

ЭКОЛОГОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПЛАЗМЕННОЙ ПОДСВЕТКИ ТОПЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТОВ

Петров С.В.¹, Забулонов Ю.Л.², Яшар Катирджиоглу Т.³

¹Институт газа Национальной академии наук Украины
ул. Дегтяревская 39, 03113, г. Киев
vizana.sp@gmail.com

²ГУ «Институт геохимии окружающей среды
Национальной академии наук Украины»
пр. Академика Палладина, 34а, 03680, г. Киев
1952zyl@gmail.com

³ARTECS Anadolu R&D Technology Engineering and Consultancy Inc
Ankara, Turkey
tykatircioglu@gmail.com

Разработана и исследована система плазменной подсветки низкорекционных топлив для теплоагрегатов. Надежное и стабильное воспламенение и горение водоугольной суспензии осуществляется с расходом более 100 кг/ч при мощности плазматрона 17,5 кВт. Обеспечивается полное выгорание углерода с выделением тепловой мощности более 290 кВт. Плазменная система является маломощным компактным модулем, вписывается в конструкцию пылеугольного котлоагрегата. *Ключевые слова:* плазменная подсветка, маломощный плазматрон, низкорекционный уголь, водоугольная суспензия, вредные выбросы.

Екологоенергетичний аспект плазмового підсвічування низькорекційних палив для теплоагрегатів. Петров С.В., Забулонов Ю.Л., Яшар Катирджиоглу Т. Розроблена та досліджена система плазмового підсвічування низькорекційних палив для теплоагрегатів. Надійне та стабільне спалахування та горіння водоугольної суспензії здійснюється з витратами понад 100 кг/год. за потужності плазматрона 17,5 кВт. Забезпечується повне вигорання вуглецю з виділенням теплової потужності понад 290 кВт. Плазмова система являє собою малопотужний компактний модуль, що вписується в конструкцію пилоугольного агрегата. *Ключові слова:* плазмове підсвічування, малопотужний плазматрон, низькорекційне вугілля, водоугольна суспензія, шкідливі викиди.

Ecologo-energy aspect of plasma lighting fuel for heat aggregates. Petrov S., Zabulonov Y., Yasar Katircioglu T. A system for the plasma lighting of low-reaction fuels for heat-generating sets was developed and investigated, when coal used in the boiler can be used as the ignition and accompanying combustion of fuel. In this study brown coal BR-1 was adopted. It is shown that reliable and stable ignition and combustion of coal-water suspension from such coal is carried out at a flow rate of more than 100 kg/hr with a 17,5 kW plasmatron power. The lifetime of electrodes of such a plasma torch is more than 1000 hours. In the plasma coal burner, complete carbon burn-out is achieved with the release of a thermal power of over 290 kW. The plasma system is a low-power compact module that fits into the design of a pulverized coal boiler and allows excluding additional high-reaction fuel - fuel oil or gas. *Key words:* plasma lighting, low-power plasmatron, low-reaction coal, water-coal suspension.

Постановка проблемы. Существует много мировых энергетических прогнозов относительно угольной отрасли, которые в основных показателях близки между собой. Баланс между энергогенерирующими секторами определяют конкретные аспекты политических мер, связанных с энергетической эффективностью угольных станций и снижением экологического ущерба от использования угля.

Из прогноза Британской нефтегазовой компании BP следует, что до 2050 года уголь будет основным источником тепловой и электрической энергии в мире, независимо от развития возобновляемых источников энергии [1]. Во многих документах, например, «Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года» говорится, что уже в скором времени доля

угля должна значительно увеличиться в топливном секторе, достигнув 32-35% и т. д. Но пока это только теория. Следует учесть, что в оптимистичных прогнозах закладываются новые технологии топливоспользования, в том числе и так называемые «технологии чистого угля», которые в настоящее время активно разрабатываются, однако проблема остается открытой.

На сегодняшний день реальность такова, что, начиная с середины 1960-х годов, пылеугольные ТЭС, которые до настоящего времени являются базовыми, достигли предела своего совершенства, определяемого законами термодинамики и свойствами материалов, из которых изготавливаются котлы и турбины. При этом за прошедшие годы одновременно существенно повысились капиталь-

