

**Чернявский Н.В.**, канд. техн. наук, **Рохман Б.Б.**, докт. техн. наук,  
**Провалов А.Ю.**, канд. техн. наук, **Косячков А.В.**, канд. техн. наук  
**Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев**  
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: mchernyavski@yandex.com

## Опыт сжигания импортных углей в котлоагрегатах ТЭС и ТЭЦ

Рассмотрен сегмент низкорекреационных углей на мировом рынке. Показано, что основными потенциальными поставщиками таких углей могут быть только ЮАР и Кузнецкий бассейн России. Угли этих месторождений относятся к марке Т и отличаются повышенными температурами плавкости золы, что создает проблемы для организации устойчивого жидкого шлакоудаления в котлах ТЭС. Дополнительной проблемой для котлов ТЭЦ, рассчитанных на сжигание антрацита, стала необходимость адаптации их пылесистем к повышенному выходу летучих веществ тощих углей. Для решения этих проблем были разработаны технические решения по обеспечению безопасной эксплуатации пылесистем, разработан метод поверочного позонного теплового расчета котлоагрегатов и выполнены численные исследования с целью оценки необходимого уровня калорийности угля и коэффициента избытка воздуха для обеспечения необходимых температур жидкого шлака в нижней части топки, отсутствия шлакования ширм и перегрева экранов топки. Приведены ход и результаты испытаний, выполненных при участии Института угольных энерготехнологий, на котлах Трипольской и Змиевской ТЭС (уголь ЮАР), Дарницкой, Черниговской и Сумской ТЭЦ (кузнецкий тощий уголь), что обеспечило этим электростанциям прохождение зимнего сезона 2014–2015 гг. На основании полученных результатов предложены критерии пригодности импортных углей для сжигания в котлоагрегатах ТЭС и ТЭЦ Украины, практически используемые при заключении контрактов. *Библ. 6, рис. 3, табл. 4.*

**Ключевые слова:** антрацит, тощий уголь, выход летучих веществ, температура плавкости золы, калорийность, пылевидное сжигание, жидкое шлакоудаление, котлоагрегат, пылесистема.

Тепловые электростанции составляют важнейшую часть энергосистемы Украины. До 2014 г. они давали 42–44 % общего производства электроэнергии, причем благодаря повышению добычи угля и качества угольной продукции после 2008 г. ТЭС практически не использовали газ и мазут. Поскольку отечественные АЭС работают только на базовой нагрузке, а мощности ГЭС и ГАЭС сравнительно невелики, тепловые электростанции являются также основным инструментом регулирования графика энергопотребления.

Из 14 ТЭС Украины 7 спроектированы для сжигания углей газовой группы (марок Д, ДГ, Г), 7 — для сжигания угля марок А (антрацит) и Т (тощий) (табл. 1, 2). Котлами для сжигания антрацита оснащены 5 из 7 угольных ТЭЦ. В 2012–2013 гг. годовое потребление ТЭС и ТЭЦ по углям газовой группы достигло 22,5 млн т, по антрациту и тощему углю — 20,3 млн т. Примерно так же соотносилась добыча рядовых

углей этих групп — 31,1 и 29,0 млн т соответственно [1].

В 2014 г. часть шахт на Донбассе, добывающих угли газовой группы, и все шахты, добывающие угли марок А и Т, оказались на временно неконтролируемой территории. Вследствие этого поставки углей газовой группы снизились до 18,6 млн т, антрацита и тощего угля — до 10,3 млн т, из которых большая часть была поставлена в первом полугодии. К августу склады ТЭЦ и государственных ТЭС (Трипольской и Змиевской ПАО «Центрэнерго»), сжигающих угли марок А и Т, практически опустели. В качестве альтернативы донецким антрацитам и тощим углям правительством были анонсированы закупки этих марок углей на мировом рынке.

Однако поскольку с переходом на более эффективные и экологически чистые технологии пылевидного сжигания с твердым шлакоудалением развитые страны начали использовать в основном угли газовой группы, уже бо-

лее 25 лет сегмент энергетического угля марок А и Т на мировом рынке не превышает 5–10 %. Этот уголь добывается либо для внутреннего использования (США, Китай), либо для снабжения ближайших соседей (Вьетнам для Китая). Вследствие этого потенциальными крупными поставщиками угля этих марок остались только Россия (Кузбасс) и ЮАР [2].

В порядке подготовки к зимнему сезону 2014–2015 гг. компаниям-владельцам Дарницкой, Черниговской и Сумской ТЭЦ удалось заключить контракты на поставку нескольких сот тысяч тонн кузнецких тощих углей. Для Трипольской и Змиевской ТЭС ПАО «Центрэнерго» правительство экстренно распорядилось о закупке 0,5 млн т тощих углей в ЮАР. Срочность закупки не гарантировала надлежащего качества в необходимом объеме поставок.

