывать, что целью технологий серии «Термококк» является все же не только производство тепловой энергии, но и производство углеродистого восстановителя. Поэтому целесообразно выбросы диоксида углерода распределять между этими двумя получаемыми продуктами. Согласно [9, 10] норматив выбросов CO_2 при классическом коксовании составляет 0,56 г CO_2 /г кокса, а в реальном производстве они достигают и более высоких значений [11].

Результаты расчетов выбросов загрязняющих веществ по нормативной методике [1] приведены в табл. 1.

Видно, что наибольшего снижения удельных выбросов загрязняющих веществ удается достичь при переработке угля в режиме полукоксования при низкой температуре (см. табл. 1). В этом случае значительная часть азота и серы остается в полукоксе и не преобразуется в оксиды. При увеличении глубины переработки угля органические компоненты угля переходят в газовое топливо, при сгорании которого окисляются до оксидов, поэтому удельные выбросы загрязняющих веществ при полной газификации угля практически не отличаются от варианта классического сжигания угля. Особенно заметно снижение выбросов бенз(а)пирена (вещество 1-го класса опасности) на 22% в режиме полукоксования угля. Удельные выбросы диоксида углерода во всем диапазоне режимных параметров остаются практически неизменными, но при отнесении части этих выбросов на производство термококса удельные выбросы CO_2 при производстве тепловой энергии могут быть снижены на 38%.

Удельные выбросы технологии «Термококк-С» при переработке угля марки 2Б

Specific emissions of the Termokoks-S technology when processing Grade 2B coals

Параметр	Технология			
	Сжигание угля	Термококк-С 650°C	Термококк-С 850°C	Термококк-С 930°C
Удельное производство термококка, г/МДж	0	69,9	15,9	5,0
Удельные выбросы, г/МДж:				
– NO ₂	0,279	0,243 (-13%)	0,270 (-3%)	0,275 (-2%)
– NO _x	0,046	0,040 (-13%)	0,044 (-3%)	0,045 (-2%)
– SO ₂	0,167	0,109 (-35%)	0,165 (-1%)	0,167 (-0%)
– CO	0,802	0,793 (-1%)	0,793 (-1%)	0,793 (-1%)
Удельные выбросы бенз(а)пирена, мкг/МДж	2,0	1,56 (-22%)	1,88 (-6%)	1,95 (-2%)
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж	101,3	98,4	100,5	100,0
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж (при отнесении нормативных выбросов на термококк)	101,3	59,2 (-38%)	91,5 (-9%)	98,5(-3%)

Приведем результаты инструментальных измерений выбросов загрязняющих веществ при переработке угля в буроголиный сорбент на экспериментальном стенде ООО «Уголь-инжиниринг» (рис. 3). Температура процесса частичной газификации в этом режиме составляет 850-880°C, поэтому в качестве сравнительных данных приведены также расчетные значения из табл. 1 для режима с температурой 850°C.

Видно, что данные инструментальных измерений по ряду показателей значительно отличаются от расчетных по нормативной методике [1]. Сравнительно низкая температура газового факела (менее 1400°C) предотвращает образование термических оксидов азота, поэтому все NO_x являются топливными оксидами. Примененная расчетная методика также учитывает отсутствие окисления азота воздуха в котлах малой мощности, поэтому расчетные и фактические данные практически совпадают.

Вдвое сниженный уровень SO₂ в сравнении с расчетом объясняется тем, что часть органической серы угля не разлагается при температуре ведения процесса и остается в термококксе.

Радикально низкий уровень выбросов бенз(а)пирена (в 200 раз в сравнении с расчетным) также обусловлен спецификой технологического процесса. При частичной газификации с обращенным дутьем высокомолекулярные продукты термического разложения угля попадают в зону огневого обезвреживания за фронтом, где практически полностью сгорают.

Низкий уровень удельных выбросов CO объясняется качественной настройкой процесса сжигания газа, чего в процессе слоевого сжигания угля достичь практически невозможно ввиду технических особенностей оборудования.