ные затраты на строительство ТЭС в связи с ужесточением требований к защите окружающей среды от вредных выбросов и стоимость производства электроэнергии на угольных ТЭС значительно возросла, а их привлекательность снизилась. Главной причиной значительного повышения стоимости производства электроэнергии на угольных ТЭС, построенных в основном в 1960–1970-х годах, специалисты-теплоэнергетики обоснованно признают использование в котлах этих станций крайне неэффективной технологии факельного (пылеугольного) сжигания угля [2]. Причина в том, что для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения (подсветки пылеугольного факела) обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых постоянно растет. Проблема обостряется в теплоэнергетике, где используются котлы малой и средней мощности с турбулентными вихревыми пылеугольными горелками. Для таких котлов характерны режимы с переменной тепловой нагрузкой. В этом случае практически все время требуется мазутная подсветка пылеугольных горелок и мазут становится не дополнительным, а вторым основным топливом. При таком сжигании угля содержание углерода в золошлаковых отходах достигает 20–30%. Сдерживающими факторами при использовании угля в энергетике всегда были чрезвычайно грязная технология и низкая эффективность его сжигания. Обычные, работающие на угле, энергостанции производят аномально большое количество выбросов двуокиси серы (SO_2), двуокиси азота (NO_2), главная проблема угля – пепел и микрочастицы от сжигания в отходящих газах. На стоимость тепловых электростанций на угольном топливе наибольшее влияние оказывали ужесточившиеся требования к удалению газообразных, жидких и твердых отходов. На системы газоочистки и шлако-золоудаления современных тепловых электростанций приходится 40% капитальных затрат и 35% эксплуатационных расходов. С технической и экономической точек зрения наиболее значительным элементом системы контроля выбросов является установка для очистки дымовых газов. Система газоочистки является обязательной на всех строящихся тепловых электростанциях на пылеугольном топливе и повышение её эффективности остается актуальной.

Следует отметить, что для Украины тепловые электростанции, работающие на низкосортных углях, являются базовыми [3]. Поэтому следует ожидать, что обостряющийся дефицит мазута и газа, повышение их стоимости актуализируют разработки и внедрение технологий эффективного безмазутного сжигания высокозольной низкорекреационной угольной пыли. В настоящее время принято считать, что масштабные проекты с долгосрочной окупаемостью труднореализуемы, поэтому приоритет, исходя из такой логики, должен отдаваться комплексным проектам, направленным на совместную оптимизацию

экономических и экологических показателей работы энергогенерирующих предприятий [4]. Уголь относительно дешев, эффективен и его много, а инновационные изменения в технологической базе энергостанций, работающих на угле, восстанавливают его привлекательность. Кроме того, альтернативы использованию угля в энергетике, особенно в развивающихся странах, на сегодня нет. Успех может иметь более чистый и эффективный процесс его сжигания. В таком ключе приложены усилия авторов.

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения проблемы высокоэффективного использования низкосортных твердых топлив при минимальном отрицательном воздействии на окружающую среду в 1983 году по предложению ведущих специалистов в области плазменной техники и технологии М.Ф. Жукова, Л.С. Полака и др., поддержанному Госкомитетом по науке и технике, были начаты работы по созданию принципиально новой плазменной технологии сжигания пылевидного топлива с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов [5]. Были проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования процессов розжига и подсветки пылеугольного факела, разработана теория термохимической подготовки топлива к сжиганию (ТХПТ) [6–9]. Впервые плазменная технология розжига была применена на Гусиноозерской ГРЭС на котлах типа ТПЕ – 215, БКЗ – 640, БКЗ-420. Эти разработки долго не получали промышленного распространения и только начали использоваться в течение последних лет на угольных электростанциях развитых стран мира. Сегодня в Китае данной технологией оснащены более 470 угольных котлов суммарной мощностью блоков более 200 млн кВт, что составляет примерно 30% от общей установленной мощности страны. Плазменный розжиг используется также в Индонезии (6 блок Индонезийской ТЭС «Суналая», Монголии (Улан-Баторская ТЭС), Тайвани (1, 2 блоки Хопингской электростанции, Словакии (ТЭС «Вояны») [4]. Плазменно-топливные системы (ПТС) уже испытаны на большом количестве энергетических котлов паропроизводительностью от 75 до 670 т/ч и оборудованных различными типами пылеугольных горелок (прямоточных, муфельных и вихревых). При испытании плазменно-топливных систем сжигались угли всех сортов (бурый, каменный, антрацит и их смеси). Содержание «летучих» в них составляло от 4 до 50%, содержание золы – от 15 до 48%, и теплота сгорания была в диапазоне от 1 600 до 6 000 ккал/кг. Хотя эти станции с ПТС подключены к сети, дают электроэнергию, они должны проработать до принятия решения о тиражировании проекта после полного цикла испытаний.

