

Холод теплообменника ТО-3 целесообразно утилизировать, например, в расположенных поблизости холодильных камерах для хранения продуктов.

Для повышения термодинамической эффективности силового детандерного цикла в каждом конкретном случае необходимо рассматривать следующие основные направления: повышение давления  $P_1$  на входе в детандер; повышение начальной температуры цикла  $T_1$ ; совместное повышение температуры и давления ( $P_1, T_1$ ); рациональный покомпонентный подбор рабочего тела для минимизации потерь эксергии при конечных разностях температур в теплообменниках.

### Список литературы

1. Уніговський Л.М., Частухін В.В., Лактіонов О.В., Куцан Н.В. Можливість постачання скрапленого природного газу в Україну // Нафт. і газова пром-сть. — 2009. — № 1. — С. 7–9.
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. — М.: Энергия, 1968. — 280 с.
3. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Криогенные комплексы производства и отгрузки СПГ, его приема, хранения и регазификации в системе международной торговли // Техн. газы. — С. 2–19.
4. Пятничко А.И., Онопа Л.Р., Лавренченко Г.К. Анализ эффективности производства работы при регазификации СПГ // Там же. — 2010. — № 3. — С. 20–25.

Поступила в редакцию 13.10.10

## The Efficiency of Liquefied Natural Gas Regasification Processes Increase

**Berezovsky V.N., Pyatnichko A.I., Krushnevich T.K.**

*The Gas Institute of NASU, Kiev*

The processes of liquefied natural gas regasification are investigated. The technological circuits that allow significant increase of technological and economic parameters of the processes are developed. The application of steam and condensation power cycle with turbine expander can simultaneously obtain thermal energy for regasification and electrical energy for the cycle internal demands (equipment gears (pumps)) or for external consumers transfers.

**Key words:** regasification, liquefied natural gas, expander, electric power, energy efficiency, pipeline, evaporator, power cycle.

Received October 13, 2010

УДК 662.6

## Исследование стабильности горения смесей углей марок Т и АШ

**Бесценный И.В., Бондзик Д.Л., Щудло Т.С.,  
Нехамин М.М., Евтухов В.Я., Дунаевская Н.И.**

*Институт угольных энерготехнологий НАНУ, Киев*

Представлены результаты экспериментальных исследований стабильности факела при сжигании смесей антрацита и тощего угля. Проанализирована зависимость расхода газа для стабилизации горения от содержания тощего угля в смеси. При помощи программы Ansys Fluent уточнены особенности течения в тракте установки.

**Ключевые слова:** пылеугольное сжигание, угольные смеси, стабильность факела.

Наведено результати експериментальних досліджень стабільності факела під час спалювання сумішей антрациту та пісного вугілля. Проаналізовано залежність витрат газу для стабілізації горіння від вмісту пісного вугілля у суміші. За допомогою програми Ansys Fluent уточнено особливості течії у тракці установки.

**Ключові слова:** пиловугільне спалювання, вугільні суміші, стабільність факела.

На сегодняшний день пылеугольные блоки ТЭС Украины работают с ухудшенными показателями экономичности даже на проектом угле. Это связано с физическим износом, неполными и несвоевременными ремонтами энергоблоков, а также их работой в непроектных режимах. Одним из возможных методов улучшения стабильности горения факела, увеличения степени конверсии углерода и уменьшения расхода природного газа как вспомогательного топлива является сжигание в котлоагрегатах угля с реакционной способностью несколько выше, чем у проектного топлива. Создание смеси углей с различной степенью метаморфизма можно предложить как один из способов повышения реакционной способности топлива. Предполагается, что уголь с большей реакционной способностью будет способствовать воспламенению угля с меньшей реакционной способностью. Это позволит улучшить стабильность факела и уменьшить долю газа на «подсветку» [1].