Таким образом, инструментальные измерения показывают, что технология «Термококк-С» при частичной газификации бурого угля позволяет более чем на порядок снизить удельные выбросы вредных веществ в малой и средней энергетике без применения специальных методов очистки

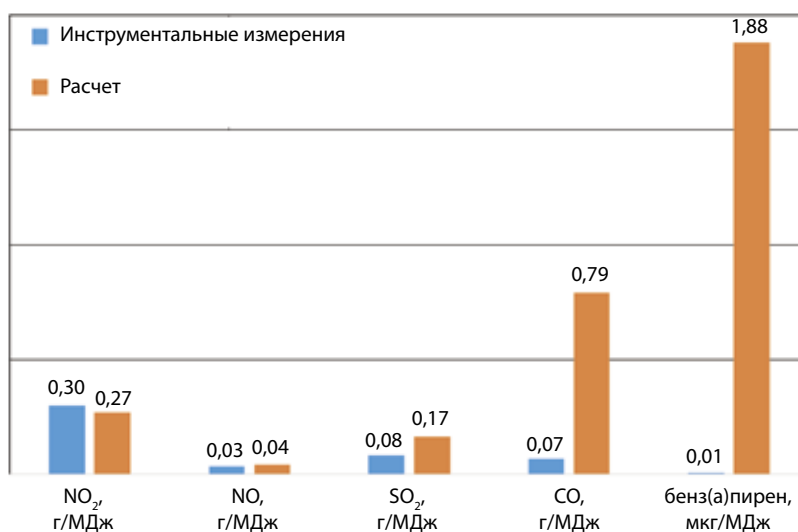


Рис. 3. Сравнение результатов расчетных и инструментальных измерений выбросов

Fig. 3. Comparison of the computational and instrumental results of emission measurements

дымовых газов. Все указанные показатели достигаются исключительно за счет специфики процесса частичной газификации.

Из сравнения инструментальных и расчетных данных установлено, что действующая методика может использоваться только в качестве оценки выбросов технологий «Термококк» при разработке проектной документации в связи с отсутствием других действующих методик расчетов выбросов загрязняющих веществ, при использовании угля для выработки тепловой энергии в малых котлах. После ввода объектов в эксплуатацию, как правило, проводится инвентаризация выбросов путем инструментальных измерений, и уже на основании этих измерений выдается разрешение на выбросы предприятия.

Рассмотрим вариант карбонизации по этой технологии угля марки Д.

Как показало сравнение выше расчетных данных с инструментальными измерениями, и при переработке угля Д стоит ожидать радикального снижения удельных выбросов.

Удельные выбросы технологии «Термококк-С» при переработке угля марки Д
Specific emissions of the Termokoks-S technology when processing Grade D coals

Параметр	Технология			
	Сжигание угля	Термококк-С 770°C	Термококк-С 820°C	Термококк-С 870°C
Удельное производство термококка, г/МДж	0	60,7	50,0	40,5
Удельные выбросы, г/МДж				
– NO ₂	0,304	0,289 (-5%)	0,298 (-2%)	0,303 (-1%)
– NO _x	0,050	0,047 (-5%)	0,049 (-2%)	0,049 (-1%)
– SO ₂	0,127	0,120 (-5%)	0,118 (-1%)	0,114 (-4%)
– CO	0,802	0,793 (-1%)	0,793 (-1%)	0,793 (-1%)
Удельные выбросы бенз(а)пирена, мкг/МДж	2,40	2,13 (-11%)	2,29 (-5%)	2,39 (-1%)
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж	94,2	80,8 (-14%)	83,4 (-11%)	86,8 (-8%)
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж (при отнесении нормативных выбросов на термококк)	94,2	60,2 (-36%)	66,2 (-30%)	71,5 (-24%)

В работе [5] автором технологии приведены характеристики угля, характеристики карбонизата, данные о материальных балансах процесса переработки угля марки Д в различных режимах при температурах от 770°C до 870°C. Результаты расчетов выбросов загрязняющих веществ по нормативной методике [1] приведены в табл. 2.