Технология ПТС заключается в ударном нагреве части аэросмеси (угольная пыль + воздух) пылеугольной горелки электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной газифика-

ции коксового остатка. Это является достаточным при сжигании низкосортных углей (при постоянной работе плазмотрона) и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной, необходимой для достижения растопочных параметров котла, работе плазмотрона. По разным оценкам электрическая мощность, потребляемая плазмотроном, не превышает 2,5% от тепловой мощности пылеугольной горелки, и составляет 0,3–0,5% от тепловой мощности котла. Принципиальная проблема, которая сдерживает промышленную реализацию плазменно-угольной технологии, заключается в необходимости использования достаточно мощных плазмотронов (свыше 200 кВт). Мощность плазмотрона определяется минимальными относительными затратами энергии, равными отношению тепловых мощностей плазмотрона и пылеугольной горелки, для АШ составляет 1,5–2,0%. Реальный ресурс непрерывной работы таких плазмотронов в лучшем случае составляет 200–300 часов (декларируется больший, но в реальных условиях никто его не может продемонстрировать). Такого ресурса вполне достаточно для розжига, но не для подсветки [10; 11].

Следует отметить, что с целью повышения ресурса топливно-плазменной системы проводятся исследования по использованию СВЧ-плазмотронов [3; 12], поскольку они не требуют применения специальных угольных или медных электродов, а также потому, что в них возможно создание критической концентрации электронов, т.е. к ударному термическому воздействию подключить плазмохимические эффекты. Это способствует раннему воспламенению холодной углевоздушной смеси и при относительно малых временах взаимодействия угольных частиц с плазменным факелом (~ 0,05 с) интенсивному выгоранию углеродных частиц.

Примечательно, что горение во влажной среде, которое также имеет место в водоугольном топливе при определенных условиях, сопровождается подавлением образования окислов азота. Впервые это было обосновано авторами [13], была предложена методика термодинамической оценки влияния увлажнения воздуха горения на образование оксидов азота при горении. В основу соответствующей концепции положен учет связи термодинамически равновесной концентрации в продуктах сгорания с концентрацией и температурой исходных реагентов. Опытные данные, приведенные в работе [13], с которой сравниваются результаты термодинамических расчетов, свидетельствуют о более существенном подавлении фактического выхода по мере увлажнения воздуха горения по сравнению с трендом изменения термодинамически равновесных концентраций. Соответствующие оценки требуют учета процессов переноса и горения. Результаты моделирования представлены на рис. 1 [14]. Установлено монотонное сокращение выбросов оксидов азота по мере повышения содержания в воздухе. Показано,

что гидроксил является важнейшим окислительным компонентом образования.

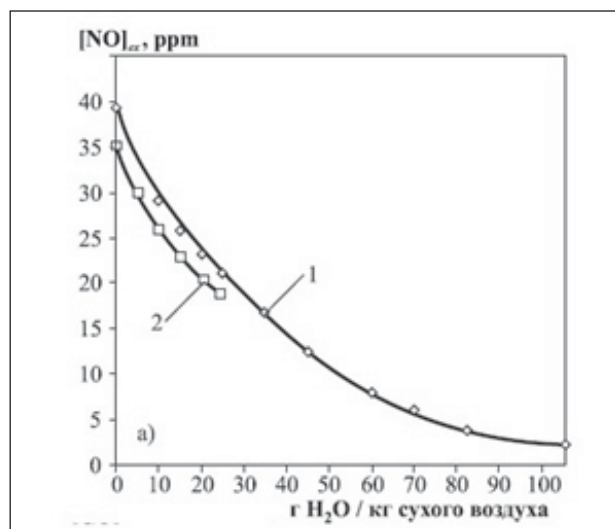


Рис. 1. Зависимости $[NO]$ на выходе из камеры сгорания от влагосодержания воздуха. $T_w = 1200K$. T_a : 1 – 325K, 2 – 300K

Целью данной работы является преодоление основного недостатка плазменно дуговых систем ТХПТ, связанного с ресурсом работы плазмотрона, и обоснование возможности их применения для розжига и подсветки низкорекреационной угольной пыли с экологической выгодой, а также совершенствование систем пылеудаления в отходящих газах. Основная идея развиваемого авторами подхода заключается в реализации комплексного подхода как на этапе сжигания, так и пылеудаления. Это, во-первых, умножение мощности плазмы с использованием водоугольной смеси из базового низкосортного угля до уровня мощности мазутного факела, необходимого для достижения растопочных и сопровождающих горение параметров котла. При этом используется маломощный (15–20 кВт) специальный плазмотрон с ресурсом работы медных электродов более 1 000 часов. Во-вторых, снижение в 5 и более раз уноса пыли за счет увеличения (на порядок и более) величины интенсивности турбулентности в очистной системе.