Одной из основных задач при создании таких смесей является подбор марок угля. Можно предположить, что эффект улучшения воспламенения менее реакционного угля должен быть выше в случае смешивания марок угля, которые существенно различаются по степени метаморфизма. На ТЭС Украины сейчас применяется смесь угля марок Г и АШ. У угля марки Г выход летучих в 3 раза выше, чем у Т, и подмешивание 20 % (мас.) газового угля к антрациту образует топливо с выходом летучих, как у тощего угля [2]. Применение угольных смесей этих марок требует очень надежного контроля характеристик смеси таких, как выход летучих и фракционный состав, так как кратковременное поступление большей доли высокорекреакционного угля в систему размалывания и сушки взрывоопасно. С точки зрения безопасности лучше смешивать угли, подобные по степени метаморфизма, например, уголь марок Т и АШ.

#### Исследование стабильности факела при сжигании смесей углей марок Т и АШ

Эксперименты по изучению стабильности факела смесей антрацита и тощего угля проводились на установке ВВП-100В. Установка моделирует процессы, происходящие в зоне поджога за горелочным устройством и в НРЧ топ-

ки, и была модернизирована для возможности одновременной подачи газообразного и смеси твердых топлив. Она включает вертикальный с нисходящим потоком реактор длиной 2,4 м, который состоит из трех секций с внутренним диаметром 0,28 м и одной с 0,2 м, длиной по 0,6 м, горелочное устройство, шлакосборник, поворотный участок с циклоном, камеру охлаждения и дожигания [3].

Горелочное устройство представляет собой вертикальный водоохлаждаемый футерованный цилиндр внутренним диаметром 0,2 м и длиной 0,5 м, установленный на верхнем срезе реактора, и оборудованный 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 сжигания: антрацита — 100 % (мас.); тощего угля — 100 % (мас.); смеси антрацита и тощего угля — 84 и 16 % (мас.); смеси антрацита и тощего угля — 72,5 и 27,5 % (мас.); смеси антрацита и тощего угля — 56 и 44 % (мас.).

В табл.1 представлены результаты экспериментов по изучению стабильности факела смесей антрацита и тощего угля. Каждый режим длился около 1 ч со стабильными показателями расходов реагентов, температурами и составом газов в реакторе.

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

Первый опыт проводился с целью определения условий стабильного горения чистого ан-

**Таблица 1. Технический анализ углей, используемых в экспериментах в виде пыли**

Уголь	W <sub>r</sub> , %	Ad, %	V <sub>daf</sub> , %
АШ	0,67	27,19	3,73
Т	0,65	24,68	7,65

Таблица 2. Характеристики экспериментальных режимов исследования процессов сжигания угля [4]

Режим	Расход реагентов				Температура газов в секциях, °С				Доля по теплу, %		
	газ, нм <sup>3</sup> /ч	АШ, кг/ч	Т, кг/ч	воздух, нм <sup>3</sup> /ч	1-я	2-я	3-я	4-я	АШ	Т	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

трацита. Режим характеризовался наибольшей долей расхода газа по теплу по сравнению с другими режимами (табл.2). Поскольку антрацитовый факел имеет большое время индукции, для поддержания стабильного его воспламенения необходимо было прогреть стенки горелочного устройства и 1-й секции реактора до 1000 °С. Практически все тепло, которое расходовалось на поддержание температуры футеровки горелочного устройства и 1-й секции, выделялось от сгорания природного газа.

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

В трех последующих опытах использовались смеси антрацита и тощего угля. Экспери-

менты 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 1-й 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: 1) составляющие угольной смеси горят независимо, то есть каждый тип угля горит так, как и при отдельном сжигании. В таком случае следует ожидать линейной зависимости доли газа для стабилизации по теплу от доли более реакционного угля; 2) 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; 3) характеристики стабильности факела смеси будут подобны характеристикам факела более реакционного угля. То есть предполагается, что более реакционный уголь, воспламеняясь раньше, быстрее прогревает частицы менее реакционного угля и тем самым способствует их воспламенению.

