

УДК 621.311

ОЦЕНКА НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА МЕХНЕДОЖОГА ПРИ ПЫЛЕВИДНОМ СЖИГАНИИ УКРАИНСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ**Чернявский Н.В., Голенко И.Л., Провалов А.Ю.***Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина***АННОТАЦИЯ**

На основании сопоставления результатов кинетических исследований горения коксовых остатков украинских энергетических углей в кипящем слое и отчетных данных по тепловой

экономичности работы ТЭС установлен физический смысл и выполнена прогнозная оценка минимального уровня мехнедожога угля при его пылевидном сжигании.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие благодаря внедрению стандартов по качеству и опробованию угля и прогрессивных ценовых шкал, стимулировавших поставку на ТЭС обогащенных углей, калорийность углей в поставках на ТЭС возросла от 4000-4500 до 5300-5400 ккал/кг [1, 2]. Это позволило снизить подсветку при пылевидном сжигании антрацита и устранить ее при сжигании газовых углей, так что общая, включая затраты на розжиг, доля газомазутного топлива на ТЭС снизилась до менее 4% (рис.1) [2, 3]. Уменьшился и механический недожог – доля несгоревшего топлива в тепловом эквиваленте, для антрацита величина особенно заметная и примерно равная массовой доле недогоревшего углерода (от 11-16% в 1999 г. до 4,5-7,4% в 2009 г.). Однако до сих пор долю горючих в уносе антрацитовых ТЭС не удается снизить до менее 16-20% [4]. В работе сделана попытка найти связь между зольностью, удельной скоростью

горения антрацита и газовых углей и достижимым минимумом их механического недожога при пылевидном сжигании.

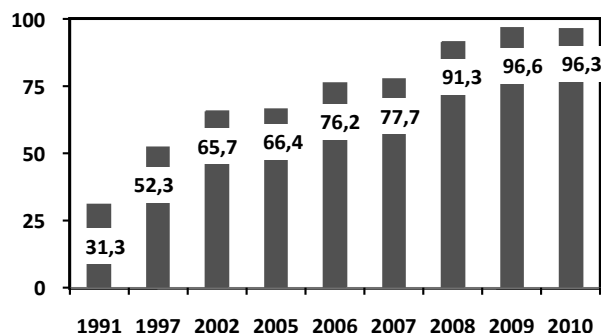


Рис.1 Изменение доли угля в топливной базе ТЭС Украины, % ут.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА В УНОСЕ, МЕХНЕДОЖОГОМ УГЛЯ И СТЕПЕНЬЮ КОНВЕРСИИ УГЛЕРОДА КОКСОВОГО ОСТАТКА

Согласно [5], потери теплоты с мехнедожогом топлива (в перенебрежении углеродом очаговых остатков в шлаке, вклад которого обычно не превышает 1% отн.) определяют по формуле:

$$q_4 = d_{\text{тг}} \cdot (7800 \cdot A^r / Q_i^r) \cdot (a_{\text{ун}} \cdot \Gamma_{\text{ун}}) / (100 - \Gamma_{\text{ун}}), \% \quad (1)$$

где $d_{\text{тг}}$ – доля (по теплу) твердого топлива в общем сожженном топливе;

7800 – теплота сгорания недогоревшего углерода, ккал/кг;

$a_{\text{ун}}$ – доля золы топлива, которая выносится из топki (при пылевидном сжигании с жидким шлакоудалением принимается 0,85);

$\Gamma_{\text{ун}}$ – содержание углерода в золе уноса, %;
 A^r – зольность угля на рабочую массу, %;
 Q_i^r – низшая теплота сгорания угля, ккал/кг.

Физический смысл этого выражения становится понятен при домножении числителя и знаменателя на расход угля $V_{\text{уг}}$. В этом случае оно превращается в отношение произведения теплоты сгорания недогоревшего углерода на его расход в золе уноса $7800 \cdot V_{\text{уг}} \cdot A^r \cdot (a_{\text{ун}} \cdot \Gamma_{\text{ун}}) / (100 - \Gamma_{\text{ун}})$ к полному расходу вводимой в топку теплоты $V_{\text{уг}} \cdot Q_i^r / d_{\text{тг}}$.