Уже после заключения сделок выяснилось, что по ряду технологических показателей поставляемые топлива (табл.3) не соответствуют проектным требованиям котлоагрегатов, предназначенных для их сжигания. Так, для котлов Дарницкой, Черниговской, Сумской ТЭЦ проектным топливом является антрацит, соответственно пылесистемы котлов рассчитаны на выход летучих веществ не более 8 %. Проектное топливо Трипольской и Змиевской ТЭС – донецкие антрацит и тощий уголь с выходом летучих веществ до 18 %, с низшей теплотой сгорания на рабочую массу (калорийностью) 6000–6500 ккал/кг (согласно ДСТУ 4083:2012 «Вугілля кам'яне та антрацит для пилвовидного спалювання на теплових електростанціях. Технічні умови», стабильные условия сжигания углей этих марок без подсветки факела газом

или мазутом обеспечиваются при калорийности не менее 5400 ккал/кг), средним значением температуры растекания золы  $t_C = 1270$  С. Кузнецкий тощий уголь, поставленный на перечисленные ТЭЦ, отличается средним выходом летучих веществ около 15 %. Тощие угли ЮАР, поставленные на Трипольскую и Змиевскую ТЭС первыми тремя суднами, имели среднюю калорийность 5200 ккал/кг, в некоторых вагонах с первого судна при контрольном опробовании на приходе ТЭС отмечалась калорийность ниже 4800 ккал/кг. Кроме того, и кузнецкие угли, и угли ЮАР имеют повышенные температуры  $t_C$ .

Согласно ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила», котлы ТЭС могут быть переведены на сжигание непроектных топлив, топлив ухудшенного качества или смесей топлив при условии проработки и реализации режимных или конструкторских мероприятий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию пылесистем, условия устойчивого горения и жидкого шлакоудаления (ЖШУ), а также полноту выгорания топлива. Ниже будет раскрыта суть этих мероприятий, разработанных и внедренных на ТЭС и ТЭЦ при участии Института угольных энерготехнологий НАН Украины (ИУЭ НАНУ), и изложены результаты сжигания импортных углей в зимний сезон 2014–2015 гг.

Для Дарницкой, Черниговской, Сумской ТЭЦ первым в ряду необходимых мероприятий являлось приведение пылесистем к возможности использования углей с выходом летучих веществ до 15 % [3]. Принципиальная схема пылесистем котлов этих ТЭЦ (рис.1) включает

**Таблица 1. Угольные ТЭС Украины и среднее потребление угля в 2012–2013 гг.**

Генерирующая компания	ТЭС	Марка угля	Мощность угольных энергоблоков, МВт	Котлоагрегаты	Годовое потребление угля, млн т
ПАО «Центрэнерго»	Трипольская	А, Т	4 × 300	ТПП-210А	2,2
ПАО «Центрэнерго»	Змиевская	А, Т	6 × 200; 4 × 300	ТП-100; ТПП-210	3,2
ПАО «Центрэнерго»	Угледгорская	Г, ДГ	4 × 300	ТПП-312	2,7
ПАО «Донбассэнерго»	Старобешевская	А, Т	10 × 200	ТП-100	3,7
ПАО «Донбассэнерго»	Славянская	А, Т	1 × 800	ТПП-200-1	1,2
ООО «ДТЭК Востокэнерго»	Луганская	А, Т	8 × 200	ТП-100	2,4
ООО «ДТЭК Востокэнерго»	Кураховская	Г, ДГ	7 × 210	ТП-109	3,8
ООО «ДТЭК Востокэнерго»	Зуевская	Г, ДГ	4 × 300	ТПП-312А	3,1
ПАО «ДТЭК Днепрэнерго»	Приднепровская	А, Т	4 × 150; 4 × 300	ТП-90; ТПП-210	1,9
ПАО «ДТЭК Днепрэнерго»	Криворожская	Т	10 × 300	П-50; ТПП-210А	3,2
ПАО «ДТЭК Днепрэнерго»	Запорожская	Г, ДГ	4 × 300	ТПП-312А	2,6
ПАО «ДТЭК Западэнерго»	Ладыжинская	Г, ДГ	6 × 300	ТПП-312	2,8
ПАО «ДТЭК Западэнерго»	Доброворская	Г, ДГ	2 × 150	ТП-92	1,0
ПАО «ДТЭК Западэнерго»	Бурштынская	Г, ДГ	12 × 200	ТП-100	4,8

Таблица 2. Угольные ТЭЦ Украины и среднее потребление угля в 2012–2013 гг.

Генерирующая компания	ТЭЦ	Марка угля	Паропроизводительность угольных котлов, т/ч	Котлоагрегаты	Годовое потребление угля, млн т
ООО «Евро-Реконструкция»	Дарницкая	А	5 × 220	ТП-15; ТП-47	0,7
ООО «Технова»	Черниговская	А	4 × 210	БКЗ-210-140ПТ	0,5
ООО «Сумы-теплоэнерго»	Сумская	А	3 × 87	ЦКТИ-87-39-Ф2М	0,2
ООО «Контурглобал Солуш Украина»	Краматорская	А	4 × 160	БКЗ-160-100 ПТ	0,4
ООО «ДВ нефтегазодобывающая компания»	ТЭЦ-2 Эсхар	А	3 × 230	67-2 СП	0,4
ГП «Укринтерэнерго»	Калушская	Г, ДГ	4 × 420	ТП-87	1,0
ПАО «Черкасское химволокно»	Черкасская	Г, ДГ	4 × 220	БКЗ-220-110ГЦ	0,6
ПАО «Донецкоблэнерго»	Мироновская	А	2 × 230	ТП-230-2	0,3
		Г, ДГ	1 × 230	ТП-230-3	0,1

шаробарабанную мельницу (ШБМ); сепаратор, который возвращает мелкую пыль на домол; циклон, который улавливает основную часть готовой пыли и сыплет ее в промежуточный бункер; мельничные вентиляторы (МВ), который направляет отработанный слабозапыленный сушильный агент в сбросные горелки. Сушильным агентом является часть горячего воздуха. Другая часть горячего воздуха подхватывает пыль с питателей, установленных в нижней

части промежуточного бункера, и подает ее в основные горелки. Для проектного топлива, антрацита, в силу его низкой реакционной способности температура аэросмеси за мельницей и перед горелками не ограничивается, специальные средства пожаротушения пыли не предусматриваются.