Изложение основного материала. На первом этапе разработки технологической схемы процесса была приготовлена активированная водоугольная суспензия (ВУС) в двух исполнениях из бурого угля марки БР-1, техническая характеристика которого приведена в таблице 1.

Процесс получения ВУС (исполнение 1), осуществляемый по традиционной схеме, включал следующие операции: дробление исходного угля до размера частиц 3 мм; тонкий помол угля в мельнице совместно с водной фазой и перемешивание. Для приготовления и исследования ВУС из бурого угля БР-1 использовалась лабораторная шаровая барабанная двухкамерная мельница МБЛ-100. Масса

разовой порции угля, загружаемого в мельницу – 10 кг. Соотношение угля и воды определяли по сухой массе угля таким образом, чтобы концентрация суспензии соответствовала заданному значению. В мельнице уголь измельчали преимущественно до класса 0–0,4 мм. Содержание фракции менее 50 мкм составляло ~60%. Время измельчения в мельнице – 60 минут. Концентрацию твердой фазы, полученной ВУС, определяли высушиванием при температуре 105 °С, гранулометрический состав – методом влажного фракционирования на ситах по стандартной методике. Реологические характеристики определяли на универсальном ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1. Суспензии готовились с использованием питьевой воды и добавлением пластификатора (NaOH). Добавка вводилась на первой стадии помола совместно с водной фазой. Таким образом было получено достаточное для проведения испытаний количество ВУС со следующими характеристиками:

- содержание твердой фазы в ВУС – 52,3%;
- концентрация добавки – 0,1% в расчете на сухую массу угля;
- структурная вязкость – 0,7 Па·с;
- начальное напряжение сдвига – 12,5 Па;
- стабильность – до 30 сут.;
- предел текучести – 1,2–1,4 Па;
- низшая теплота сгорания суспензии – 10500 кДж/кг.

Стабильность готовой ВУС определяли при хранении в аккумулирующем бункере с использованием пробоотборных устройств на нескольких уровнях. При низком качестве суспензию возвращали на переработку в мельницы. После завершения этапа приготовления водоугольную суспензию из резервуара для хранения насосом подавали на сжигание в топливно-плазменную горелку.

Приготовление ВУС (исполнение 2) выполняли кавитационным измельчением угля в водной среде без

применения химических присадок в дезинтеграторе мокрого помола – «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА», в который подавался уголь с размером частиц не более 10 мм. Перед подачей в дезинтегратор вода проходит подготовку в роторно-импульсном аппарате РИА-150-ВУТ. Выход суспензии с заданными параметрами происходил через 1 минуту после включения аппарата. Получена ВУС с размером частиц до 50 мкм. Данная суспензия сохраняла стабильность на протяжении 5 суток. Считается, что в результате ударно-кавитационного разрушения угля в отличие от традиционных механических процессов помола в мельницах раздавливающе-стирающего действия ВУС приобретает ряд полезных свойств: 1) происходит выделение гуминовых кислот с образованием гуматов, приобретающих желеобразное состояние, что повышает устойчивость против расслоения; 2) высокая эффективность процесса сжигания при активной роли воды, нечувствительность к качеству исходного угля [15; 16].

На основе анализа существующих способов сжигания низкорекреационной угольной пыли и собственных исследований были сформулированы основные принципы оптимальной системы ее воспламенения и сопровождения горения:

- предлагаемая система не должна изменять конструкцию котлоагрегата;
- наиболее сложная часть процесса – воспламенение топлива и его ТХП должна быть вынесена из топочного пространства в специальный модуль, в котором можно контролировать и управлять процессом;
- специальный модуль должен быть компактным, высоко-теплонпряженным, чтобы обеспечить надежное воспламенение топлива на начальной стадии горения, когда оно еще малореакционно;
- наличие различных видов топлива (основное и растопочное) является нежелательным, следует стремиться к использованию одного вида топлива;

Таблица 1

Техническая характеристика угля БР-1

Параметр	Значение	Метод определения
Влага (рабочее сост.)	35.00%	GOST 11014-81
Зола (рабочее сост.)	11.23%	GOST 11022-95
Зола (сухое сост.)	25.00%	GOST 6382-91
Летучие в-ва (рабочее сост.)	22.70%	
Летучие в-ва (сухое сост.)	59.50%	ISO 195796: 2006
Сера (рабочее сост.)	1.46%	
Сера (сухое сост.)	3.33%	
Низшая теплота сгорания (рабочее сост.) Kcal/kg, MJ/kg	3100 kcal/kg, 13.02 MJ/kg	ISO 1928: 2009
Высшая теплота сгорания (сухое сост.) Kcal/kg, MJ/kg	6500 kcal/kg, 27.31 MJ/kg	
Высшая теплота сгорания (сухое беззольное сост.) Kcal/kg, MJ/kg	7500 kcal/kg, 31.51 MJ/kg	

• на сегодняшний день наилучшей системой зажигания и сопровождения горения топлива явилась бы плазменная система;

• управление системой зажигания и сопровождение горения должны осуществляться автоматически при использовании процессора или компьютера.

