УДК 621.311

НАПРАВЛЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДА ЗОЛООТВАЛОВ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТЭС

Чернявский Н.В., Косячков А.В., Росколупа А.И.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

Вытеснение природного газа из топливной базы ТЭС требует его замещения твердым топливом. В условиях дефицита энергетических углей в качестве одного из дополнительных топлив целесообразно рассматривать углерод золоотвалов антрацитовых ТЭС. В статье рассмотрены свойства золоотвалов по содержанию и распределению в них углерода, способы его извлечения из золоотвалов и топливоподготовки для различных технологий сжигания.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие в энергетике Украины произошли существенные изменения. Во-первых, с внедрением современных нормативных документов по качеству и приемке угля для пылевидного сжигания [1] и прогрессивной шкалы скидок-надбавок по зольности и влажности [2] качество углей, поставляемых на ТЭС, существенно повысилось (рис.1). В частности, средняя зольность A^d на производство снизилась с более 31 % в 2005 г. до 24 % за первые 8 мес. 2010 г. [3], что соответствует повышению калорийности от 4900 до более, чем 5300 ккал/кг.

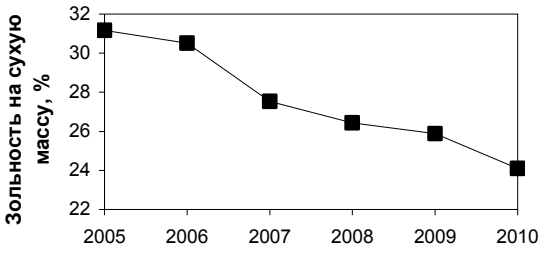

Рис.1 Изменение качества угля на ТЭС

Поскольку при таком качестве угля его сжигание в диапазоне нагрузки 80-100 % не требует газомазутной подсветки, появилась возможность снизить потребление газомазутного топлива от 25% в 2005 г. до 3-5 % в 2009-2010 гг. (рис.2). При общем годовом потреблении тепловыми электростанциями около 26 млн т у.т. это потребовало замещения около 5,5 млн т у.т. газа углем. Частично это было выполнено за счет переброски углей марки Г из коксования в энергетику (рис.3) с эквивалентной заменой в производстве кокса на импорт давальческим сырьем из России. Однако полностью проблему

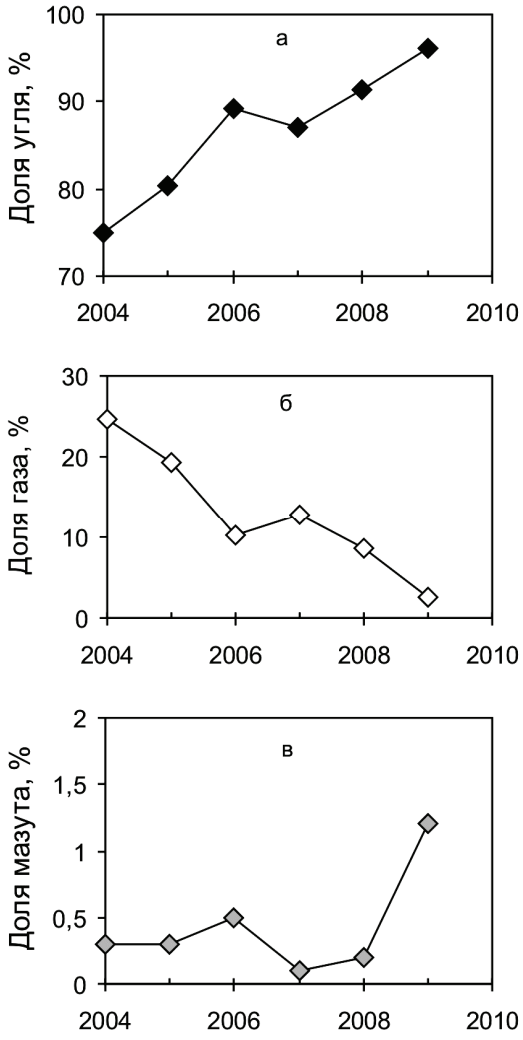

Рис.2 Изменение структуры топливной базы

дефицита твердого топлива для ТЭС это не решило.