Выражение (1) относит мехнедожог ко всему топливу, хотя при сжигании угля с подсветкой газ сгорает полностью. Для оценки полноты вы-

горения угля целесообразно определять мехнедожог угля:

$$q_{4(yr)} = (7800 \cdot A^r / Q_i^r) \cdot (a_{yH} \cdot \Gamma_{yH}) / (100 - \Gamma_{yH}), \% \quad (2)$$

С учетом того, что

$$A^r = A^d(100 - W_t^r) / 100,$$

$$Q_i^r \approx Q_i^{af}(100 - A^d)(100 - W_t^r),$$

где A^d – зольность на сухую массу угля, W_t^r – общая влага угля, Q_i^{af} – низшая теплота сгорания угля в беззольном состоянии (при $W_t^r = 8\%$ для антрацита и газового угля $Q_i^{af} = 7200-7250$ ккал/кг), выражение (2) принимает вид:

$$q_{4(yr)} = 85(7800/7225) \cdot (A^d / (100 - A^d)) \cdot (\Gamma_{yH} / (100 - \Gamma_{yH})) \quad (3)$$

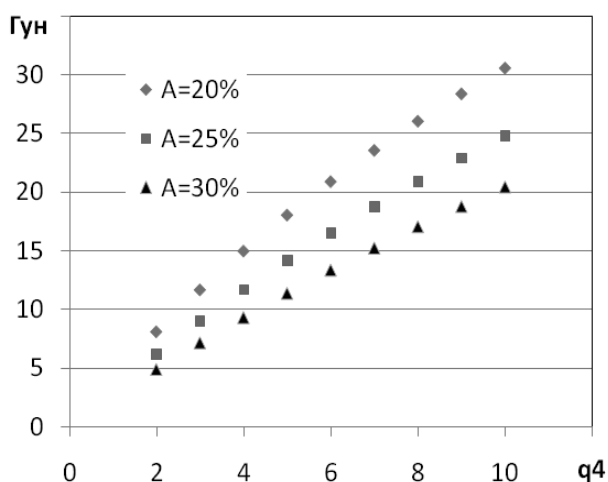


Рис.2 Зависимость содержания углерода в уносе от мехнедожога при разной зольности антрацита.

Решение этого выражения относительно Γ_{yH} для различной зольности в зависимости от $q_{4(yr)}$ дано на

рис.2. Можно видеть, что величина Γ_{yH} растет с увеличением мехнедожога и со снижением зольности угля. Так, 18% углерода в уносе оказывается при зольности 30%, $q_{4(yr)} = 9\%$, и при зольности 20%, $q_{4(yr)} = 5\%$. Это объясняет данные [4] о повышении за последнее десятилетие качества угля и снижении мехнедожога при сохранении уровня углерода в уносе.

В лабораторных исследованиях полноту выгорания угля характеризуют степень конверсии углерода коксового остатка X_C , %. Решение системы уравнений баланса расходов нелетучего углерода и золы

$$V_{yH}^d(100 - A^d - V^d)(100 - X_C) = V_{yH} \cdot \Gamma_{yH}, \quad (4)$$

$$0,85V_{yH}^d \cdot A^d = V_{yH} \cdot (100 - \Gamma_{yH}), \quad (5)$$

где V_{yH}^d , V_{yH} – расходы сухого угля и уноса, V^d – выход летучих веществ на сухую массу угля, можно выразить в виде:

$$100 - X_C = 85(A^d / (100 - A^d - V^d)) \cdot (\Gamma_{yH} / (100 - \Gamma_{yH})). \quad (6)$$

Сопоставление выражений (6) и (3) приводит к

$$100 - X_C = ((85/91)(100 - A^d) / (100 - A^d - V^d)) \cdot q_{4(yr)}, \quad (7)$$

а с учетом $V^d = V^{daf}(100 - A^d) / 100$ – к выражению

$$100 - X_C = ((100 - 85/91) / (100 - V^{daf})) \cdot q_{4(yr)}. \quad (8)$$

Выход летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} составляет в среднем от 6% для антрацита до 40% для газовых углей, откуда коэффициент перед $q_{4(yr)}$ численно равен от 0,99 до 1,56, соответственно. Таким образом, с точностью до указанного коэффициента величина мехнедожога угля равна доле непрореагировавшего углерода коксового остатка $100 - X_C$.