Для реализации такого подхода в качестве растопочного и сопровождающего горение топлива может быть использован применяемый в котлоагрегате уголь, в данном исследовании принят бурый уголь БР-1. Основной проблемой при использовании ВУС, до сих пор окончательно и качественно не решенной, является его низкая реакционная способность на начальном участке горения. Поскольку активное воспламенение топлива определяет его дальнейшее горение, то эта проблема сдерживает развитие технологии водо-угольного топлива вообще. Усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания водоугольного топлива должны быть направлены, в первую очередь, на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Задача заключается в том, чтобы за малые времена пролета частиц пыли в горелке выгорел твердый углерод и был запущен автотермический механизм горения. Воспламенение и стабилизация горения при использовании ВУС имеет свои особенности [17], которые следует учесть с применением плазменной системы. Это время обезвоживания угольной частицы, которое для размеров менее 50 мкм составит около 0,1 сек с соответствующим временем задержки зажигания в условиях термического удара плазмы. Время задержки зажигания связано с диаметром частиц и обусловлено, скорее всего, необходимостью достижения условия полного испарения воды из её пористой структуры. Для каждого характерного размера частицы ВУС есть предельные по температуре внешней среды условия зажигания. Это обусловлено ростом затрат на нагрев и испарение воды в пористой структуре частицы угля. Можно условно выделить два режима воспламенения: низкотемпературный (< 950 К) и высокотемпературный (> 950 К). Это обусловлено тем, что при более высоких температурах внешней среды прогрев частицы происходит более интенсивно. Для мелких частиц ВУС (< 0,4 · 10⁻³ м) различие времен задержки зажигания несущественно. В общем случае в диапазоне температур внешней среды (T_c = 900 ÷ 1300 К) различие между временами задержки воспламенения не превышает 30%. Воспламенение происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в пористой структуре частиц угля, но при достаточно низких температурах поверхности. В зависимости температуры поверхности угольной частицы от времени до момента её воспламенения можно выделить три характерных участка. Первый соответствует интервалу времени прогрева частицы до температуры кипения (или близкой к ней) и означает ее полное «обезвоживание». Второй участок соответствует

периоду прогрева и термического разложения сухого угля. После этого выполняется условие воспламенения ВУС и в дальнейшем температура растёт до значений, соответствующих горению. Варьирование массовой доли компонент (воды и непосредственно угля) в достаточно широком диапазоне не оказывает существенного изменения условий и характеристик зажигания малых по размерам частиц водоугольной смеси.

Анализ существующих методов показывает превосходство плазменной технологии как более простой и удобной, чем розжиг с использованием растопочного топлива. Что касается влияния плазмы, то следует отметить, что общей теории протекания реакций пароплазменной газификации в неравновесных условиях, а во многих случаях даже и подхода к ней не существует. Имеющийся материал разрознен и крайне немногочислен. Здесь можно ожидать самых неожиданных проявлений. Низкотемпературная плазма атмосферного давления содержит большое количество заряженных и нейтральных активных частиц. Эти активные частицы с высокой способностью излучения энергии могут существенно ускорять химические реакции, снижая энергию активации, и осуществлять возможность проведения реакций, которые в нормальных условиях затруднительны. Экспериментальные подтверждения существенного влияния радикалов на пароплазменную газификацию угля в условиях дуговой плазмы атмосферного давления получены в работе [18]. Уголь в условиях плазмы подвергается реакциям быстрого разложения и диссоциации с выделением летучих веществ и коксового остатка, которые при дальнейшем разложении образуют большое количество активных частиц, включая углеводороды, возбужденные С и Н атомы и т.д. Затем образуются различные газы CO, H₂ и CO₂, благодаря сложному комплексу параллельно-цепных реакций. Такие газы, как CO₂ и H₂, преобразуются или конвертируются в CO с выделением множества активных частиц, таких как OH, H радикалы и электроны, которые принимают участие в реакциях (с 1 по 11) окисления по схеме рециклинга: H₂O + e* → OH + H + e (1), OH + OH → H₂O + O (2), Coal $\xrightarrow{\Delta}$ Char + Volatile (3), Volatile / Char + e* → C_mH_n + H + C + C₂ + e (4), C + OH → CO + H (5), H + H + M → H₂ + M (6), CO + OH → CO₂ + H (7), CO + O + M → CO₂ + M (8), H + CH → H₂ + C (9), CH + O → CO + H (10), CO + e* → CO⁺ + 2e (11).