Одной из целей проведения экспериментов было определение, которая из трех моделей наиболее адекватна сжиганию смесей антрацита и тощего угля. В табл.3 представлены значения доли газа по теплу, полученные в эксперименте и рассчитанные, исходя из предположения о независимом горении компонентов смеси для пяти режимов. Видно, что значения доли расхода газа во всех трех проведенных на смесях экспериментах

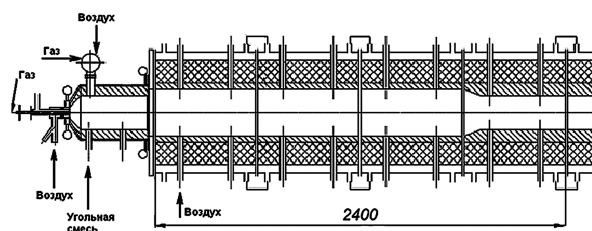


Рис.1. Температура газов вдоль оси реактора.

Таблица 3. Доля газа по теплу

Режим	Эксперимент	Расчет
100 % АШ	0,318	0,318
100 % Т	0,281	0,287
84 % АШ + 16 % Т	0,210	0,260
72,5 % АШ + 27,5 % Т	0,173	0,222
56 % АШ + 44 % Т	0,089	0,089

ниже расчетных, что соответствует третьему варианту развития процесса воспламенения смесей.

В целом эксперименты доказывают, что добавление более реакционного угля к менее реакционному улучшает стабильность факела и уменьшает расход газа на «подсветку». В случае перевода котла с режима работы на антраците с газовой «подсветкой» на режим работы на смесях без расхода (или с меньшим расходом) газа уменьшаются потери с горючими в летучей золе. Во время поддержания стабильности факела с помощью «подсветки», газ горит возле корня факела, уменьшая концентрацию кислорода в зоне воспламенения угля, что приводит к увеличению времени индукции.

Производительность шахт Украины, добывающих уголь марки Т, не в состоянии обеспечить достаточное количество угля для создания смесей для всех антрацитовых блоков, поэтому перспективными в дальнейшем являются исследования процессов воспламенения и горения смесей антрацита и газового угля.

### Расчет течения в тракте реактора

Для уточнения основных особенностей течения в тракте установки было выполнено численное моделирование процессов в ней в трехмерном приближении при помощи программы Ansys Fluent. Оно показало, что в реализованных экспериментальных режимах течение на экспериментальном участке существенно отличается от осесимметричного.

Причиной неравномерности распределения основных параметров потока в поперечных сечениях реактора служит локальность (при радиальной ориентации) части вводов компонентов: угля, газов боковой горелки и прежде всего воздуха, вводимого в 1-ю секцию, одновременно с закруткой воздуха основной горелки. Это следует из векторов скорости в поперечных сечениях по высоте реактора (рис.2). Приведенные данные относятся к режиму сжигания антрацита, но сходные результаты получены и для других экспериментальных режимов.

Вблизи входа в реактор (при  $y = 0,1$  м) заметно влияние закрутки воздуха в основной горелке. Ниже по потоку закрученный поток раз-

бивается воздухом, подаваемым в 1-ю секцию, на два вихря, которые не размываются полностью в верхней половине реактора. При этом компоненты скорости в поперечных сечениях по величине того же порядка (до 4–6 м/с), что и осевая составляющая вектора скорости.

Два вихря слабо обмениваются между собой газовой и дисперсной фазами, что проявляется в сохранении существенной неоднородности полей концентрации компонентов (рис.3) по высоте реактора. При этом областям потока с повышенной концентрацией угольных частиц отвечает пониженная концентрация кислорода вследствие его расходования на горение угля.

Приведенные результаты численного моделирования указывают на необходимость учета особенностей структуры течения в установке ВГП-100В при планировании дальнейших экспериментов и интерпретации их результатов.

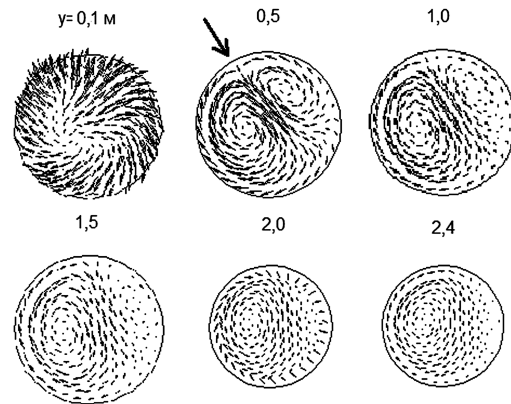


Рис.2. Векторы поперечных составляющих скорости в сечениях по высоте реактора от начала 1-й секции. Стрелка указывает направление ввода воздуха в 1-ю секцию.