Установление этой взаимосвязи позволяет использовать для оценки минимально достижимого уровня мехнедожога результаты лабораторных экспериментов по выгоранию коксовых остатков украинских энергетических углей.

РЕЗУЛЬТАТЫ КИНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЕНИЯ КОКСОВЫХ ОСТАТКОВ УКРАИНСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ЗОЛЬНОСТИ

Кинетические исследования горения коксового остатка антрацита и донецкого газового угля различной зольности [6] проводились по импульсной методике сжигания в кипящем слое (КС) на установке РСК-1 («реакционная способность коксов») (рис.3). Смысл методики заключается в подаче в КС импульсов воздуха длительностью в несколько десятков секунд, за время которых слой коксо-зольных частиц разогревается менее чем на 5 К, а скорость горения определяют по составу и расходу газообразных продуктов. Между импульсами КС ожигается инертным газом с тем же расходом, его температура восстанавливается, так что процесс проходит в практически изотермических условиях. Массу навески кокса подбирают так, чтобы при

заданной температуре доля CO_2 в продуктах не превышала 2-4%. Эксперимент прекращают, когда содержание CO_2 в продуктах становится ниже порога чувствительности хроматографа.

В качестве образцов использовались узкие фракции размера 0,4-0,63 мм, отсеянные из отсеков АШ и ГСШ. Их зольность A^d составляла 32,8% и 38,6%, соответственно. Кроме того, путем разделения исходных образцов в тяжелой жидкости приготавливались малозольные и высокозольные фракции. Перед исследованием из образцов угля приготавливался коксовый остаток путем пиролиза в КС в инертной среде при 1123 К. На рис.4 показаны кривые конверсии – изменение удельной на текущую массу углерода скорости

горения углерода W_m по ходу конверсии во внутривидной области реагирования.

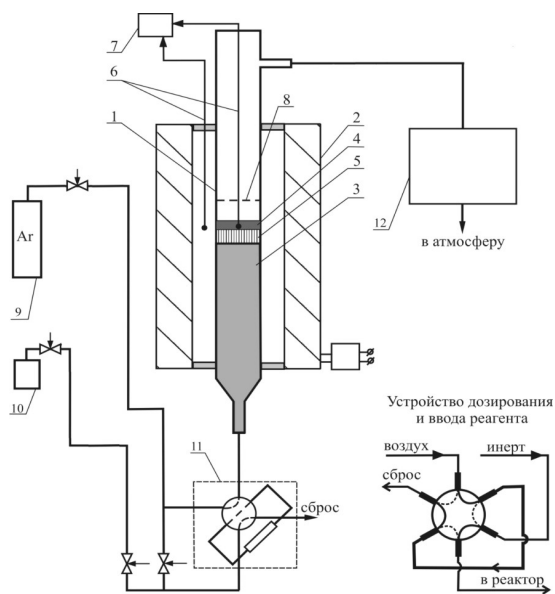


Рис.3 Установка РСК-1 для исследования горения коксов угля в КС в изотермических условиях.