В ходе проведения данной исследовательской работы была разработана, смонтирована и испытана лабораторная установка по сжиганию водоугольного топлива с плазменным зажиганием и сопровождением горения для получения исходных данных при проектировании топливно-плазменной горелки в составе котлоагрегата, работающего на низкорационной угольной пыли. Установка включала в себя основные элементы, необходимые для обеспечения

процесса розжига и поддержки стабильного процесса горения ВУС: система хранения и регулируемой подачи ВУС; система водо- и газоснабжения; плазменная аппаратура с топливно-плазменной горелкой. Розжиг горелки и стабилизация пламени производились плазмотроном мощностью до 30 кВт (так называемый плазмотрон малой мощности). Это плазмотрон линейной схемы с двумя соосными цилиндрическими электродами и вихревой стабилизацией дуги (Рис. 2). Плазмотрон охлаждается водой. Плазмообразующим газом является воздух. При работе на воздухе среднемаховая температура плазменной струи составляла примерно 4 000 К, тепловой КПД – около 80%.

Была применена такая система плазменного воспламенения при розжиге плазменно-угольной горелки, когда плазмотрон располагался по оси жаровой трубы. Вид экспериментальной плазменно-угольной горелки (плазмотрон, совмещенный с жаровой трубой) в работе приведен на рис. 3. Плазменная струя, подведенная к корню факела распыляемого топлива, разогревала и зажигала бурогоугольную ВУС. На рис. 4 приведена плазменная струя при подаче ВУС.

В плазменно-угольной горелке (рис. 2) решена задача достаточно быстрого смешения поперечно подаваемого сырья и теплоносителя в минимальном объеме реакционной зоны. Смешение происходит в интенсивно соударяющихся между собой встречных струях ВУС. В этом случае столкновение струй приводит к их самодроблению и интенсивной турбулизации потока. Взаимодействие потока горячей дуговой плазмы с распыленной холодной ВУС начинается в зоне прианодной части столба электрической дуги. Оптимизация смесителя сводилась к выбору такой геометрии (диаметр и угол раскрытия канала сопла плазмотрона, диаметр и углы отверстий для подачи ВУС по отношению к оси канала плазмотрона), при которой обеспечивается равномерное распределение распыленной ВУС в канале. Количество поперечных струй – 2 либо 4. Следует отметить, что для обеспечения требуемой дальности необходимо было с высокой точностью поддерживать величину гидродинамических параметров – небольшие изменения расходов или температуры приводят к весьма значительным колебаниям дальности. Все это необходимо учитывать при проектировании плазмохимического смесителя.

Процесс горения ВУС в топливно-плазменной горелке (рис. 4) можно вести в двух режимах – режиме «полного выгорания» и режиме «газификации». Первый обусловлен подачей всего воздуха, необходимого для горения непосредственно на вход жаровой трубы, второй предполагает работу горелки с недостатком окислителя. Во втором случае дополнительный воздух вдувается в переходный газодод или топку котла. Таким образом, режим «газификации» предполагает ступенчатое сжигание топлива.

Геометрическая схема топливно-плазменной горелки, предназначенной для обработки указанных технических решений в лабораторных условиях, имеет две секции: плазменный модуль предгазификации, содержащий плазмотрон с форкамерой и модуль газификации/полного выгорания (жаровая труба с $Du = 150$ мм) с узлом вдува вторичного воздуха. В экспериментах по газификации жаровую трубу теплоизолировали.

Процесс розжига водоугольной суспензии осуществлялся в следующем порядке. Включался плазмотрон (рис. 3) и осуществлялся прогрев форкамеры до появления светимости внутренней поверхности участка. После прогрева форкамеры потоком плазмы в течение 1,5–2 мин до температуры 700–750°C открывался кран на трубопроводе, осуществлялась подача ВУС с расходом 100–400 кг/час (рис. 4) и происходило устойчивое зажигание и стабильное горение ВУС. При работе плазмотрона были зафиксированы следующие параметры: диаметр сопла анода – 10 мм, длина форкамеры – 20 мм, внутренняя поверхность форкамеры и жаровой трубы обмурована теплоизоляционным материалом. Расход плазмообразующего воздуха $G = 20$ $л/мин$, ток дуги



Рис. 2. Плазмотрон для топливно-плазменной горелки



Рис. 3. Экспериментальная плазменно-угольная горелка в работе

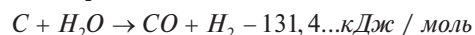
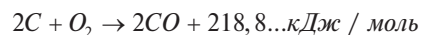
$I = 50$ А, напряжение на дуге $U = 350$ В, мощность $N = 17,5$ кВт, длина начального участка плазменной струи – 15 см. Плазматрон работал устойчиво как в режиме прогрева плазмы, так и при подаче суспензии через форсунки.