Так же, как при переработке угля марки 2Б, наибольшее снижение удельных выбросов загрязняющих веществ возможно в режиме полукоксования. Расчетные выбросы бенз(а)пирена в этом режиме снижаются на 11%. Действующих промышленных предприятий по переработке угля Д по технологии «Термококк-С» пока нет, а дополнительные инструментальные измерения выбросов вредных веществ при переработке угля марки Д на экспериментальном стенде не проводились. Однако и в этом случае, по аналогии с переработкой бурого угля, следует ожидать радикального снижения удельных выбросов СО и бенз(а)пирена, а также существенного снижения удельных выбросов SO₂.

В отличие от угля 2Б при переработке угля Д удельные выбросы диоксида углерода значительно ниже, чем при его сжигании и заметно снижаются с уменьшением температуры процесса. Так, при переработке угля при температуре 770°C выбросы CO₂ на 14% меньше, чем при сжигании угля, а при дальнейшем снижении температуры могут быть снижены еще больше. При отнесении на карбонизат части выбросов CO₂, равной количеству нормативных выбросов при производстве кокса, удельные выбросы производства тепловой энергии снижаются на 36%. С учетом нарастающего давления на угольную генерацию и металлургию как в части выбросов загрязняющих веществ, так и в части выбросов CO₂ этот показатель технологии «Термококк-С» уже в ближайшем будущем может стать решающим при выборе способа выработки тепловой и электрической энергии в малой и средней энергетике.

ТЕХНОЛОГИЯ «ТЕРМОКОКК-ПКВД»

В настоящее время, с учетом удорожания коксующихся углей, в металлургических процессах производства ферросплавов, высокотемпературного обжига руд и нерудных материалов, а также в других приложениях, требующих использования твердого топлива с высокой теплотой сго-

рания, востребованным продуктом является кусковой полукокк, который может применяться как в качестве углеродистого восстановителя для металлургии, так и в качестве высококалорийного топлива. При этом, ввиду условий добычи, полукокк из бурых углей мог бы быть значительно дешевле, чем из каменного. Однако, при переработке бурого угля по технологии «Термококк-С» ввиду невысокой термической прочности происходит термическая деструкция кускового угля, и продуктом является мелкозернистый кокс, что затрудняет его использование в металлургии. Брикетирование же неизбежно ведет к удорожанию.

В основе разработанной технологии «Термококк-ПКВД» лежит нагрев кускового угля в реакторе под давлением. В процессе нагрева угольная матрица размягчается и под воздействием внешнего давления сжимается, в результате чего снижается общий объем пор кусков угля. При этом получается кусковой продукт, обладающий механической прочностью, сопоставимой с прочностью исходного угля, высокой низшей удельной теплотой сгорания, сниженным водопоглощением, высокой реакционной способностью и большим удельным электросопротивлением.

В работах [12, 13, 14] приведены характеристики исходных углей и полукоксов, данные о материальном и энергетическом балансах процесса переработки бурых углей марок 1Б, 2Б и каменного угля марки Д в различных режимах. В работе [15] также уделено внимание экологической стороне при реализации этой технологии.

Результаты расчетов выбросов загрязняющих веществ по нормативной методике [1] при переработке угля под давлением в сравнении с прямым сжиганием приведены в табл. 3.

Важно отметить, что для выработки одного и того же количества тепловой энергии при переработке угля под давлением требуется больше сырья, чем при сжигании, вследствие чего выбросы диоксида углерода на единицу энергии даже возрастают, если относить их все на производство тепловой энергии, а производство углеродистого восстановителя считать с нулевыми выбросами. В случае отнесения выбросов оксида углерода на производство полукокка согласно указанным нормативам, удельные выбросы в процессе «Термококк-ПКВД» при переработке углей марки 1Б снижаются в 1,5 раза, а при переработке

Удельные выбросы технологии «Термококк-ПКВД»