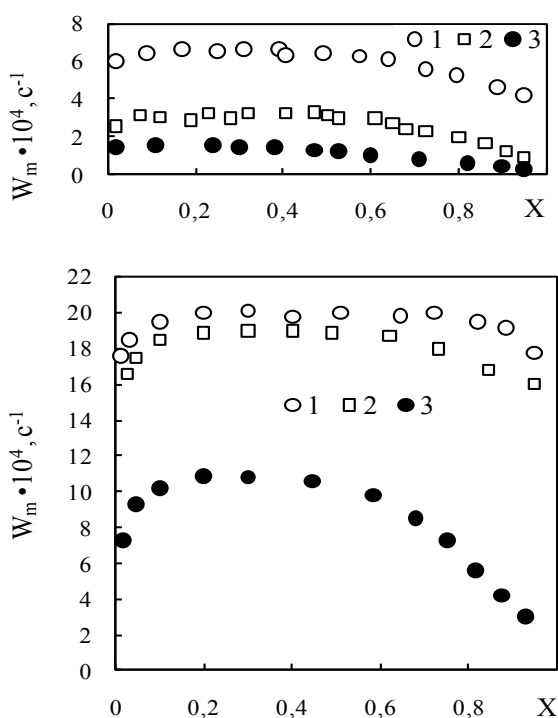


Рис.4 Кривые конверсии коксов углей различной зольности при выгорании в кислороде воздуха: сверху – антрацит, 1123 К (A^d : 1 – 4,3%, 2 – 32,8%, 3 – 44,2%); внизу – газовый уголь, 833 К (A^d : 1 – 12,4%, 2 – 38,6%, 3 – 78,4%).

Они характеризуются квазистационарными участками в диапазоне $X_C = 0,1-0,5$ и последующим плавным спадом. В пределах каждой марки величина W_m на квазистационарных участках снижается с ростом зольности.

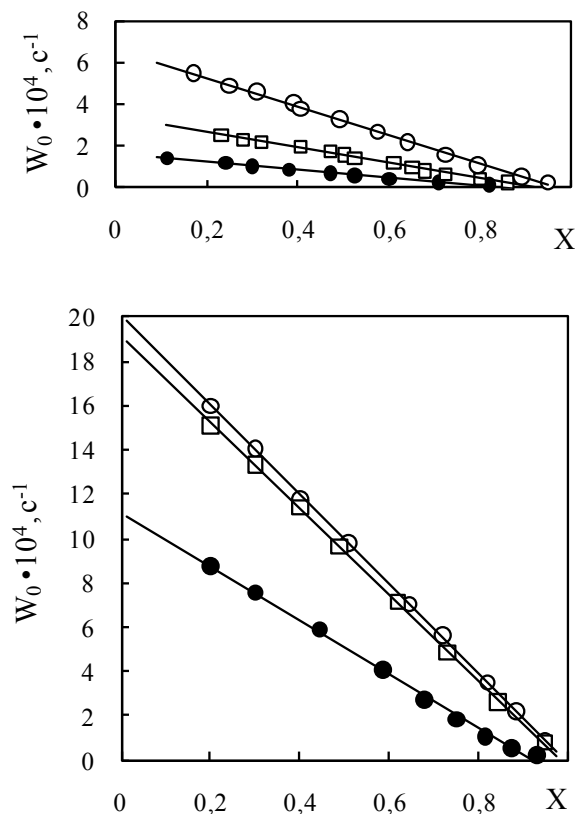


Рис.5 Изменение удельной на начальную массу углерода скорости горения антрацита (вверху) и газового угля (внизу) от степени конверсии образца. Обозначения – как на рис.4.

В изотермических экспериментах полного выгорания углерода не достигается, что хорошо видно по зависимостям удельной на начальную массу углерода скорости горения углерода W_0 от степени конверсии (рис. 5), близким к прямому виду

$$W_0 = W_{0(\max)} \cdot (X_{C(\max)} - X_C), \quad (9)$$

где $X_{C(\max)}$ составляет от 85-96% для антрацита до 92-99% для газового угля. Это не означает прекращения горения, но свидетельствует о том, что по достижении $X_{C(\max)}$ удельная скорость горения снижается настолько, что догорание оставшейся части углерода требует значительно большего времени и/или существенного повышения температуры. Важно отметить, что в пределах каждой марки величина $X_{C(\max)}$ снижается с ростом зольности.

Физический смысл влияния зольности на характер конверсии углерода в [6, 7] пояснен из таких соображений. Зольность добываемых углей

связана как с присечками, прослойками, линзами с характерными размерами от нескольких мм до десятков мм, легко отделяемыми при обогащении (внешняя зола), так и с мелкодисперсными (от нескольких мкм до сотен мкм) минеральными компонентами, образующими трудноразделяемые при обогащении сростки с угольным веществом.