В процессе исследований подтвердились эрозийные характеристики электродов плазматрона (рис. 2). Эрозия медного полого катода в воздушной атмосфере составляет порядка $\approx 2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл, средний уровень эрозии анода ниже и составляет $\approx 4 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл. Эрозия медных электродов в основном определяется плотностью теплового потока, температурой поверхности и скоростью перемещения приэлектродных участков дуги. При обеспечении хорошей стабильности работы электродов сегодня можно говорить о гарантированном ресурсе в воздушной среде катода плазматрона (рис. 2) более 1 000 часов, анода – 2 000 часов при токе 50 А и глybине срабатывания материала $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Наибольший интерес с научной и практической точек зрения при переработке ВУС в топливно-плазменной горелке представляет режим газификации. Возможность проведения процесса газификации в данной конструкции при недостатке окислителя гарантирует режим «полного выгорания». Исследованиями, выполненными в работе [19], установлено, что при температурах процесса 1500–2500 К практически единственными компонентами синтез-газа, получаемого при газификации ВУС, являются H_2 и CO . Содержание их в газовой фазе достигает 93–97%. Энергетические затраты при этом составляют 3,0–3,5 кВт·ч/кг, теплота сгорания получаемого синтез-газа при плазменной газификации составляет 11,5–12,5 МДж/м³ и на 10–30% превышает теплоту сгорания газа при парокислородной газификации. Это обусловлено повышенным содержанием водорода ($H_2=50\text{--}55\%$) в синтез-газе, который получают при плазменной газификации угля по сравнению с содержанием водорода ($H_2=35\text{--}45\%$) при парокислородной газификации. Для снижения энергетических затрат процесса плазменной газификации

ВУС целесообразно использовать комбинированную алло-автотермическую газификацию, сочетающую плазменную ступень с традиционной автотермической ступенью газификации.

Лимитирующая стадия – это процесс газификации твердого углерода ВУС, что происходит за счет протекания двух основных реакций:



Исследования кинетической характеристики ВУС с помощью дериватографа [18] показывают, что горение происходит с высокой скоростью даже при низких температурах 300–400°C, когда заканчивается горение летучих и начинается переход к выгоранию коксового остатка. Таким образом подтверждается тезис о том, что усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания ВУС должны быть направлены в первую очередь на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Эта задача решается с помощью плазматрона малой мощности. Дальнейший процесс автотермического окисления будет определяться в основном разницей между количеством тепла, которое выделяется в результате первой реакции, и теплом, которое поглощается в результате второй реакции.

В результате исследований [20] подтверждено, что при распылении ВУС образуется полидисперсный поток, содержащий как чисто угольные частицы, так и водоугольные капли, имеющие в своем составе тонкие угольные частицы, окруженные жидкой фазой. Очевидно, что механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока капель ВУС различны. Для проектирования новых конструкций горелок и определения оптимальных режимов работы выполнены базовые экспериментальные исследования на стенде (рис. 3) по степени среднемассового выгорания углерода по длине с соответствующим распределением температуры стенки футерованной жаровой трубы. Забор пыли осуществлялся водоохлаждаемым зондом по оси жаровой трубы. На рис. 5 приведены усредненные зависимости степени выгорания углерода (а) и распределения температуры стенки (б) по длине жаровой трубы плазменно-угольной горелки для ВУС исполнения 1. Видно, что основной выход летучих и их горение происходят в зоне подачи вторичного воздуха, где избыток воздуха очень мал (порядка 0,2–0,4), за счет тепла, излучаемого футеровкой. Горение же коксового остатка продолжается по всей длине при подаче всего воздуха необходимого для горения в жаровой трубе, и степень выгорания топлива на выходе, равная $\leq 90\%$ (дальнейшее дожигание коксового остатка должно проходить в следующей секции или в топочной камере котла). Температура стенок соответствовала верхнему пределу измерения $\leq 1100^\circ\text{C}$. При использовании ВУС исполнения 2 степень