Specific emissions of the Termokoks-PKVD technology

Параметр	Марка угля		
	1Б сжигание/ПКВД	2Б	Д
Удельное производство полукокса, г/МДж	0/108	140	128
Удельные выбросы, г/МДж			
– NO ₂	0,257/0,204 (-21%)	0,208 (-26%)	0,245 (-19%)
– NO _x	0,042/0,033 (-21%)	0,034 (-26%)	0,040 (-19%)
– SO ₂	0,247/0,217 (-12%)	0,142 (-15%)	0,108 (-15%)
– CO	0,802/0,793 (-1%)	0,793 (-1%)	0,793 (-1%)
Удельные выбросы бенз(а)пирена, мкг/МДж	1,71/1,28 (-25%)	1,31 (-35%)	1,60 (-33%)
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж	124/162,4	152,8	131,3
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж (при отнесении нормативных выбросов на полукокк)	124/101,6	74,4	59,6

углей марок 2Б и Д – в два раза (см. табл. 3). Во всех случаях удельные выбросы CO₂ ниже, чем при сжигании угля.

Как следует из представленных результатов (см. табл. 3), удельные выбросы вредных веществ при термической переработке угля под давлением ниже, чем при прямом сжигании по всем показателям. Промышленные предприятия, действующие по этой технологии, в эксплуатацию еще не введены, поэтому анализ результатов инструментальных измерений выбросов загрязняющих веществ не представляется возможным. Следует ожидать существенного снижения выбросов CO ввиду сжигания газа, а не твердого угля, а также снижения выбросов бенз(а)пирена и SO₂.

Удельные выбросы CO₂ при отнесении их всех на тепловую энергию значительно выше, чем при сжигании соответствующих углей, так как в полукоксе концентрируется значительная часть энергии исходного угля, и тепловой энергии от сжигания газа производится меньше. Однако при отнесении нормативных выбросов CO₂ на полукокк удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии снижаются в разы, так как удельная производительность по полукоксу технологии «Термококк-ПКВД» очень высока.

ТЕХНОЛОГИЯ «ТЕРМОКОКК-КС»

Целью технологии «Термококк-КС» является трансформация природного энергоносителя – угля с высоким содержанием летучих веществ, в тепловую энергию и бурого кокса на основе комбинированного безотходного производства [16]. Термическая переработка угля происходит в кипящем слое только смеси угля и термококса без использования инертного теплоносителя.

За короткое время, прошедшее с момента разработки, технология успела претерпеть ряд значительных усовершенствований, и на данный момент в линейке продукции, производимой по этой технологии, присутствуют сорбенты различного качества, зерненный полукокк, среднетемпературный металлургический кокс [17, 18, 19]. Приведем расчетные показатели выбросов загрязняющих веществ по нормативной методике [1] при производстве этих трех основных видов продукции из бурого угля марки 2Б разреза «Березовский» (Красноярский край) в сравнении с выбросами при сжигании угля (табл. 4).

Расчетные значения удельных выбросов NO_x, SO₂ в технологии «Термококк-КС» на 7-8% ниже, чем при сжигании угля, а выбросы бенз(а)пирена ниже на 12% (см. табл. 4). Удельные выбросы CO₂ остаются практически неизменными при производстве сорбента и среднетемпературного кокса, но снижаются на 17% при производстве полукокса, так как значительная часть углерода выводится из теплогенерационного цикла в составе полукокса. При отнесении части CO₂ на термококк удельные выбросы снижаются во всех температурных режимах, а при организации производства полукокса могут снижены более чем на 80%.

Также приведем фактические удельные показатели на базе инструментальных измерений при эксплуатации котла КВТС-20, модифицированного под производство среднетемпературного кокса, на Березовском разрезе (Красноярский край) в сравнении с рассчитанными по [1] показателями (рис. 4), изменение этих данных приведено относительно расчетных показателей производства среднетемпературного кокса.

Как видно из приведенных данных, используемая методика расчета выбросов [1] при переработке угля в кипящем слое дает результаты, более близкие к инструментальным измерениям. Дело в том, что в этой технологии в котле сжигается не горючий газ, как в случае с технологией «Термококк-С», а пылегазовый поток, восходящий из реактора кипящего слоя в топку котельного агрегата. В этом случае условия сжигания очень близки к условиям сжигания угля в слоевых топках.