Для тощих углей с выходом летучих веществ до 18 % появляется риск самовозгорания пыли в пылесистеме, в особенности на участках с повышенной концентрацией пыли или с опасностью ее залегания. В связи с этим, согласно требованиям РД 34.03.352-89 «Правила взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива», на ТЭЦ были созданы системы контроля температуры и пожаротушения углекислым газом на бункерах угольной пыли, аварийного паротушения на бункерах пыли и ШБМ, увеличен расход первичного воздуха для исключения залегания пыли в пылепроводах, внедрены системы присадки холодного воздуха для ограничения верхнего предела температуры на выходе мельницы до 130 °С при постоянной работе и при «выхолащивании» (останове с последующей вентиляцией), системы аварийного опорожнения бункеров пыли, а также ряд необходимых средств измерений, защит и блокировок. Кроме того, была осуществлена перепланировка угольных складов для обеспечения раздельного хранения и шихтования антрацита и тощего угля. Эти мероприятия при испытаниях доказали свою эффективность: в случаях роста температуры пыли в бункере после останова котла с неполностью сработанной пылью проблема успешно разрешалась подачей в бункер углекислого газа.

Не менее важным мероприятием при переводе существующих котлов на топливо с повышенной температурой плавкости золы является обеспечение температурных условий в нижней части топки, достаточных для устойчивого ЖШУ. Об-

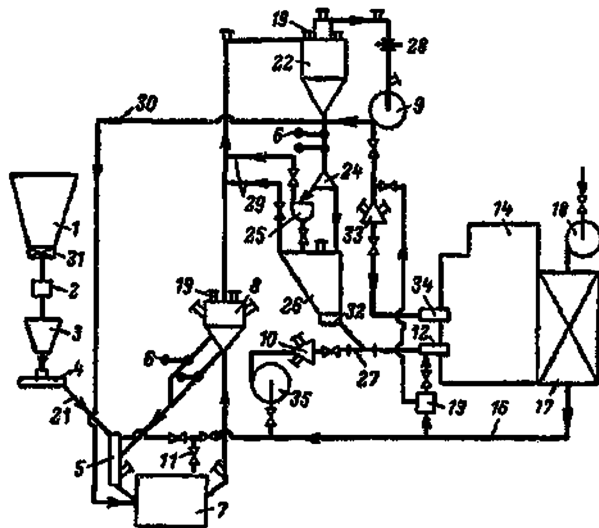


Рис.1. Индивидуальная замкнутая схема пылеприготовления с ШБМ, промбункером и с сушильным агентом – воздухом, применяемая для углей марок А и Т: 1 – бункер угля; 2 – весы; 3 – весовой бункер; 4 – питатель сырого угля; 5 – устройство для нисходящей сушки; 6 – мигалка; 7 – ШБМ; 8 – сепаратор; 9 – МВ; 10 – короб первичного воздуха; 11 – клапан присадки холодного воздуха; 12 – горелка основная; 13 – короб вторичного воздуха; 14 – котел; 16 – воздуховод горячей воздуха; 17 – воздухоподогреватель; 18 – дутьевой вентилятор; 19 – взрывной клапан; 21 – течка сырого угля; 22 – циклон; 24 – перекидной шибер; 25 – шнек; 26 – бункер пыли; 27 – смеситель; 28 – измерительная шайба; 29 – трубопровод влагоотсоса; 30 – трубопровод рециркуляции; 31 – отсечной шибер; 32 – питатель пыли; 33 – короб сбросного воздуха; 34 – сбросная горелка; 35 – вентилятор горячего воздуха.

**Таблица 3. Характеристики импортных углей марки Т, поставлявшихся на ТЭС и ТЭЦ Украины в конце 2014 г.**

Характеристики	Кузнецкий уголь (РФ)	Уголь ЮАР, в среднем	
		по первым 3 судам	по всем 5 судам
Влага общая $W_{тг}$ , %	5,1	7,3	7,3
Зольность на сухую массу $A_d$ , %	19,3	28,4	26,9
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу $V_{daf}$ , %	15,2	13,7	12,5
Сера общая на сухую массу $S_{тd}$ , %	0,31	1,4	1,4
Низшая теплота сгорания на рабочую массу $Q_{тг}$ , ккал/кг	6260	5200	5380
Температура растекания золы в окислительной среде $t_c$ , °C	1557	1530	1534
Коэффициент размоловоспособности по ВТИ $K_{л0}$	1,41	1,12	1,12

щие особенности установленных на этих ТЭЦ устаревших и изношенных котлоагрегатов ТП-15, ТП-47, БКЗ-210-140 ПТ, ЦКТИ-87-39-Ф2М, которые усложняют условия жидкого шлакоудаления и требуют для их поддержания газовой подсветки факела, такие [3]:

- недостаточная высота топки и (кроме БКЗ-210-140 ПТ) отсутствие пережима, что снижает тепловое напряжение топочного объема, уменьшает полноту выгорания пыли и увеличивает механический недожог;
- недостаточная температура первичного воздуха (менее 340 °C);
- устаревшая конструкция горелок (отсутствие вихревой эжекции дымовых газов к корню факела), что усложняет воспламенение пыли, и сброс отработанного сушильного агента (влажно-

го воздуха) в нижние секции основных горелок; – значительные присосы холодного воздуха в топку.