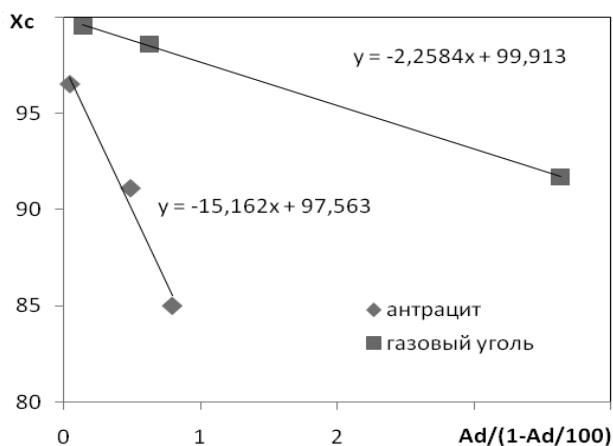


Рис.6 Зависимость максимально достигаемой в кинетических экспериментах степени конверсии от зольности угля.

Но тогда и органическое вещество содержится в угле по меньшей мере в трех различных видах: «чистого» угольного вещества, углеминеральных и

минералоугольных сростков, причем реакционная способность углерода в этом ряду снижается из-за блокирования части внутренней реагирующей поверхности золой. В коксовом остатке углерод содержится в таких же видах, вдобавок небольшая его часть при пиролизе упорядочивает свою структуру до высокой степени карбонизации с низкой пористостью и, соответственно, с низкой реакционной способностью. Основной вклад в скорость горения вносит углерод «чистого» угольного вещества, но поскольку удельная скорость горения относится ко всему углероду, по мере истощения наиболее реакционноспособной компоненты ее наблюдаемое значение снижается с ростом конверсии углерода.

С учетом вышесказанного в [6, 7] показано, что поскольку содержание углерода в сростках пропорционально зольности образца A^d , а содержание всего углерода – величине $(100 - A^d)$, то в пределах каждой марки угля зависимости $W_{0(max)}$ и $X_{C(max)}$ от параметра $A^d/(100 - A^d)$ должны быть линейными, что и наблюдалось в кинетических экспериментах. Так, на рис.6 видно, что экспериментальные точки достигаемой в эксперименте максимальной конверсии углерода антрацита и газового угля лежат на прямых вида $X_{C(max)} = 97,56 - 15,16 \cdot A^d/(1 - A^d/100)$ и $X_{C(max)} = 99,91 - 2,26 \cdot A^d/(1 - A^d/100)$, соответственно.

Полученные результаты с учетом выражения (8) можно использовать для оценки нижнего предела мехнедожога при пылевидном сжигании на ТЭС.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ДАННЫМИ ОТЧЕТНОСТИ ТЭС О ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЭС

На рис.7 на экспериментальные зависимости $X_{C(max)}$ от параметра $A^d/(100 - A^d)$ нанесены значения $(100 - 0,99 \cdot q_{4(yr)})$ для антрацитовых ТЭС и $(100 - 1,56 \cdot q_{4(yr)})$ для ТЭС, сжигающих газовые угли, по данным отчетности о тепловой экономичности работы электростанций 3-тех-ТЭС за 1999-2009 гг., частично опубликованным в [4], с учетом зольности угля и его доли в сожженном котлоагрегатами топливе.

Это сопоставление позволяет видеть, что в 1999-2005 гг. большинство антрацитовых ТЭС не достигало максимальной степени конверсии угля при сжигании, а лучшие показатели мехнедожога угля соответствуют данным кинетического эксперимента, что подтверждает правомочность их использования для оценки нижнего предела мехнедожога при пылевидном сжигании. Напротив, в 2009 г. большинство ТЭС превысили максимальную степень конверсии, достигаемую в эксперименте, что связано, скорее всего, с увеличением доли тощего угля, сжигаемого совместно с антрацитом.

Что касается мехнедожога при сжигании газового угля, то в 2005-2009 гг. на 4 ТЭС из 7 он

соответствует максимальной степени конверсии, достигаемой в эксперименте. Исключения – Добротворская и Кураховская ТЭС с твердым шлакоудалением, где предел конверсии не достигается из-за пониженных температур факела, и Бурштынская ТЭС, где повышенный мехнедожога связан с маневренными режимами работы энергоблоков в «энергоострове», участвующем в регулировании электропотребления зарубежных сетей. Так или иначе, расчетная оценка нижнего предела мехнедожога при пылевидном сжигании по величине $X_{C(max)}$ из кинетических экспериментов при разной зольности угля дает «идеальные» показатели котлоагрегатов, к которым следует стремиться за счет улучшения их технического состояния, повышения качества топлива и топливоподготовки.

