УДК 662.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ УГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Бесценный И.В., Бондзик Д.Л., Щудло Т.С., Дунаевская Н.И.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований стабильности факела при сжигании смесей антрацита с тощим углём и влияния газового угля на выгорание его смеси с антрацитом. В исследовательской установке ВГП-100В сжигались смеси с добавлением 16%, 27,5% и 44% тощего угля и 10%, 20% и 30% газового угля к антрациту от суммарной массы, а также отдельные угли. Было доказано, что добавление более реакционного угля к антрациту улучшает стабильность факела и выгорание углерода смеси. Эксперименты подтверждают существование синергетического эффекта в процессах горения угольных смесей различной степени метаморфизма.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство антрацитовых котлов ТЭС Украины в случае работы на угле с проектными характеристиками работают с КПД 83,1-83,5% [1] из-за физического износа оборудования и несвоевременных ремонтов. Сейчас на некоторых антрацитовых блоках вынуждены сжигать тощий уголь, который имеет более высокую реакционную способность. Но добыча и запасы тощего угля в Украине недостаточны для того, чтобы обеспечить все антрацитовые блоки.

Для поддержания существующих котлоагрегатов необходимо искать новые пути улучшения выгорания антрацита, как основного энергетического угля. Одним из возможных методов повышения эффективности работы котлоагрегатов является сжигание смесей антрацита с другими (другой степени метаморфизма) более реакционными марками угля [2]. Такими марками угля могут быть тощий (Т) и газовый (Г). Тощий уголь проще применять в качестве примеси к антрациту из-за их близости по степени метаморфизма, и может сжигаться без переоборудования систем пылеприготовления и пылеподачи.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФАКЕЛА ПРИ СЖИГАНИИ СМЕСЕЙ УГЛЕЙ МАРОК Т И АШ

Эксперименты проводились на установке ВГП-100В. Установка моделирует процессы, происходящие в зоне поджига за горелочным устройством и в НРЧ топки. Она включает вертикальный, с нисходящим потоком реактор длиной 2,4 метра, который состоит из четырех секций длиной по 0,6 м и внутренним диаметром 0,28 м, горелочное устройство, шлакосборник, поворотный участок с циклоном, камеру охлаждения и дожигания [3].

Горелочное устройство представляет собой вертикальный водоохлаждаемый футерованый цилиндр внутренним диаметром 0,2 м и длиной 0,5 м, установленный на верхнем срезе реактора, оборудован двумя горелками. Основная газовая горелка установлена с торца горелочного устройства, а на его боковой стенке смонтирована вспомогательная газовая горелка.

Угольная пыль в установку подавалась двумя независимыми питателями через смеситель в технологическое отверстие горелочного устройства. Во время экспериментов контролировались расходы природного газа и воздуха по каждому каналу ввода, расходы углей, температуры газового потока, разрежение в зоне реактора и состав продуктов сгорания на его выходе.

Было отработано пять режимов:

1. сжигание 100% антрацита;
2. сжигание 100% тощего угля;
3. сжигание смеси 84% антрацита и 16% тощего угля по массе;
4. сжигание смеси 72,5% антрацита и 27,5% тощего угля по массе;
5. сжигание смеси 56% антрацита и 44% тощего угля по массе.

Технический анализ образцов приведен в табл.1.

Каждый режим длился около часа со стабильными показателями расходов реагентов, температурами и составом газов в реакторе.

© Бесценный И.В., Бондзик Д.Л., Щудло Т.С., Дунаевская Н.И.

Таблица 1. Характеристики используемой угольной пыли в экспериментах по сжиганию смесей антрацита и тощего угля.

Уголь	Технический анализ		
	Wr, %	Ad, %	Vdaf, %
Антрацит	0,67	27,19	3,73
Тощий	0,65	24,68	7,65

Задачей эксперимента было определить в каждом режиме наименьшее значение расхода газа, при котором сохраняется стабильность факела.

Первый опыт проводился с целью определения условий стабильного горения чистого антрацита. Режим характеризовался наибольшей долей газа по теплу по сравнению с другими режимами (табл.2).

Поскольку антрацитовый факел имеет большое время индукции, для поддержания стабильного его воспламенения необходимо было прогревать стенки горелочного устройства и первой секции реактора до 1000°С. Практически все тепло, которое расходовалось на поддержание температуры футеровки горелочного устройства и первой секции, выделялось от сгорания природного газа.