Фактические удельные выбросы по всем показателям ниже расчетных значений. Снижение выбросов NO_x объясняется восстановительной атмосферой в низкотемпературном кипящем слое ввиду осуществления процесса частичной газификации с избытками воздуха $\alpha < 1$, где и происходят образование топливных оксидов азота и их последующее восстановление до молекулярного азота в слое горячего кокса. Эти данные хорошо коррелируют с известными результатами [20], полученными в исследованиях процессов сжигания угля в классическом кипящем слое с песковой насадкой, где в результате сжигания высококальциевых и низкосернистых углей удельные выбросы оксидов азота составляли 0,12-0,15 г/МДж.

Удельные выбросы технологии «Термококк-КС»

Specific emissions of the Termokoks-KS technology

Параметр	Сжигание угля	«Термококк-КС»		
		Сорбент 870°С	Полукокк 550°С	Среднетемпературный кокс 770°С
Удельное производство термококка, г/МДж	0	25,9	149,3	30,6
Удельные выбросы, г/МДж				
– NO ₂	0,269	0,249	0,257	0,247
– NO _x	0,044	0,041	0,042	0,040
– SO ₂	0,123	0,114	0,119	0,120
– CO	0,802	0,793	0,793	0,793
Удельные выбросы бенз(а)пирена, мкг/МДж	1,85	1,63	1,63	1,61
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж	102,5	102,6	84,7	101,7
Удельные выбросы CO ₂ , г/МДж (при отнесении нормативных выбросов на термококк)	102,5	88,0 (-14%)	18,96 (-82%)	85,3 (-17%)

Снижение выбросов бенз(а)пирена и оксида углерода обеспечено организацией отдельного яруса вторичного дутья в топочный объем котла, где происходит активное дожигание выделяющихся из угля летучих веществ и мелкодисперсного уноса.

Следует отметить значительное снижение выбросов диоксида серы, так как и минеральная часть содержащейся в угле серы и значительная часть органической остаются в среднетемпературном коксе и в дымовые газы не попадают. Также часть серы связывается минеральной частью летучей золы по мере движения дымовых газов по газовому тракту котла вплоть до циклонов.

ВЫВОДЫ

Проведена расчетная оценка выбросов загрязняющих веществ в энерготехнологических процессах глубокой термической переработки угля серии «Термококк» при использовании их для выработки тепловой энергии. Ввиду отсутствия утвержденных специальных расчетных методик для технологий такого вида оценка проводилась по стандартной методике для сжигания углей в котлах малой и средней мощности. Результаты расчета показывают, что для всех рассмотренных технологических процессов: «Термококк-С», «Термококк-КС», «Термококк-ПКВД» – значения удельных выбросов загрязняющих веществ (NO_x, SO₂, CO, бенз(а)пирена) ниже значений для прямого сжигания угля. Значительного снижения удельных выбросов CO₂ в этой технологии возможно достичь при переработке углей марки Д, в этом случае большая часть углерода остается в твердом продукте, и удельные выбросы CO₂ снижаются на 20%.

Расчеты удельных выбросов при использовании процесса «Термококк-ПКВД» показывают снижение выбросов NO_x на 24-35%, SO₂ – на 2-5% и без(а)пирена – на 27-41%.

Удельные выбросы при переработке угля по технологии «Термококк-КС» не превышают расчетных значений при сжигании угля. Инструментальные же измерения показывают снижение удельных выбросов NO_x на 23%,