Из выражений (3), (6), (8) следует

$$G_{ун} = 100 \cdot q_{4(yr)} / (91 \cdot A^d / (100 - A^d) - q_{4(yr)}), \quad (10)$$

что позволяет использовать данные по $X_{C(max)}$ для расчетной оценки нижнего предела содержания углерода в уносе. Такая оценка в зависимости

от зольности угля приведена на рис.8 в сопоставлении с данными отчетности 3-тех-ТЭС.

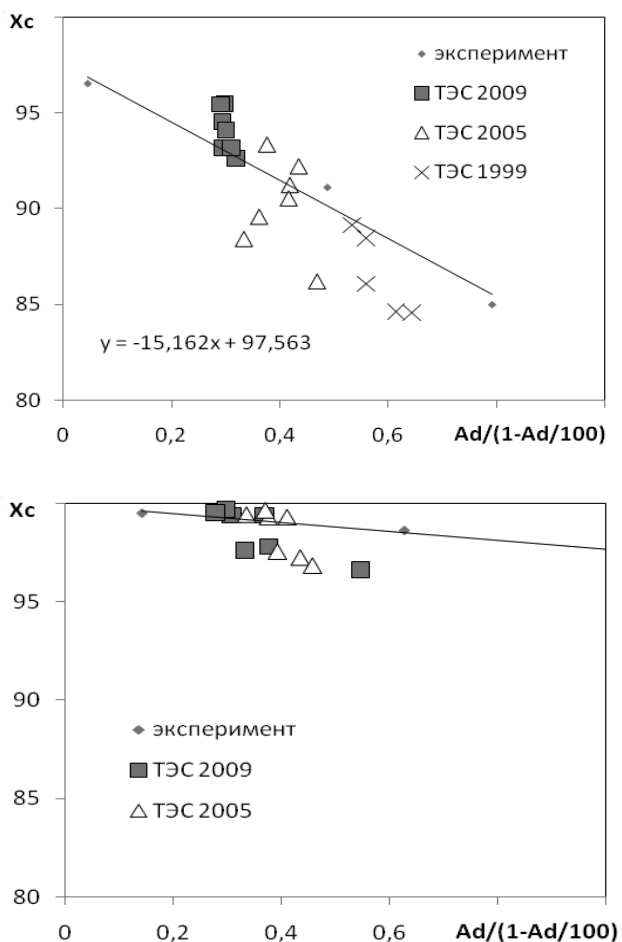


Рис.7 Сопоставление мехнедожога угля на ТЭС в пересчете на степень конверсии углерода коксового остатка с данными кинетического эксперимента: сверху – антрацит, внизу – газовый уголь.

ВЫВОДЫ

В работе раскрыто соотношение между содержанием углерода в уносе при пылевидном сжигании, мехнедожогом топлива и угля (с учетом доли подсветки) и степенью конверсии углерода коксового остатка угля. Полученные в кинетических экспериментах в КС во внутридиффузионной области реагирования зависимости максимально достигнутой степени конверсии углерода коксов антрацита и газового угля от зольности, физический смысл которых в работах [6, 7] связан с нахождением части углерода в виде углеминеральных сростков и карбонизацией части углерода при пиролизе, использованы для расчетных оценок оценки нижнего

предела мехнедожога угля и содержания углерода в уносе. Сопоставление расчетных оценок с данными отчетности о тепловой экономичности электростанций по форме 3-тех-ТЭС показало, что при пылевидном сжигании как антрацита, так и газового угля они в основном коррелируют в диапазоне зольности 20-40%. Отклонения от расчетных оценок в худшую сторону связаны с неудовлетворительным техническим состоянием котлоагрегатов, их работой в непроектных маневренных режимах либо в режиме твердого шлакоудаления, в лучшую сторону – с добавкой к антрациту более реакционноспособного тощего угля.