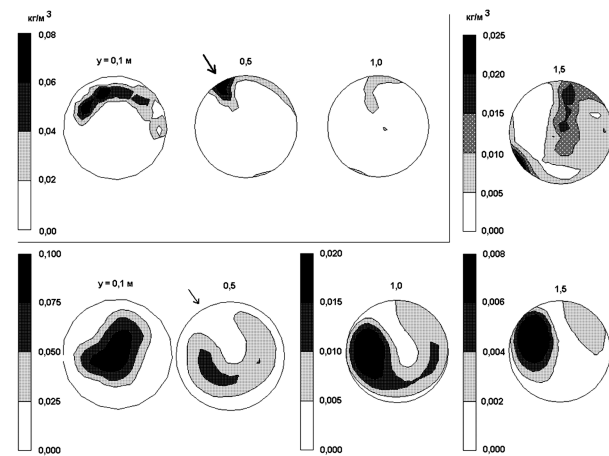


Рис.3. Поля концентрации угольных частиц (вверху) и кислорода (внизу, мольные доли) в поперечных сечениях по высоте реактора.

## Список літератури

1. Безценний І.В., Дунаєвська Н.І., Євтухов В.Я. Спалювання сумішей вугілля при роботі пилувугільних котлоагрегатів // Новини енергетики. — 2009. — № 7. — С. 32–39.
2. Дедов В.Г., Коземко О.М., Ачкасов Є.М. та ін. Досвід експериментального спалювання вугілля Г/А на Трипільській ТЕС // Енергетика та електрифікація. — 2010. — № 3. — С. 49–55.
3. Чернявський Н.В., Дунаевская Н.И. Динамика конверсии малометаморфизированных углей при газификации в потоке // Тр. Всесоюз. симпоз. «Проблемы газификации углей». — Красноярск : КАТЭКНИИЭнергетики, 1991. — С. 76–83.
4. Шудло Т.С., Безценний І.В. Дослідження спільного спалювання різних видів твердого палива для підвищення ефективності та екологічності роботи котлоагрегатів : (Звіт про виконання НДР) / Ін-т вугіл. енерготехнологій. — № ДР 0109U006265. — Київ, 2009. — 22 с.

Поступила в редакцію 01.11.10

## The Investigation of T and AIII Coles Type Blends Combustion Stability

*Bezcennyj I.V., Bondzik D.L., Shudlo T.S., Nehamin M.M., Yevtuhov V.J., Dunaevskaya N.I.*

*Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev*

The experimental result of torch stability investigation during anthracite and lean coal mixes combustion. The dependence of natural gas consumption for combustion stabilization against lean coal content in blends is analyzed. The flow features in unit channel by Ansys Fluent software application are improved.

**Key words:** pulverized-coal combustion, coal blends, torch stability.

Received November 1, 2010

УДК 536.7

## Ексергетический анализ газотурбинного двигателя простого цикла

*Крушневич С.П.*

*Институт газа НАН Украины, Киев*

Разработана термодинамическая модель процесса превращения тепла в работу в газотурбинной установке, позволяющая проводить анализ потерь эксергии в тепловом цикле с целью определения основных направлений его совершенствования. В качестве примера выполнен анализ потерь эксергии в газотурбинном двигателе, работающем по простому циклу Брайтона. Проведен расчет эксергии потоков рабочего тела и определены основные источники потерь в тепловой схеме.

**Ключевые слова:** энтальпия, энтропия, эксергия, газовая турбина.

Розроблено термодинамічну модель процесу перетворення тепла у роботу в газотурбінній установці, яка дозволяє проводити аналіз втрат ексергії в тепловому циклі з метою визначення основних напрямів його вдосконалення. Як приклад виконано аналіз втрат ексергії у газотурбінному двигуні, що працює за простим циклом Брайтона. Проведено розрахунок ексергії потоків робочого тіла та визначено основні джерела втрат у теплової схемі.

**Ключові слова:** ентальпія, ентропія, ексергія, газова турбіна.