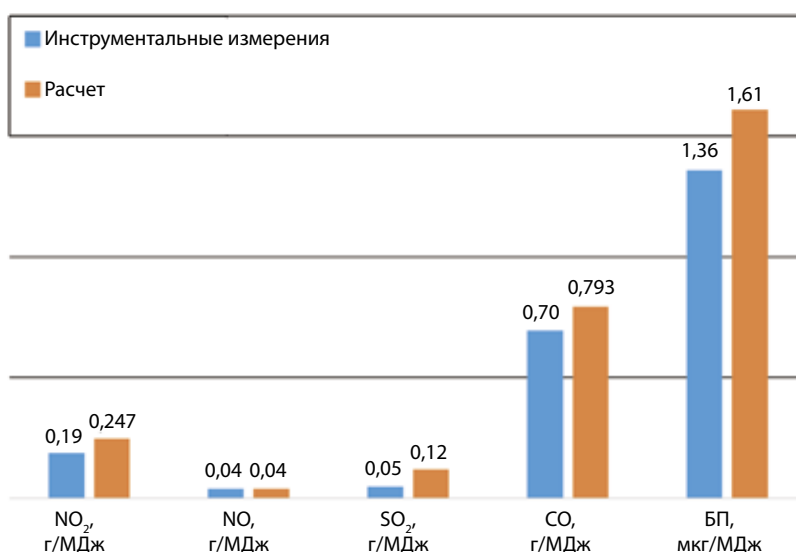


Рис. 4. Сравнение расчетных и инструментальных измерений выбросов загрязняющих веществ

Fig. 4. Comparison of the computational and instrumental measurements of pollutant emission

SO₂ – на 60%, CO – на 12%, бенз(а)пирена – на 16%. Полученные значения с хорошей точностью совпадают с показателями при сжигании угля в кипящем слое инертного материала. Удельные выбросы CO₂ при производстве полукокка по этой технологии также снижаются на 15-20%.

При отнесении части выбросов диоксида углерода, соответствующей удельным выбросам при производстве каменноугольного кокса, на производимый термококк, удельные выбросы CO₂ на единицу тепловой энергии во всех рассмотренных процессах оказываются значительно ниже, чем в классической теплогенерации.

Таким образом, установлено, что энерготехнологические процессы комбинированного производства энергоносителей серии «Термококк» обеспечивают беспрецедентный на сегодняшний день уровень экологической безопасности производства тепловой энергии из угля без использования при этом каких-либо специальных методов подавления или улавливания загрязняющих веществ и CO₂.