Во втором опыте доля газа по теплу была наименьшей (см. табл.2). Продукты сгорания образовывались во вспомогательной газовой горелке, смонтированной на боковой стенке горелочного устройства. В этом опыте в первой секции осуществлялось смешивание реагентов, а выход летучих, воспламенение угля и начало горения кокса происходило во второй секции. Высокая стабильность режима объясняется тем, что во второй секции выделялось достаточно теплоты для поддержания температуры футеровки на необходимом для стабильного горения уровне (рис.1).

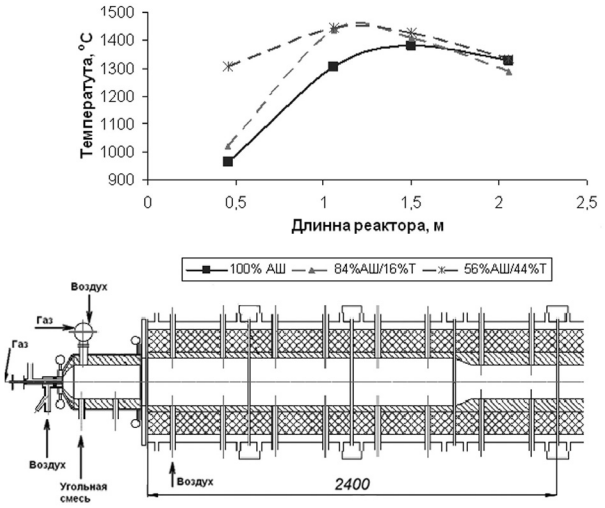

Рис.1 Температура газов вдоль оси реактора.

В трех последующих опытах использовались смеси антрацита и тощего угля. Эксперименты показали, что при добавлении тощего угля к антрациту факел удалось стабилизировать, расходуя меньшую долю газа, что объяснялось выделением большего количества летучих из тощего угля в первой секции, при сгорании которых выделялось тепло, частично компенсирующее тепло природного газа. В дальнейших опытах с увеличением содержания тощего угля в смеси расход природного газа уменьшался.

Непосредственное уменьшение доли газа с увеличением доли более реакционного угля в смеси – предсказуемый результат. Важно определить характер взаимного влияния компонентов смеси.

Существуют три возможных варианта развития процесса воспламенения смесей антрацита и тощего угля:

Таблица 2. Характеристики экспериментальных режимов исследования процессов сжигания смесей антрацита и тощего угля [4].

Режим	Расходы реагентов				Температура газов, °С				Доля по теплу, %		
	газ, нм3/ч	антрацит, кг/ч	тощий уголь, кг/ч	воздух, нм3/ч	секция 1	секция 2	секция 3	секция 4	антрацит	тощий уголь	газ
100%АШ	4,96	15,64	0	104,7	962	1306	1380	1327	68,17	0	31,83
100%Т	1,35	0	19,21	77,57	269	1474	1526	1423	0	91,15	8,85
84%АШ / 16%Т	5,41	17,17	3,27	124,3	1018	1436	1409	1290	59,51	12,32	28,17
72,5%АШ/ 27,5%Т	4,01	16,03	6,08	119,7	1277	1299	1411	1255	55,9	23,06	21,04
56%АШ/ 44%Т	3,29	12,77	10,04	120,8	1306	1443	1426	1334	44,6	38,13	17,27

- составляющие угольной смеси горят независимо, т.е. каждый тип угля горит так, как и при раздельном сжигании. В таком случае следует ожидать линейной зависимости доли газа для стабилизации по теплу от доли более реакционного угля;

- смесь угля разной реакционной способности будет иметь характеристику стабильности факела, подобную характеристикам менее реакционного угля. Это возможно в том случае, когда менее реакционный уголь замедляет воспламенение более реакционного. Таким образом, уменьшить долю газа для стабилизации будет практически невозможно;

- характеристики стабильности факела смеси будут подобны характеристикам факела более реакционного угля. Т.е., предполагается, что более реакционный уголь, воспламеняясь раньше, быстрее прогревает частицы менее реакционного угля и тем самым будет способствовать их воспламенению.

Одной из целей проведения экспериментов было определение, которая из трёх моделей наиболее адекватна сжиганию смесей антрацита и тощего угля. Для этого по данным табл.2 была построена зависимость расходов газа от доли тощего угля в смеси по теплу (рис.2).

Расчетная зависимость доли газа от доли тощего угля по теплу построена по данным первых двух экспериментов на отдельных марках угля при условии независимого их горения в смесях. Как видно из графика, точки во всех трёх проведенных на смесях экспериментах лежат ниже расчётной прямой, что соответствует третьему варианту развития процесса воспламенения смесей.