С другой стороны, механический недожог при пылевидном сжигании антрацита предопределяет заметное содержание углерода в золе уноса антрацитовых ТЭС. По предварительным оценкам предыдущих исследований, в золоотвалах антрацитовых ТЭС накоплено более 120 млн т золового материала с содержанием углерода от 15 до 30 %, причем переполнение золоотвалов является серьезной проблемой [4]. Для того, чтобы углерод золотвалов использовать в качестве дополнительного топливного ресурса и в то же время приступить к решению проблемы их рекультивации, необходимо исследовать его свойства, характер распределения, разработать методы извлечения и технологии сжигания. Этим вопросам и посвящена данная статья.

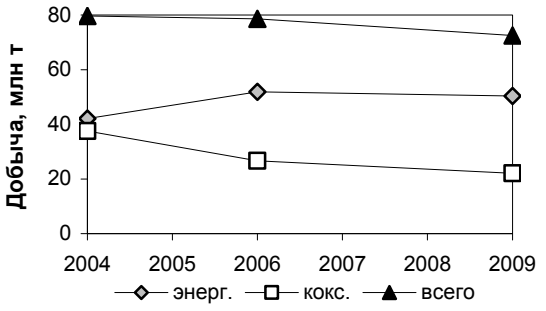

Рис.3 Изменение структуры добычи угля

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ЗОЛЕ АНТРАЦИТОВЫХ ТЭС

До 2000 г. доля углерода в уносе антрацитовых ТЭС составляла 17-23 %, а на наиболее изношенных котлах Луганской ТЭС достигала 47 % [5]. Как ни странно, с улучшением качества топлива и со снижением доли газа и мазута в топливной базе ТЭС содержание углерода в уносе мало изменилось. Однако это не означает, что эффективность сжигания топлива снизилась.

Во-первых, при расчете технико-экономических показателей мехнедожог относят ко всему топливу, хотя газ и мазут сгорают практически полностью, и только уголь – частично. Для оценки мехнедожога именно угля следует общий мехнедожог разделить на долю угля в топливной базе. Так, на Трипольской ТЭС за последние 10 лет мехнедожог практически не изменился. Однако поскольку доля газа и мазута снизилась от 51,3 до 7,3 %, мехнедожог в пересчете на уголь уменьшился почти вдвое (см. табл.).

ТЭС	Доля газа и мазута, %			Механический недожог q_4, %		
	1999	2005	2009	1999	2005	2009
Трипольская	51,3	28,8	7,3	7,0	9,4	6,9
Приднепровская	37,9	21,0	7,4	6,8	7,3	6,4
Змиевская	32,4	15,2	7,7	9,5	6,9	4,8
Старобешевская	13,4	14,4	5,9	13,5	11,9	6,5
Славянская	33,7	8,3	2,2	10,3	7,6	4,5
Луганская	23,5	2,7	1,7	35,1	4,9	4,4

ТЭС	Мехнедожог в пересчете на уголь, %			Содержание углерода в уносе, %		
	1999	2005	2009	1999	2005	2009
Трипольская	14,3	13,2	7,4	21,6	29,0	21,3
Приднепровская	11,0	9,2	6,9	17,4	20,4	21,7
Змиевская	14,1	8,1	5,2	21,3	17,6	19,2
Старобешевская	15,6	13,9	6,9	23,0	25,5	20,9
Славянская	15,6	8,3	4,6	23,0	18,0	15,7
Луганская	45,8	5,0	4,5	46,9	15,6	15,8

Во-вторых, при сжигании малозольного угля в унос попадает меньше золы, поэтому при одинаковом уровне мехнедожога зольность уноса будет ниже, и наоборот: снижение мехнедожога не обязательно означает снижение содержания углерода в уносе по сравнению с более высокозольным углем.