Блоки 200 МВт Змиевской ТЭС оснащены котлоагрегатами ТП-100, блоки 300 МВт – котлоагрегатами ТПП-210, блоки 300 МВт Трипольской ТЭС – котлоагрегатами ТПП-210А. По техническому состоянию, меньшему уровню присосов холодного воздуха, более высокой температуре горячего воздуха, наличию вихревых горелок и расположению сбросных горелок на более высоком уровне, чем основные, эти котлы обеспечивают более благоприятные условия ЖШУ, в особенности котлы ТПП-210, ТПП-210А с пережимом в средней части топки. На этих котлах при сжигании штатного топлива газовая подсветка не требуется.

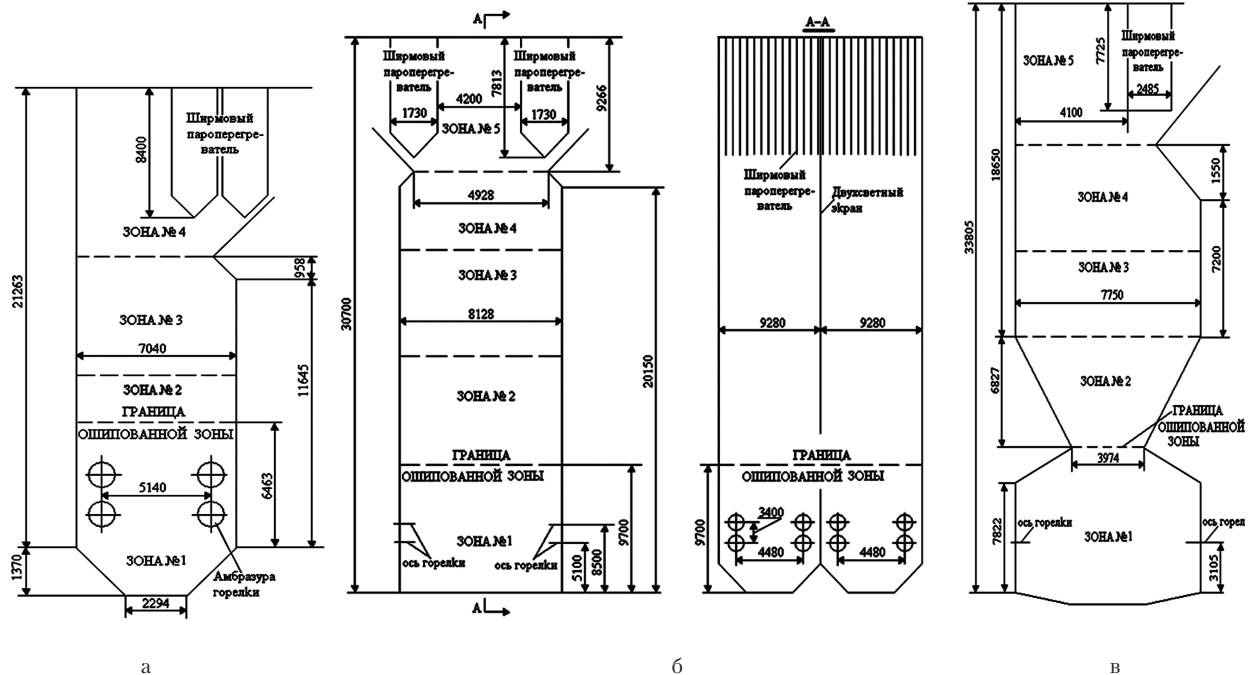


Рис.2. Схемы топочных камер котлоагрегатов ТП-47 (а), ТП-100 (б), ТПП-210А (в) и разбивка их на зоны для поверочного позионного теплового расчета.

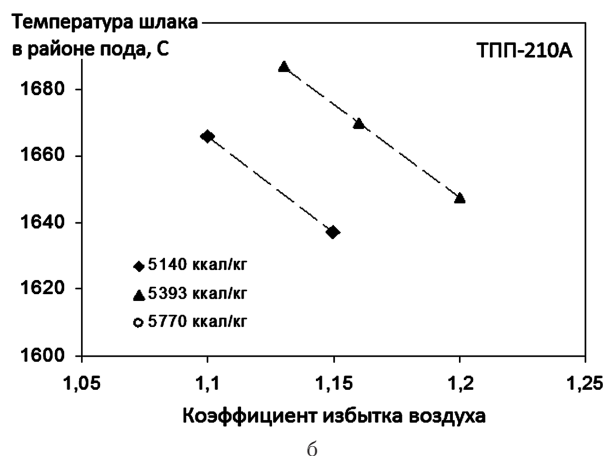
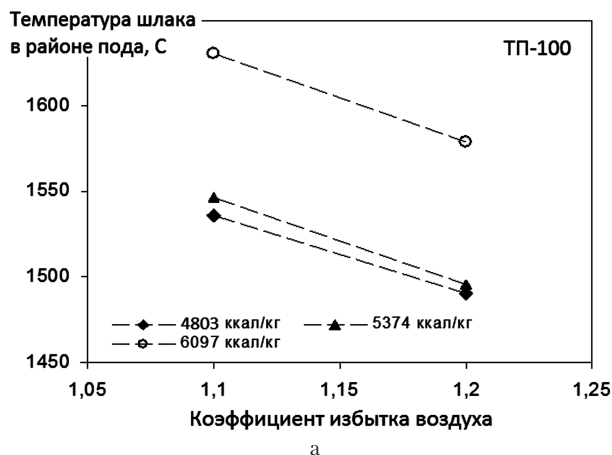


Рис.3. Основные результаты поверочного позонного теплового расчета топок котлоагрегатов ТЭС: а – ТП-100, б – ТПП-210А.