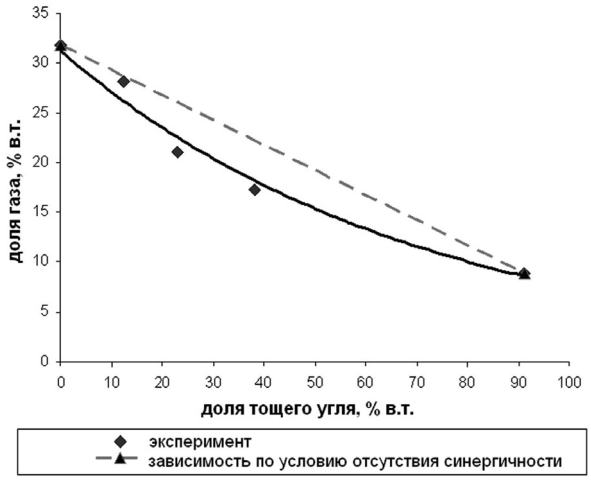

Рис.2 Зависимость расходов газа от доли тощего угля.

В целом эксперименты доказывают тот факт, что добавление более реакционного угля к менее реакционному улучшает стабильность факела и уменьшает расход газа на «подсветку».

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ СМЕСЕЙ АНТРАЦИТА И ГАЗОВОГО УГЛЯ

Эксперименты по сжиганию смесей антрацита и газового угля проводились также на установке ВГП-100В.

Установка была модернизирована для обеспечения возможности одновременной подачи трех видов топлива. Для стабилизации факела в конструкцию установки были внесены несколько изменений: точка подачи смесей из подачи через боковую стенку горелочного устройства была перенесена на подачу через завихритель основной горелки, кроме того, была модернизирована система подачи воздуха в первую секцию с изменением радиальной подачи воздуха на тангенциальное, что создает закрученный поток с направлением вращения противоположным направлению вращения потока, который создается в лопаточном аппарате основной горелки.

Угольные смеси готовились заранее для того, чтобы точно выдержать массовые соотношения. Готовились они таким образом: взвешенные порции компонентов смеси ссыпались в одну ёмкость, перемешивались в ней, а потом полученная смесь пропускалась через вибросита трижды для повышения равномерности.

В каждой секции диагностического участка измерялась температура газов с помощью термопар. Газовая фаза для анализа отбирается постоянно на выходе из реактора водоохлаждаемым пробоотборным зондом, а твердая фаза отбиралась во время режимов на выходе из реактора водоохлаждаемым зондом для отбора твердой фазы.

Для исследований использовались образцы угольной пыли станционного размола, отобранные с пылепитателей Трипольской ТЭС (антрацит) и Ладыжинской ТЭС (газовый). Характеристики исследуемого угля приведены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики используемой угольной пыли в экспериментах по сжиганию смесей антрацита и газового угля.

Уголь	Технический анализ			Qнр, МДж/кг
	Wr, %	Ad, %	Vdaf, %	
Антрацит	1,15	29,68	6,67	22,69
Газовый	5,5	24,98	40,55	21,54

Эксперимент по сжиганию только антрацита (режим 100% АШ) проводился для обрабатывания методики экспериментов, определения минимальной величины расхода природного газа,

Таблица 4. Характеристика экспериментальных режимов исследования процессов сжигания смесей антрацита и газового угля.

Режим	Расходы реагентов				Температура газов, °С			
	газ, нм3/ч	антрацит, кг/ч	газовый уголь, кг/ч	воздух, нм3/ч	секция 1	секция 2	секция 3	секция 4
100%АШ	0,72	16,45	0	114,72	1493	1569	1559	1273
90%АШ/10%Г	0,72	16	1,78	117,01	1460	1573	1626	1345
80%АШ/20%Г	0,72	14,34	3,585	131,16	1469	1519	1512	1291
70%АШ/30%Г	0,72	13,61	5,83	127,21	1452	1422	1307	1188
100%Г	0,72	0	16.05	119.67	1464	1361	1275	1170

которая должна быть постоянной для других режимов для устранения эффекта влияния расхода «подсветочного» газа на полноту выгорания угля. После режима отдельного сжигания антрацита проводились эксперименты по сжиганию трех смесей антрацита с газовым углем в таких соотношениях: 0,9/0,1 (режим 90%АШ/10%Г); 0,8/0,2 (режим 80%АШ/20%Г) и 0,7/0,3 (режим 70%АШ/30%Г) соответственно. На заключительном этапе проведения опытов отрабатывался режим по сжиганию только газового угля (режим 100% Г).