- Пример 1.

Антрацит с зольностью A^d = 30 % сжигается с мехнедожогом q_4 = 12 %. На 100 т сухого угля приходится 30 т золы, из которой 85 %, или 25,5 т, идет в унос. Из 70 т горючей массы в унос идет также около 12 % углерода, или 8,4 т. Доля углерода в уносе 8,4/(8,4+25,5) = 24,8 %.

- Пример 2.

Антрацит с зольностью Ad = 20 % сжигается с мехнедожогом q4 = 8 %. Расчет, аналогичный предыдущему, показывает, что в унос идет 17 т золы и 6,4 т углерода. Доля углерода в уносе 6,4/(6,4+17) = 27,4 %. Т.е. эффективность сжигания повысилась, но увеличилась и доля углерода в уносе.

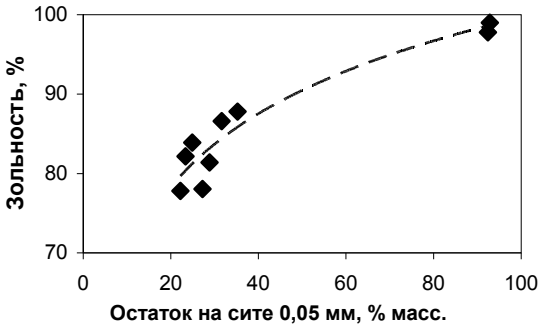

Рис.4 Зависимость зольности от размера частиц в золоотвале Трипольской ТЭС

Приведенные выкладки объясняют данные таблицы, где обобщены показатели антрацитовых ТЭС за последние 10 лет. Видно, что для всех без исключения ТЭС за счет повышения качества угля доля газа в топливной базе существенно снизилась, мехнедожог в пересчете на уголь – тоже, а доля углерода в уносе сохранилась на уровне около 20 %. При этом по ранее накопленным золоотвалам по содержанию углерода привлекательнее выглядят Славянская, Старобешевская и Луганская ТЭС, по накоплениям последнего десятилетия – Старобешевская, Трипольская и Приднепровская.

С учетом оцененного ранее объема золоотвалов 120 млн т [4] и среднего содержания углерода 20 %, можно говорить о наличии в золоотвалах более 24 млн т углерода, или до 27 млн т у.т. Этот углерод распределен по площади и глубине золоотвалов неравномерно. Дело в том, что по линиям гидрозолоудаления (ГЗУ) в отвал идет как зола уноса с размером частиц менее 100 мкм, так и более крупный дробленый шлак, в котором углерод практически отсутствует. Содержание углерода существенно выше в более мелких частицах уноса (рис.4). Частицы измельченного шлака осаждаются ближе к месту входа ГЗУ, частицы летучей золы осаждаются ближе к сливу осветленной воды.

ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДА ЗОЛООТВАЛОВ

Технологии утилизации материала золоотвалов можно объединить в следующие три группы:

- сырьевое использование;
- выделение углеродной компоненты с ее последующим сжиганием;
- использование как высокозольного топлива.

За рубежом материал золоотвалов активно используют в промышленности стройматериалов. В частности, при обжиге кирпича горение остаточного углерода позволяет экономить газ. Однако при слишком большой доле углерода заготовки вспучиваются и растрескиваются. Из-за этого допустимая доля углерода в золе, используемой для производства стройматериалов, обычно ограничена на уровне 5 %.