Поверочный позонный тепловой расчет топочных камер перечисленных котлов на кузнецкий и южноафриканский тощий уголь, а также на смеси кузнецкого тощего угля с донецким антрацитом выполнялся по специально разработанной программе с использованием методических рекомендаций [4] с целью обеспечения:

- условий ЖШУ (на котлах ТЭЦ – с минимальной подсветкой, ТЭС – без подсветки);
- паспортного уровня теплосъема в топке и температуры газов на выходе топки для предотвращения шлакования экранов;
- безопасного рабочего диапазона температур стенок экранных труб.

В основу расчета температуры газов по высоте топки положено уравнение, которое определяет связь между тепловыделением и теплообменом в отдельных зонах топочной камеры. Для расчета распределения тепловых нагрузок, температуры газов и отложений на стенках по высоте топка условно разбивается на зоны, как показано на рис.2. Зона расположения горелок рассчитывается как одно целое. За ее границу

принимается горизонтальная плоскость между ошпированными и гладкотрубными экранами. В расчете, согласно рекомендациям [5], температура начала истинно жидкого состояния шлака принята на 100 °С выше температуры плавления золы  $t_C$ . Температура газов в каждой из зон рассчитывается, исходя из тепловыделения в зоне, изменения энтальпии продуктов сгорания и теплоотвода из зоны. Критерием корректности расчета было совпадение профиля температуры факела проектного топлива по высоте топки с паспортными данными котлоагрегата.

Исходные данные для расчета топок ТЭС и ТЭЦ существенно различались. К началу отопительного сезона на складах ТЭЦ, кроме кузнецкого тощего угля с тугоплавкой золой, оставался донецкий антрацит (штыб – АШ) с менее тугоплавкой золой, поэтому в вариантах расчета варьировалась доля кузнецкого угля в смеси с донецким антрацитом. Расчетные исследования применительно к котлоагрегатам Дарницкой, Черниговской и Сумской ТЭЦ производительностью 87–220 т/ч с вариацией соотношения донецкого АШ ( $Q_{i^r} = 5700$  ккал/кг,  $t_C = 1360$  °С) и кузнецкого тощего угля ( $Q_{i^r} = 6200$  ккал/кг,  $t_C = 1560$  °С) показали, что при сжигании донецкого АШ температура шлака в районе пода меньше температуры нормального ЖШУ, что требует газовой подсветки в объеме примерно 10 % по теплу для поддержания температурного режима ЖШУ. При сжигании угольных смесей температура факела возрастает; температура шлака в районе пода меньше, чем нормального ЖШУ кузнецкого тощего угля, но больше, чем нормального ЖШУ донецкого АШ, что позволяет рассчитывать на стабильное ЖШУ с меньшим в 1,5–2 раза уровнем подсветки за счет более легкоплавкого шлака АШ. При сжигании кузнецкого тощего угля возрастание температуры факела не компенсирует повышенную тугоплавкость золы, что требует восстановления уровня газовой подсветки для поддержания температурного режима ЖШУ. Для всех топлив температура топочных газов не превышает точки шлакования ширм, температура стенок экранных труб не выходит за пределы безопасного рабочего диапазона.

На складах Змиевской и Трипольской ТЭС к моменту поступления угля ЮАР донецких углей не было, имелось незначительное количество кузнецкого тощего угля также с тугоплавкой золой, поэтому в расчетных исследованиях принималась  $t_C = 1360$  °С. Было установлено, что сжигание углей с тугоплавкой золой требует повышения температуры пылеугольного факела

для поддержания режима ЖШУ. По расчетам, необходимая температура факела при пылевидном сжигании без подсветки на номинальной нагрузке при избытке воздуха 1,15 достигается в топках открытого типа (ТП-100) при калорийности более 5300–5350 ккал/кг, полуоткрытого (ТПП-210, ТПП-210А) — более 5200 ккал/кг (рис.3).

В указанном режиме для всех топлив температура топочных газов не превышает точки шлакования ширм, температура стенок экранных труб не выходит за пределы безопасного рабочего диапазона. Снижение избытка воздуха до менее 1,15 нецелесообразно из-за повышения чувствительности топки к перераспределению воздуха между основными и сбросными горелками при включении-выключении мельниц. При меньшей калорийности угля его следует шихтовать с более калорийным топливом. Процедура шихтования была ранее отработана на угольных складах ТЭС, в том числе с участием ИУЭ НАНУ [6].

Испытания по сжиганию кузнецкого тощего угля и его смесей с донецким АШ на Дарницкой и Сумской ТЭС были выполнены ИУЭ НАНУ, персоналом ТЭЦ и специализированной пуско-наладочной организацией ЧАО «Техэнерго» с 27 октября по 9 ноября 2014 г. Испытания прошли безаварийно, результаты полностью подтвердили данные численных исследований. В диапазоне доли АШ от 25 до 33 % было достигнуто наибольшее снижение расхода газа на подсветку при сохранении устойчивого ЖШУ — на 35–50 % по сравнению со сжиганием АШ.