Расходы реагентов и температуры газов по длине реактора в режимах исследования выгорания смесей антрацита и газового угля приведены в таблице 4.

Во время режима сжигания антрацита была определена величина расхода природного газа 0,72 нм^3/ч. Такой расход газа по теплу находился в пределах 5,57-6,89 % (табл.5). Такой расход газа необходим для подогревания воздуха, который предотвращает захолаживание реактора.

Чтобы определить, способствует ли газовый уголь воспламенению и скорейшему выгоранию антрацита, необходимо рассмотреть возможные варианты процессов горения:

- если компоненты смеси горят независимо, тогда зольность отборов смесей должна равняться средневзвешенной зольности отборов полученных при сжигании антрацита и газового угля отдельно;
- если газовый уголь воспаляется раньше и выделенной теплоты достаточно для более раннего воспламенения антрацита, то в таком случае значения зольности отборов смесей будут выше, чем средневзвешенные;
- если газовый уголь будет мешать горению антрацита значения зольности отборов для смесей будут ниже чем средневзвешенные зольности отборов полученных при сжигании антрацита и газового угля отдельно.

Для определения варианта развития процесса воспламенения и горения во время режимов осуществлялся отбор летучей золы на уровне 2,1 м от начала диагностического участка специальным зондом для отбора твердой фазы. Результаты технического анализа летучей золы приведены в таблице 6.

Таблица 5. Расчетные параметры режимов сжигания смесей антрацита и газового угля.

Режим	Доля топлива по теплу, %			Тепловая мощность, кВт				Коэфф. избытка воздуха
	Газ	Антрацит	Газовый уголь	Газ	Антрацит	Газовый уголь	Общая	
100%АШ	6,42	93,58	0	7,11	103,69	0	110,80	1,066
90%АШ/10%Г	5,99	85,03	8,97	7,11	100,88	10,64	118,63	1,013
80%АШ /20%Г	5,98	75,98	18,03	7,11	90,4	21,45	118,96	1,13
70%АШ /30%Г	5,57	67,12	27,31	7,11	85,77	34,89	127,77	1,017
100%Г	6,89	0	93,105	7,11	0	96,07	103,18	1,165

Таблица 6. Технический анализ летучей золы в экспериментах по сжиганию смесей антрацита и газового угля.

Режим	Ad (эксперимент), %	Ad(расчет), %
100%АШ	62,15	62,15
90%АШ / 10%Г	75,33	64,78
80%АШ / 20%Г	84,31	67,4
70%АШ / 30%Г	86,03	70,03
100%Г	88,4	88,4

По данными табл.6 построен график зольности уноса для каждого режима (рис.3).

Кривая зольности летучей золы полученной в результате эксперимента при сжигании смесей находится выше прямой зависимости при условии независимого горения компонентов смеси построенной по значениям зольности режимов 100%АШ и 100%Г. Такая зависимость свидетельствует о наличии синергического эффекта между двумя видами угля в смесях в процессе их горения. Результаты, также, подтверждают предположение о том, что газовый уголь помогает воспламенению антрацита.

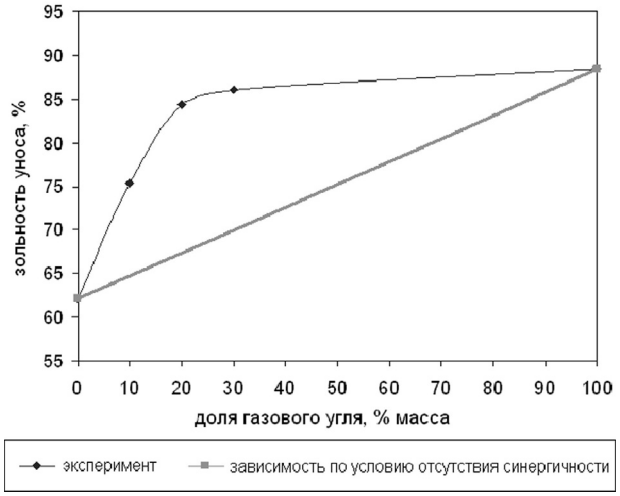

Рис.3 Зависимость зольности уноса от содержания угля марки Г в смесях.