Первые попытки выделения углеродной компоненты из золы ТЭС относятся к концу 90-х годов, когда АО “Лекс” (Луганск) разработало технологию флотационного обогащения материала золоотвала Луганской ТЭС. Флотоконцентрат (ФК) – это коксозольный остаток пылевидного антрацита, из которого выжжены наиболее реакционноспособные компоненты, в том числе летучие, и сера. Роль летучих, которые определяют условия воспламенения угольной пыли в факеле, для ФК играют остатки флотоагента (тяжелых фракций нефти), содержание которых (V^d = 2,7%) сравнимо с выходом летучих антрацита (V^d = 2–6%). Более низкая, чем у антрацита, реакционная способность ФК компенсируется малым размером и большой удельной поверхностью частиц. В Институте угольных энерготехнологий было проведено сравнительное факельное сжигание ФК (A^d = 22,4%, W_t^r = 1,1%, $S_t^d \le$ 0,5%, R_{90} = 7%, R_{50} = 24%), и пылевидного высокозольного антрацитового штыба (АШ) (A^d = 36,1%, W_t^r = 1,0%, S_t^d = 2,1%, R_{90} = 10%, R_{50} = 42%) на опытной установке ВГП-100В производительностью по углю до 100 кг/ч [6]. Результаты показали, что при прочих равных условиях стабильное факельное сжигание ФК требует в 2–2,5 раза меньшую тепловую долю подсветки, чем АШ, при в 1,3–1,4 раза большей степени выгорания углерода, в 5–6 раз более низких выбросах SO_2 и сравнимых выбросах оксидов азота. Однако попытки факельного сжигания ФК на Луганской ТЭС привели к негативному результату. Это было связано с малым размером частиц ФК: при $W_i^r \le$ 1,5 % его можно было бы подавать сразу в бункер пыли, но возникали проблемы с пылением при его транспортировке и разгрузке, а содержание влаги W_i^r = 5–10%, при котором пыление отсутствует, вынуждало сушить ФК в ШБМ, где он ощутимо мешал размолу антрацита. В настоящее время известны удачные попытки извлечения углеродной компоненты с помощью тканевых вибросит с размером отверстий около 50 мкм, через которые пропускают золовую пульпу. Следует отметить, что эта процедура связана с добавкой воды в материал золоотвала с исходной влажностью 15-25%. Гранулирование или брикетирование получаемого малозольного топлива для последующего сжигания в котлах или в бытовых печах с неподвижным слоем связано с большими энергозатратами на его сушку, что делает себестоимость продукта не меньшей, чем стоимость сортовых углей. Факельное сжигание получаемого топлива возможно, по-видимому, только с подачей в виде водоугольной суспензии, что с учетом его низкой реакционной способности и выхода летучих веществ требует разработки специальных горелочных и топочных устройств.

Использование материала золоотвалов как топлива с зольностью до 80% возможно с применением малочувствительной к зольности технологии сжигания в ЦКС. Однако здесь существуют ограничения, связанные с размером топливных частиц: в топливе для ЦКС должны содержаться частицы с размером 1-3 мм для формирования кипящего слоя и 0,1-1 мм для формирования циркулирующего потока, а доля плохо улавливаемых циклонами частиц < 0,1 мм должна быть ограничена. Поисковые исследования в Институте угольных энерготехнологий показали,

что при совместном сжигании в ЦКС с дробленым антрацитом пылевидный материал золоотвалов в основном пролетает топку, не участвуя в горении. Поэтому последующая отработка способов сжигания в ЦКС включала и топливоподготовку с агломерацией материала золоотвалов [4, 7].