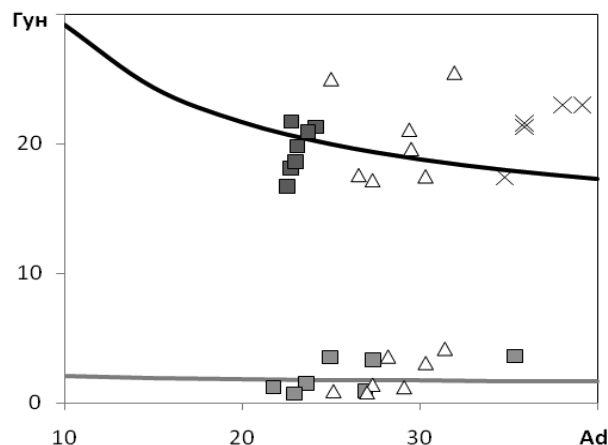


Рис.8 Сопоставление содержания углерода в уносе ТЭС с расчетом его нижнего предела по данным кинетического эксперимента по выражению (10).

Отметим, что из расчетной оценки следует: при пылевидном сжигании антрацита с зольностью 20-22% без добавки тощего угля, с ограниченным временем пребывания частиц в зоне горения, мехнедожог угля не может быть ниже 5-6%, а содержание углерода в уносе – ниже 18-20%. Для снижения этих величин необходимо внедрение технологий с увеличенным временем пребывания частиц в зоне горения, например, технологий сжигания в ЦКС.

предела мехнедожога угля и содержания углерода в уносе. Сопоставление расчетных оценок с данными отчетности о тепловой экономичности электростанций по форме 3-тех-ТЭС показало, что при пылевидном сжигании как антрацита, так и газового угля они в основном коррелируют в диапазоне зольности 20-40%. Отклонения от расчетных оценок в худшую сторону связаны с неудовлетворительным техническим состоянием котлоагрегатов, их работой в непроектных маневренных режимах либо в режиме твердого шлакоудаления, в лучшую сторону – с добавкой к антрациту более реакционноспособного тощего угля.

Результаты позволяют заключить, что при соблюдении всех требований к состоянию, режимам работы пылеугольных котлоагрегатов и условиям топливоподготовки, без добавки тощего угля мехнедожог антрацита не может быть ниже 5-6%, а содержание углерода в уносе при его сжигании – ниже 18-20%. Для снижения этих величин необходимо внедрение технологий с увеличенным време-

нем пребывания частиц в зоне горения, например, технологий сжигания в ЦКС.

Предложенный и апробированный в работе способ расчетной оценки содержания углерода в уносе и мехнедожога угля в зависимости от его зольности целесообразно использовать для прогнозирования и анализа показателей тепловой экономичности пылеугольных котлоагрегатов ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В., Стегний Н.Г. Техническое обоснование нормативных требований к качеству энергетических углей и ценовая шкала как средство их обеспечения // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2007. - №6. – С.3-8.
2. Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В. Влияние качества угля на эффективность его пылевидного сжигания на ТЭС Украины // Сборник докл. 5-й научн.-практ. конф. «Минеральная часть топлива, очистка котлов, улавливание и использование золы». – Челябинск, 2011. - Т.1. – С. 190-198.
3. Майстренко О.Ю., Топал О.И., Гапонич Л.С. Сучасний стан вугільної енергетики України та перспективи її оновлення і розвитку // Наукові праці НУХТ. – 2010. - № 32. – С.43-47.
4. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В., Дедов В.Г., Плотников С.И., Батрак А.А. Сжигание углеродсодержащей золы уноса антрацитовых ТЭС в кипящем слое // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2008. - №1. – С.3-12.
5. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фигнер, А.А. Авдеева. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
6. Чернявский Н.В., Майстренко А.Ю., Голенко И.Л. Характер выгорания коксов энергетических углей различной зольности в кипящем слое // Энерготехнологии и ресурсосбережение. - 2009. - №3. - С.4-11.
7. Голенко И.Л. Вплив зольності на характер вигорання енергетичного вугілля в топках котлоагрегатів: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.06 – К.: НУХТ, 2009. – 20 с.
8. Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В. Вопросы повышения эффективности использования твердого топлива на ТЭС // Энергетика и электрификация. – 2004. – №12. – С. 17–27.