Добавление 10% газового угля к антрациту увеличивает зольность уноса на 10,5% от рассчитанного при условии отсутствия взаимодействия между компонентами (табл.6), а добавление 20% газового угля приводит к увеличению зольности уноса на 16,9%, а при добавлении 30% газового угля зольность уноса увеличивается лишь на 16% от рассчитанной зольности для третьего соотношения при условии отсутствия взаимодействия между компонентами. Увеличение доли газового угля с 20% до 30% практически не показывает абсолютного прироста зольности уноса, а относительно соответствующего значения зависимости при условиях отсутствия синергического эффекта показало уменьшение прироста на 1%. Следовательно, можно сделать вывод о том, что оптимальным соотношением смеси является 80% антрацита и 20% газового угля. В результате смешивания с таким соотношением получается смесь со средним выходом летучих V^{daf}=13,4%, что соответствует выходу летучих тощего угля.

Объяснить, как именно влияет добавление газового угля к антрациту на процесс горения смесей, поможет анализ температурных профилей по каждому режиму. Отдельно нужно отметить, что стенд ВГП-100В является водоохлаждаемым, а также то, что в первой секции температуры продуктов сгорания угля не измерялись, что проявляется в снижении температуры по всей длине реактора.

По данным таблицы 4 построен график изменения температур газов по длине реактора для пяти режимов.

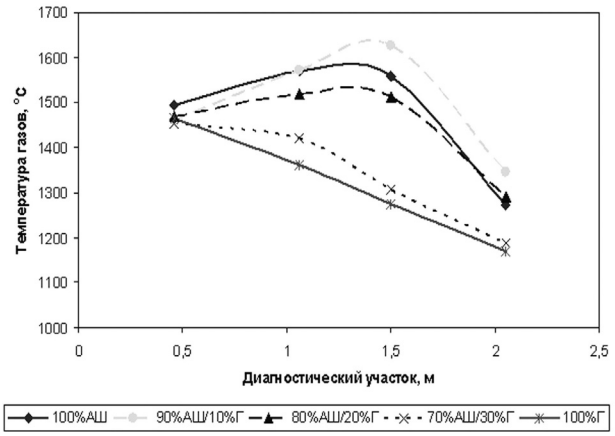

Рис.4 График изменения температур газов по длине реактора.

Из графика видно, что антрацит горит с более высокой температурой чем газовый уголь по всей длине диагностического участка. Температурный профиль смеси 90%АШ/10%Г подобен по форме к антрацитовому, но температура в третьей и четвертой секции выше на 70°С, это можно объяснить добавлением более реакционного угля, который, воспаляясь раньше, помогает воспламенению антрацита. Температурный профиль смеси 80%АШ/20%Г, также по форме подобен антрацитовому, но лежит ниже. Профиль температур смеси 70%АШ/30%Г подобен профилю газового угля, кроме температуры во второй секции, это можно объяснить воспламенением антрацита, которое произошло раньше чем в предыдущих режимах.

ВЫВОДЫ

Сжигание смесей антрацита и тощего угля показывает, что добавление более реакционного угля к менее реакционному улучшает стабильность факела и уменьшает расход газа на «подсветку».

Эксперименты по сжиганию смесей антрацита и газового угля доказали возможность улучшить выгорание углерода смеси выше чем рассчитанное значение при условии независимого горения компонентов смеси, что подтверждает существование синергического эффекта в процессах горения смесей угля разной степени метаморфизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майстренко О.Ю., Дунаєвська Н.І, Провалов О.Ю. Звіт про науково-дослідну роботу “Аналіз існуючих та розробка нових технічних рішень зі збільшення діапазону регулювання потужності котлоагрегатів ТПП-210А енергоблоків 300 МВт”. – 2010. С.55.(№ держреєстрації 0110U005144).
2. Безценний І.В., Дунаєвська Н.І., Євтухов В.Я. Спалювання сумішей вугілля при роботі пиловугільних котлоагрегатів // Новини енергетики. – 2009. – №7. – С. 32-39.
3. Чернявский Н.В., Дунаевская Н.И. Динамика конверсии малометаморфизированных углей при газификации в потоке // Труды Всесоюзн. симпоз. «Проблемы газификации углей». – Красноярск: КАТЭКНИИэнергетики, 1991. – С.76-83.
4. Щудло Т.С., Безценний І.В. Звіт про виконання НДР «Дослідження спільного спалювання різних видів твердого палива для підвищення ефективності та екологічності роботи котлоагрегатів». – 2009. – С.22. (№ держреєстрації 0109U006265).