ОПЫТНОЕ СЖИГАНИЕ МАТЕРИАЛА ЗОЛООТВАЛОВ И ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ В ЦКС

Исследования по сжиганию в ЦКС высокозольных антрацитовых шламов, которые по содержанию влаги (18–22%), зольности (50–60%) и размеру частиц ($R_{90} \le 10\%$) близки к материалу золоотвалов антрацитовых ТЭС, показали, что при сушке шламов происходит агломерация частиц за счет естественной глинистой компоненты, а при обжиге в топке ЦКС агломераты упрочняются [8]. Антрацитовые шламы, агломерированные до размера 0–5 мм ($R_{90}\ge80\%$), сжигаются в ЦКС не хуже, чем высокозольный АШ. При высыхании порозность агломерированных частиц растет более чем в полтора раза по сравнению с антрацитовыми частицами такого же размера. Пористые агломераты по способности выноса из слоя и удельной скорости горения отвечают частицам антрацита вдвое меньшего размера [9], из этих соображений для агломерированного материала золоотвалов был выбран максимальный размер частиц 7 мм. Поскольку связующие свойства зольной части материала золоотвалов недостаточны, для улучшения агломерирующих свойств использовалось его смешивание с антрацитовым шламом.

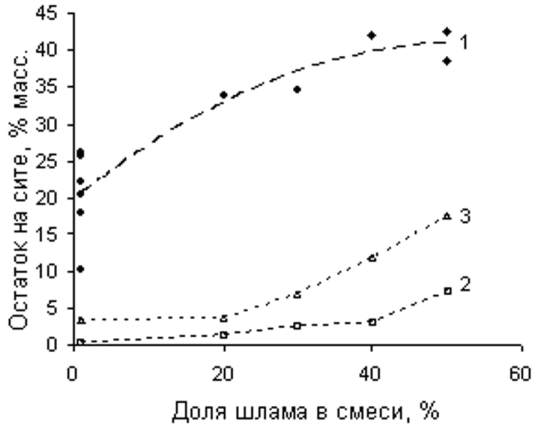

Рис.5 Зависимость остатка агломератов на ситах от доли шлама в смеси с золой

Здесь, 1 – ручной, 2, 3 – стандартный рассев; размер сит, мм: 1 – 2,5, 2 – 1,0, 3 – 0,4

Для проведения опытного сжигания были отобраны такие образцы зольного материала:

- Трипольская ТЭС: материал золоотвала Ad = 77,8%, Wtr = 18,9%, R90 = 16,8%, летучая зола из электрофильтра Ad = 75,3%, Wtr = 2,6%, R90 = 4,3%;
- Приднепровская ТЭС: материал золоотвала Ad = 81,4 %, Wtr = 20,1 %, R90 = 14,6 %.

В качестве вспомогательных топлив использовались АШ Трипольской ТЭС (A^d = 27,6 %, W_t^r = 4,7 %) и высокозольный антрацитовый шлам Комендантской ЦОФ (A^d = 52,3 %, W_t^r = 16,1 %, R_{90} = 8,5 %). Для агломерирования влажный материал золоотвала или увлажненная летучая зола просеивались через сито 7 мм и подвергались естественно-воздушной сушке до сыпучего состояния (влажность 6-8 %). Так же готовились смеси золового материала со шламом. При смешивании золы из электрофильтра со шламом сушки не требовалось, поскольку зола вбирала

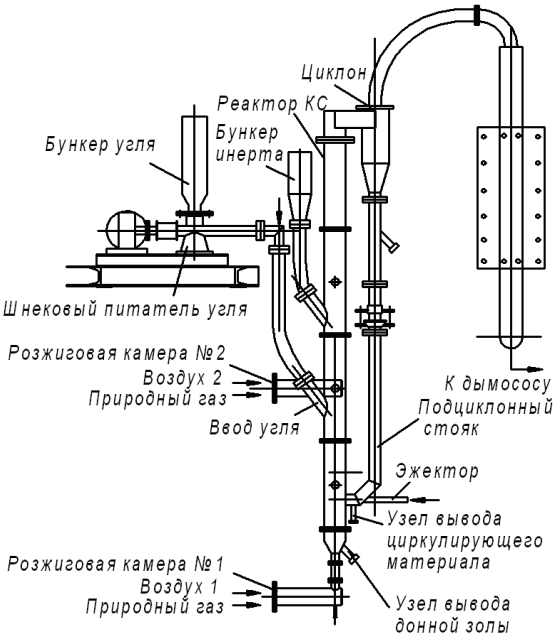

Рис.6 Схема установки ЦКС-0,02

избыточную влагу шлама. Кроме стандартного сухого рассева, при котором часть агломератов разрушалась, для гранулометрического анализа топлива был применен ручной рассев на сите 2,5 мм в течение 1 мин., при котором крупные агломераты не успевали разрушаться. Результаты по обоим методам рассева (рис.5) свидетельствуют, что добавление шлама заметно способствует агломерации и упрочнению частиц, начиная с его массовой доли 30%.