На Черниговскую ТЭС, кроме кузнецкого тощего угля, был поставлен сибирский антрацит Горловского месторождения с выходом летучих веществ менее 3 % и также с тугоплавкой золой. Попытки его сжигания в чистом виде потребовали увеличения газовой подсветки до 11–12 % по теплу и сопровождалась механическим недожогом до 20 %. При сжигании смеси 75 % сибирского антрацита и 25 % кузнецкого тощего угля уровень подсветки удалось снизить до 5–6 % по теплу, механический недожог — до менее 10 %. Результаты показали нежелательность поставок антрацита с выходом летучих веществ менее 3 %.

По результатам испытаний ЧАО «Техэнерго» были разработаны режимные карты, по которым кузнецкий тощий уголь в смеси с донецким АШ и сибирским антрацитом успешно сжигался до конца отопительного сезона.

Испытания по сжиганию угля ЮАР и его смесей с кузнецким тощим углем на Змиевской ТЭС выполнялись ИУЭ НАНУ и персоналом

электростанций с 10 по 30 ноября 2014 г., на Трипольской ТЭС — с 18 ноября по 10 декабря 2014 г. Как указывалось выше, калорийность угля ЮАР в поступлениях из первой партии составляла 4750–4850 ккал/кг, что было совершенно недостаточным для обеспечения условий ЖШУ без подсветки. Однако на складах станций имелось по 10–20 тыс. т кузнецкого тощего угля, который мог сыграть роль высококалорийной добавки, повышающей теплоту сгорания топлива и температуру пылеугольного факела.

Основываясь на результатах позонного теплового расчета, для котлов ТП-100 Змиевской ТЭС на сжигание изначально была подана смесь из 30 % угля ЮАР и 70 % кузнецкого тощего угля с калорийностью смеси примерно 5600 ккал/кг. С учетом близкого выхода летучих веществ компонентов смешение осуществлялось подачей бульдозером в приемный бункер двух порций кузнецкого тощего угля на каждую порцию угля ЮАР, при прохождении бункера сырого угля и ШБМ достигалась достаточная однородность топлива. В результате пирометрическая температура факела превысила 1550 °С, что позволило достичь устойчивого ЖШУ без подсветки в диапазоне мощности блоков 150–195 МВт.

Следующим шагом при испытаниях была оптимизация топочного процесса по коэффициенту избытка воздуха, распределению пыли по горелкам, тонине помола пыли, организации оптимального разрежения в шлаковом комоде для недопущения застывания шлака на выходе из летки. При  $\alpha = 1,15$  и величине остатка пыли на сите 90 мкм  $R_{90} = 8–10$  % удалось повысить пирометрическую температуру факела до более 1600 °С, что позволило перейти на смесь из 50 % угля ЮАР и 50 % кузнецкого тощего угля с калорийностью смеси примерно 5400 ккал/кг и увеличить диапазон регулирования мощности блоков без подсветки и нарушения режима ЖШУ до 135–195 МВт. Ко времени исчерпания запаса кузнецкого тощего угля на Змиевскую ТЭС начали приходиться поступления угля ЮАР из второй партии с калорийностью 5500–5600 ккал/кг. Такое качество позволило организовать эффективное сжигание этого угля с ЖШУ без подсветки в широком диапазоне регулирования мощности блоков 200 и 300 МВт, а также послужить калорийной добавкой в смесях с остатком угля из первой партии и с углем из третьей партии с калорийностью 5000–5050 ккал/кг. В результате все три партии были сожжены в виде смесей с калорийностью 5250–5300 ккал/кг на блоках 200 МВт ст. №№ 1, 3–5 и на блоке 300 МВт ст. № 9.

При сжигании подсветка не требовалась, нарушений выхода жидкого шлака не наблюдалось, уровень механического недожога соответствовал характерному для углей марки Т (менее 3 %).

Испытания на Трипольской ТЭС отличались тем, что повышенная тепловая напряженность в нижней части топки с пережимом котлов ТПП-210А позволила быстрее пройти смеси из 30 % и 50 % угля ЮАР из первой партии и достичь устойчивого режима ЖШУ без подсветки на смеси из 70 % угля ЮАР и 30 % кузнецкого тощего угля с калорийностью примерно 5200 ккал/кг. С учетом опыта сжигания на Змиевской ТЭС, уголь из второй и третьей партии укладывался в общий уравнильный штабель, что позволило его сжечь без дополнительного шихтования. При сжигании подсветка не требовалась, зарастание леток застывшим шлаком не наблюдалось, уровень механического недожога соответствовал характерному для углей марки Т (менее 3 %).

К сожалению, 20 декабря 2014 г. уголь на складах ТЭС закончился вследствие приостановки поставок угля ЮАР из-за следственных действий Генпрокуратуры Украины. До возобновления поставок угля в конце января 2015 г. Змиевская и Трипольская ТЭС работали по 1 блоку (корпусу), сжигали импортируемый природный газ. Однако остановка котлов позволила выполнить обследование топок и конвективных шахт, которое показало отсутствие дополнительных отложений золы и шлака по сравнению со сжиганием донецкого АШ и каких-либо признаков перегрева экранных поверхностей.