Список литературы • References

1. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. Санкт-Петербург: Интеграл, 1999. 76 с.
2. Михалев И.О., Исламов С.Р. Экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации угля // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 4. № 6. С. 57-62.
Mikhalev I.O., Islamov S.R. Experimental study of the reverse layered coal gasification process. *Fizika goreniya i vzryva*. 2009;4(6):57-62. (In Russ.).
3. Михалев И.О., Исламов С.Р. Формальная кинетика выхода летучих веществ при термической деструкции частиц бурого угля // Кокс и химия. 2009. № 2. С. 9-11.
Mikhalev I.O., Islamov S.R. Formal kinetics of volatile substances yield at thermal decomposition of lignite particles. *Koks i himiya*. 2009;(2):9-11. (In Russ.).
4. Исламов С.Р., Михалев И.О. Энерготехнологическое использование угля на основе процесса слоевой газификации «ТЕРМОКОКС-С» // Промышленная энергетика. 2009. № 10. С. 2-4.
Islamov S.R., Mikhalev I.O. Power engineering utilization of coal using the TERMOKOKS-S layered gasification process. *Promyshlennaya energetika*. 2009;(10):2-4. (In Russ.).
5. Степанов С.Г. Разработка автотермических технологий переработки угля: специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»: дис. ... доктора техн. наук / Степанов Сергей Григорьевич. Красноярск, 2003. 389 с.
6. Патент № 2014882 Российская Федерация МПК В01J 20/20 (1990.01) С01В 31/08 (1990.01). Способ получения адсорбента: № 92004035/26 заявл. 11.11.199: опубл. 30.06.1994 / Исламов С.Р., Степанов С.Г., Морозов А.Б., Славин В.С. 5 с.
7. Патент № 2014883 Российская Федерация МПК В01J 20/20 (1990.01). Способ получения углеродного адсорбента: № 93039409/26 заявл. 16.18.1993: опубл. 30.06.1994 / Исламов С.Р., Степанов С.Г., Морозов А.Б. 5 с.
8. Михалев И.О. Совершенствование процесса переработки угля при слоевой газификации с обращенным дутьем: специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»: дис. ... канд. техн. наук / Михалев Игорь Олегович. Красноярск, 2009. 226 с.
9. Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации. Распоряжение Минприроды от 16 апреля 2015 года № 15-р.
10. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 Том 3: Промышленные процессы и использование продуктов. Глава 4: Выбросы металлургической промышленности.
11. Отчет по мониторингу сокращения выбросов парниковых газов по проекту «Внедрение электросталеплавильного способа производства стали на ОАО «ММК». Российский реестр углеродных единиц: официальный сайт. 2012.
12. Loginov D.A., Chernykh A.P., Islamov S.R. An Experimental Study of the Effect of Pressure on the Process of Brown Coal Semicoking. *Solid Fuel Chemistry*. 2021;55(2):129-132.
13. Логинов Д.А., Черных А.П., Исламов С.Р. Термическая переработка энергетического угля под давлением с получением полукокса и тепловой энергии // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. № 14(4). С. 399-407.
Loginov D.A., Chernykh A.P., Islamov S.R. Thermal processing of thermal coal under pressure to produce semi-coke and thermal energy. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii*. 2021;(14):399-407. (In Russ.).
14. Патент № 2725792 Российская Федерация, МПК С10В 49/00 (2006.01). Способ получения кускового карбонизата: № 2019139394 заявл. 04.12.2019: опубл. 06.07.2020 / Исламов С.Р., Логинов Д.А., Черных А.П. 5 с.
15. Черных А.П. Энерготехнологическая переработка угля под давлением с целью производства кускового полукокса и газового топлива: специальность 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»: дис. ... канд. техн. наук / Черных Артем Петрович. Красноярск, 2023. 157 с.
16. Исламов С.Р. Энерготехнологическая переработка бурого угля в типовом котельном агрегате // Промышленная энергетика. 2008. № 2. С. 25-28.
Islamov S.R. Power engineering processing of lignite coal in a conventional boiler unit. *Promyshlennaya energetika*. 2008;(2):25-28. (In Russ.).
17. Логинов Д.А., Деменчук С.В., Исламов С.Р. Повышение эффективности процесса автотермической переработки угля в кипящем слое // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 408-415.
Loginov D.A., Demenchuk S.V., Islamov S.R. Increasing the Efficiency of the Autothermal Processing of Coal in a Fluidized Bed. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii*. 2021;14(4):408-415. (In Russ.).
18. Loginov D.A., Demenchuk S.V., Islamov S.R. New Applications of Fluidized-Bed Carbonization. *Coke and Chemistry*. 2020;63(11):519-521.
19. Loginov D.A., Islamov S.R., Stepanov S.G., Kochetkov V.N. Sorbent Production from Low_Ash Brown Coal. *Solid Fuel Chemistry*. 2016;50(2):115-119.
20. Баскаков А.П. Мацнев В.В., Располов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.

Authors Information

Loginov D.A. – Doctor of Engineering Sciences, Deputy Technical Director, Coal-engineering LLC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation, e-mail: LoginovDA@suek.ru

Islamov S.R. – Doctor of Engineering Sciences, Technical Director, Coal-engineering LLC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

Stepanov S.G. – Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department of Innovative Coal Processing Technologies, «SUEK-Krasnoyarsk» JSC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation, e-mail: StepanovSG@suek.ru

Chernykh A.P. – PhD (Engineering), Department Head, Coal-engineering LLC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation, e-mail: ChernykhAP@suek.ru

Evtushenko E.M. – General Director, «SUEK-Krasnoyarsk» JSC, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation, e-mail: EvtushenkoEM@suek.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 6.06.2024

Поступила после рецензирования: 16.06.2024

Принята к публикации: 25.06.2024

Paper info

Received June 6, 2024

Reviewed June 16, 2024

Accepted June 25, 2024