Опытное сжигание выполнялось на установке ЦКС-0,02 (рис.6) производительностью до 20 кг/ч угля [4, 7, 8]. В ее состав входят топка кипящего слоя, оснащенная системой подачи угля, стартового инертного материала и розжиговыми газовыми горелками, циклон, тракт циркуляции, газоохладитель. Высота топки - 2,9 м, внутренний

диаметр – 0,1 м. Вывод золы слоя осуществляется сливным устройством над решеткой. Оксиды серы связываются известняком, подаваемым в топку.

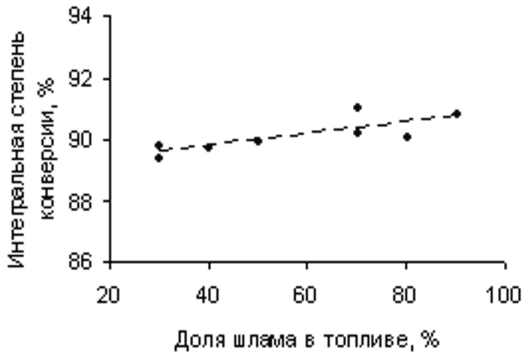

Рис.7 Зависимость степени конверсии топлива от доли шлама в топливе

В опытах среднетопочная температура поддерживалась на уровне 900–920 °С, скорость газа в верхней части топки – 5,8–6,0 м/с, отношение расходов первичного воздуха к вторичному – 4:1, а содержание кислорода в дымовых газах – 3,6–4,0 %. Принципиальной разницы при сжигании материала золоотвала и золы из электрофильтра не отмечено. Во всех опытах зола накапливалась в слое, циркуляция была стабильной, зольность выводимого донного материала превышала 95%, что позволяет использовать его как сырье для промышленности стройматериалов. Выбросы оксидов серы в пересчете на 6% O_2 составляли 230–370 мг/нм^3, оксидов азота – 180–275 мг/нм^3. Достигнута степень конверсии топлива 89,4–91,0 %, что близко к такому же показателю для АШ и антрацитового шлама. Следует отметить рост степени конверсии от доли шлама в топливе (рис.7), что можно объяснить увеличением способности топлива к агломерации, как следствие – ростом содержания в топливе крупных частиц, выхода донной золы и уменьшением уноса. При доле шлама в топливе около 50 % (зольность смеси 64 %) добавка в топливо АШ для поддержания горения не требовалась.

Аналогичные исследования были выполнены в Институте угольных энерготехнологий с материалом золоотвала Луганской ТЭС (A^d = 80,8 %, W_t^r = 8,2 %, $S_t^d \le$ 0,4 %). Однако здесь, исходя из условий ООО «Востокэнерго», в качестве агломерирующей добавки был выбран не антрацитовый, а каменноугольный шлам (A^d = 53,0 %, W_t^r = 10,4 %, S_t^d = 2,6 %, V^d = 18,7 %).