По результатам испытаний ЧАО «Техэнерго» были разработаны режимные карты, по которым оставшиеся партии углей ЮАР с калорийностью 5400–5800 ккал/кг успешно сжигались с конца января до конца отопительного сезона 2015 г. Единственным существенным отличием показателей сжигания угля ЮАР по сравнению с донецким тощим углем была повышенная на 15–25 % генерация оксидов азота вследствие повышенных температур факела, необходимых для поддержания режима ЖШУ для угля с тугоплавкой золой. В целом сжигание угля ЮАР на котлоагрегатах Змиевской и Трипольской ТЭС и кузнецкого угля на всех перечисленных ТЭС и ТЭЦ завершилось с позитивным результатом, который доказал возможность диверсификации топливной базы электростанций за счет импортных углей с отдельными показателями, отличающимися от проектных топлив.

На основании опыта сжигания импортных углей в зимний сезон 2014–2015 гг. на ТЭС и ТЭЦ Институтом угольных энерготехнологий

НАН Украины предложены основные критерии пригодности импортных углей для сжигания в отечественных котлоагрегатах (табл.4), исходя из условий безопасности эксплуатации пылесистем и возможности организации сжигания с ЖШУ без подсветки, с учетом повышенной температуры плавкости золы зарубежных по сравнению с донецким углем.

**Таблица 4. Критерии пригодности импортных антрацитов и тощих углей для сжигания в котлоагрегатах украинских ТЭС и ТЭЦ**

Показатель	А	Т
Общая влага $W_{гг}$ , %, не более	10,0	10,0
Зольность на сухую массу $A^d$ , %	14,0–25,0	14,0–27,0
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу $V^{daf}$ , %	4,0–8,0	8,0–16,0
Калорийность $Q_{гг}$ , ккал/кг	5400–6000	5200–6400

Ограничения показателей связаны со следующим. При влажности  $W_{гг} > 10$  % мельницы не обеспечат сушильную производительность. При выходе летучих веществ  $V^{daf} < 4$  % ухудшатся условия воспламенения факела, при  $V^{daf} > 16$  % появится риск выхода за пределы условий пожаро- и взрывобезопасности пылесистем. Чрезмерная калорийность и низкая зольность  $A^d < 14$  % могут вызвать сплавление гарнисажной пленки (пленки застывшего шлака на стенках нижней части топки), уменьшение температурного сопротивления на стенках зажигательного пояса, увеличение тепловосприятости и риск перегрева металла экранов в нижней части топки, что нежелательно по условиям их эксплуатации.

Начиная с июля 2015 г., указанные критерии используются ПАО «Центрэнерго» при заключении контрактов на поставку импортных углей на Трипольскую и Змиевскую ТЭС.

### Выводы

Поставлявшиеся в конце 2014 г. для покрытия дефицита низкорреакционных углей тощие угли из Кузнецкого бассейна (РФ) и из ЮАР отличались повышенным выходом летучих веществ и тугоплавкой золой, а уголь ЮАР из первых партий – еще и пониженной калорийностью. Благодаря проработке и реализации мероприятий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию пылесистем, условия устойчивого горения и ЖШУ, а также полноту выгорания топлива, сжигание угля ЮАР на котлоагрегатах Змиевской и Трипольской ТЭС и кузнецкого угля на перечисленных ТЭС и трех ТЭЦ, имеющих проектным топливом антрацит, завер-

шилось с позитивным результатом, который доказал возможность диверсификации топливной базы электростанций за счет импортных углей с отдельными показателями, отличающимися от проектных топлив.

#### Список литературы

1. Чернявський М.В. Сучасні проблеми паливозабезпечення та паливоспоживання ТЕС України // Енерготехнології і ресурсосбереження. — 2015. — № 3. — С. 5–19.
2. Чернявський Н.В., Рохман Б.Б., Провалов А.Ю., Косячков А.В. Опыт сжигания угля ЮАР на ТЭС Украины и разработка универсальных требований по качеству импортируемых тощих углей и антрацитов // Сб. трудов 11-й науч.-практ. конф. «Угольная теплоэнергетика : Проблемы реабилитации и развития» (Киев, сент. 2015 г.). — Киев : Ин-т угол. енерготехнологій, 2015. — С.67–69.
3. Провалов А.Ю., Рохман Б.Б., Скляр А.И., Росколупа А.И. Опыт перевода антрацитовых котлоагрегатов ТЭЦ на сжигание тощих углей с выходом летучих до 15 % // Там же. — С. 74-77.
4. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В.Кузнецова, В.В.Митора, И.Е.Дубовского и др. — М.: Энергия, 1973. — 295 с.
5. Залкинд И.Я., Вдовченко В.С., Дик Э.П. Зола и шлаки в котельных топках. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 78 с.
6. Филиппенко Ю.Н., Скляр П.Т., Харлова Е.В. и др. Подготовка угольного топлива для пылевидного сжигания на тепловых электростанциях // Збагачення корисних копалин. — 2013. — Вип. 53.

Поступила в редакцию 02.10.15

**Чернявський М.В., канд. техн. наук, Рохман Б.Б., докт. техн. наук, Провалов О.Ю., канд. техн. наук, Косячков О.В., канд. техн. наук**  
**Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ**  
 вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: mchernyavski@yandex.com

## Досвід спалювання імпортного вугілля у котлоагрегатах ТЕС і ТЕЦ

Розглянуто сегмент низькорекційного вугілля на світовому ринку. Показано, що основними потенційними постачальниками такого вугілля можуть бути тільки ПАР та Кузнецький басейн Росії. Вугілля цих родовищ належать до марки П та відрізняються підвищеними температурами плавкості золи, що утворює проблеми для організації стійкого рідкого шлаковидалення у котлах ТЕС. Додатковою проблемою для котлів ТЕЦ, розрахованих на спалювання антрациту, стала необхідність адаптації їх пилосистем до підвищеного виходу летких речовин пісного вугілля. Для розв'язання цих проблем було розроблено технічні рішення щодо забезпечення безпечної експлуатації пилосистем, розроблено метод повірного позонного теплового розрахунку котлоагрегатів та виконано числові дослідження з метою оцінки необхідного рівня калорійності вугілля та коефіцієнта надлишку повітря для забезпечення необхідних температур рідкого шлаку в нижній частині топки, відсутності шлакування ширм та перегріву екранів топки. Наведено хід та результати випробувань, виконаних за участю Інституту вугільних енерготехнологій, на котлах Трипільської та Зміївської ТЕС (вугілля ПАР), Дарницької, Чернігівської та Сумської ТЕЦ (кузнецьке пісне вугілля), що забезпечило цим електростанціям проходження зимового сезону 2014–2015 рр. На підставі отриманих результатів запропоновано критерії придатності імпортного вугілля для спалювання у котлоагрегатах ТЕС та ТЕЦ України, практично використовувані при укладанні контрактів. *Бібл. 6, рис. 3, табл. 4.*

**Ключові слова:** антрацит, пісне вугілля, вихід летких речовин, температура плавкості золи, калорійність, пиловидне спалювання, рідке шлаковидалення, котлоагрегат, пилосистема.



**Chernyavskiy M.V.**, Candidate of Technical Sciences, **Rokhman B.B.**, Doctor of Technical Sciences, **Provalov O.Yu.**, Candidate of Technical Sciences, **Kosyachkov O.V.**, Candidate of Technical Sciences  
**Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**  
 19, Andriyivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: mchernyavski@yandex.com

## Experience of Imported Coal Burning in the Boilers of Thermal Power Plants and Cogeneration Plants

In the article the segment of low-reactive coals on the world market is considered and it is shown that the main potential suppliers of these coal types can only be South Africa and Kuznetsk basin of Russia. Semi-anthracites from these fields have high ash fusibility temperatures, which creates problems for the organization of sustainable liquid slag removal in thermal power plant boilers. An additional problem for the cogeneration plants boilers designed for burning anthracite was the need to adapt their coal-pulverizing systems to the increased volatile yield of semi-anthracite. To solve these problems, technical solutions have been developed to ensure the safe operation of coal-pulverization systems, a methods have been developed of thermal calculation of boilers' furnaces and numerical studies have been performed to assess the required level of calorific value of coal and the excess air ratio to provide the necessary temperatures at the bottom of the furnace for liquid slag removal, the lack of screens slagging and overheating of the furnace. The progress and results are given of tests carried out with the participation of Coal energy technology institute, at the boilers of Zmievska and Tripilska TPPs (South Africa semi-anthracite), Darnitska, Chernigivska and Sumska HPP (Kuznetsk semi-anthracite), which ensured that the power plants pass the winter season of 2014–2015. Based on these results, the eligibility criteria are suggested of imported coal for burning in boilers of TPPs and cogeneration plants in Ukraine practically used in awarding contracts. *Bibl. 6, Fig. 3, Table. 4.*

**Key words:** anthracite, semi-anthracite, volatile yield, ash fusibility temperature, low calorific value (LHV), pulverized combustion, liquid slag removal, boiler, coal-pulverization system.

### References

1. Chernjavskij M.V. Suchasni problemi palivozabezpechennja ta palivospozhyvannja TES Ukraïni. *Jenergotehnologii i resursoberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (3), pp. 5–19. (Ukr.)
2. Chernjavskij N.V., Rohman B.B., Provalov A.Ju., Kosyachkov A.V. Opyt szhiganiya uglja JuAR na TJeS Ukrainy i razrabotka universal'nyh trebovanij po kachestvu importiruemyh toshhih uglej i antracitov, *Sbornik trudov 11-j nauchno-prakticheskoy konf. «Ugol'naja teplojenergetika : Problemy reabilitacii i razvitija»* (Kiev, Sept. 2015), pp. 67–69. (Rus.)
3. Provalov A.Ju., Rohman B.B., Skljarov A.I., Roskolupa A.I. Opyt perevoda antracitovyh kotloagregatov TJeC na szhiganie toshhih uglej s vyhodom letuchih do 15 %, *Sbornik trudov 11-oj nauchno-prakticheskoy konf. «Ugol'naja teplojenergetika : Problemy reabilitacii i razvitija»* (Kiev, Sept. 2015), pp. 74–77. (Rus.)
4. Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov (Normativnyj metod), Pod red. N.V.Kuznecova, V.V.Mitora, I.E.Dubovskogo. Moscow : Jenergija, 1973, 295 p. (Rus.)
5. Zalkind I.Ja., Vdovchenko V.S., Dik Je.P. Zola i shlaki v kotel'nyh topkakh. Moscow : Jenergoatomizdat, 1988, 78 p. (Rus.)
6. Filippenko Ju.N., Skljjar P.T., Harlova E.V., Rudavina E.V., Chernjavskij N.V. Podgotovka ugol'nogo topliva dlja pylevidnogo szhiganiya na teplovyh jelektrostancijah, *Zbagachennja korisnih kopolin*, 2013, iss. 53. (Rus.)

Received October 2, 2015