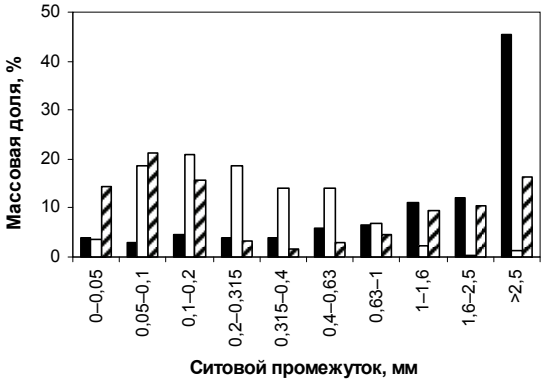

Рис.8 Результаты ситового анализа исходных топлив: АШ (сплошные), шлама (прозрачные) и золы (косая штриховка)

Ситовой анализ материала золоотвала (рис.8) показал два максимума, т.е. наличие примеси дробленого шлака. Простым отсевом на сите 1 мм зольность материала золоотвала удалось снизить до A^d = 72,4 %. При топливоподготовке зола и шлам смешивались примерно поровну, зольность смеси составляла A^d = 65,5 %. Опыты показали, что без добавки шлама сжигание золы возможно только совместно с антрацитом (доля последнего – не менее 60 %, для достижения степени конверсии топлива 90 % - не менее 80 %). Для смеси золы со шламом устойчивое сжигание в ЦКС достигалось даже без добавки антрацита, а степень конверсии топлива 90 % - при доле антрацита 60 %.

ВЫВОДЫ

За последнее десятилетие доля углерода в летучей золе антрацитовых ТЭС изменилась несущественно. Летучая зола с долей углерода более 20 %, которой в золотвалах антрацитовых ТЭС накоплено более 120 млн т, может рассматриваться как дополнительное энергетическое топливо. Наиболее перспективной технологией ее утилизации выглядит сжигание в ЦКС с добавкой шлама для повышения агломерирующей способности, оптимальным способом выемки – сухая выемка с отсевом на ситах 1 мм, топливоподготовки – перемешивание со шламом с последующим просевом через сито 5-7 мм. Технологические и экологические показатели сжигания такой смеси в ЦКС близки к сжиганию антрацита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормативная база по качеству угля для сжигания на ТЭС Украины / Чернявский Н.В., Скляр П.Т., Филиппенко Ю.Н. и др. // Тез.докл. 3-й научн.-практ. конф. “Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития” (14-18.09.2006, Алушта).– Алушта: НПВК «ТРИАКОН», 2006. – С.57-60.
2. Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В., Стегний Н.Г. Техническое обоснование нормативных требований к качеству энергетических углей и ценовая шкала как средство их обеспечения // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. - №6. – С.3-8.
3. Сердюк С.Д., Стегний Н.Г., Чернявский Н.В. Особенности работы ТЭС Украины в современных условиях топливно-энергетического рынка // В сб.: Современная наука. – 2010. - №1(3). – С.35-37.
4. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В. и др. Сжигание углеродсодержащей золы уноса антрацитовых ТЭС в кипящем слое // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. - №1. – С.3-12.
5. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю, Чернявский Н.В., Яцкевич С.В. Направления реконструкции пылеугольных ТЭС Украины // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 1997. - №5. - С. 3-13.
6. Чернявский Н.В., Дулиенко С.Г. Сопоставительное исследование особенностей факельного сжигания высокозольного антрацита и антрацитового флотоконцентрата // Энергетика и электрификация. - 2000. - №10. - С.2-7.
7. Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В., Провалов А.Ю. и др. Извлечение и сжигание топливной компоненты из углеродсодержащей золы уноса ТЭС // Тез.докл. 4-й научн.-практ. конф. “Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития” (18-21.09.2008, Алушта). – С.119-122.
8. Технологічні, екологічні та економічні аспекти використання відходів вуглезбагачення для спалювання на ТЕС / М.В.Чернявський, Н.І.Дунаєвська, І.Л.Голенко, О.Ю.Провалов // Энергетика и электрификация. – 2002. - №7. – С.19-26.
9. Чернявский Н.В., Провалов А.Ю. Унификация свойств твердых топлив для сжигания в ЦКС // Тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф. «Энергоэффективность – 2007» (15-17.10.2007, г.Киев). – К.: ИГ НАН Украины, 2007. – С.33-34.