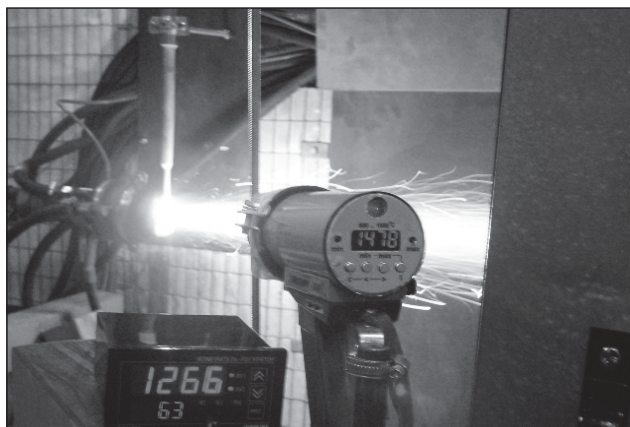


Рис. 4. Плазменная струя, подача ВУС

выгорания углерода и соответственно температура стенки повышаются приблизительно на 10%. Причина пока не понятна, но чтобы связать этот эффект с лучшей активацией угольной пыли, необходимы дополнительные исследования. Исходя из степени выгорания углерода при расходах ВУС 100–300 кг/час, можно заключить, что при использовании плазмотрона для интенсификации воспламенения на начальном участке мощностью 17,5 кВт может быть получена тепловая мощность в выходном факеле порядка 260–700 кВт.

На сегодняшний день реальность такова, что ухудшение качества топлива, моральное старение, физический износ котлов и оборудования привели к снижению КПД котлов до 80 ÷ 82% и увеличению до 40 ÷ 45% (по тепловыделению) доли природного газа или мазута. При этом дефицитное высокорекреационное топливо расходуется не только на подсветку пылеугольного факела, но и на компенсацию дефицита угольной пыли, вызванного недостаточной произво-

дительностью при работе котла на топливе ухудшенного качества. Предлагаются различные варианты решения проблемы, но они в основном частичные [20]. Реальный путь повышения эффективности работы котлов прежних поколений при работе на низкосортных углях ухудшенного качества, а также полного отказа от использования остродефицитного нефтегазового топлива без кардинального изменения технологии сжигания и конструкции топочного устройства – поэтапная реконструкция существующих котлоагрегатов путем модернизации или замены существующих технологий и оборудования на комбинированные плазменные системы (рис. 6).

Исходя из того, что масштабные проекты с долгосрочной окупаемостью труднореализуемы, а оптимизация экономических и экологических показателей работы энергогенерирующих предприятий может осуществляться за счет модернизации существующего оборудования, авторами разработана инновационная нестандартная технология высо-

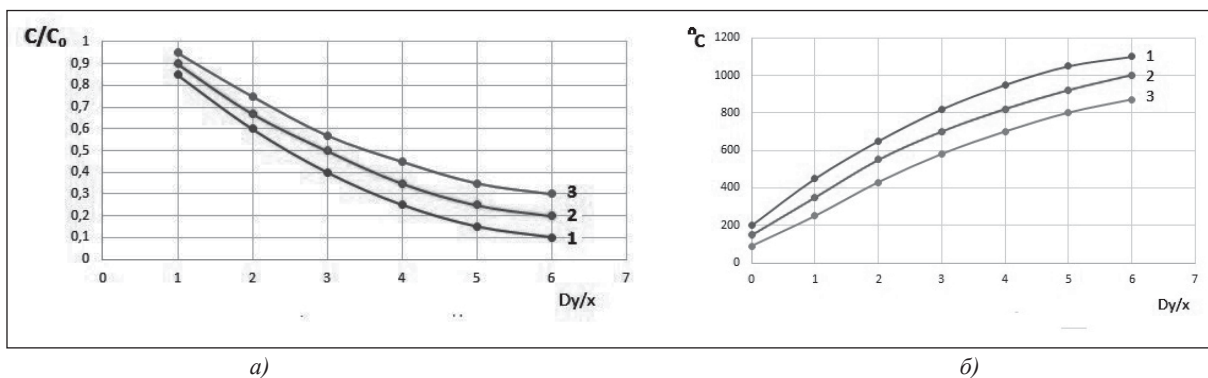


Рис. 5. Зависимости распределения по длине жаровой трубы а- степени выгорания углерода, б – температуры стенки. 1 – расход ВУС 100 кг/час, вторичного воздуха – 150 ; 2 – расход ВУС 200 кг/час, вторичного воздуха – 300 ; расход ВУС 300 кг/час, вторичного воздуха – 450

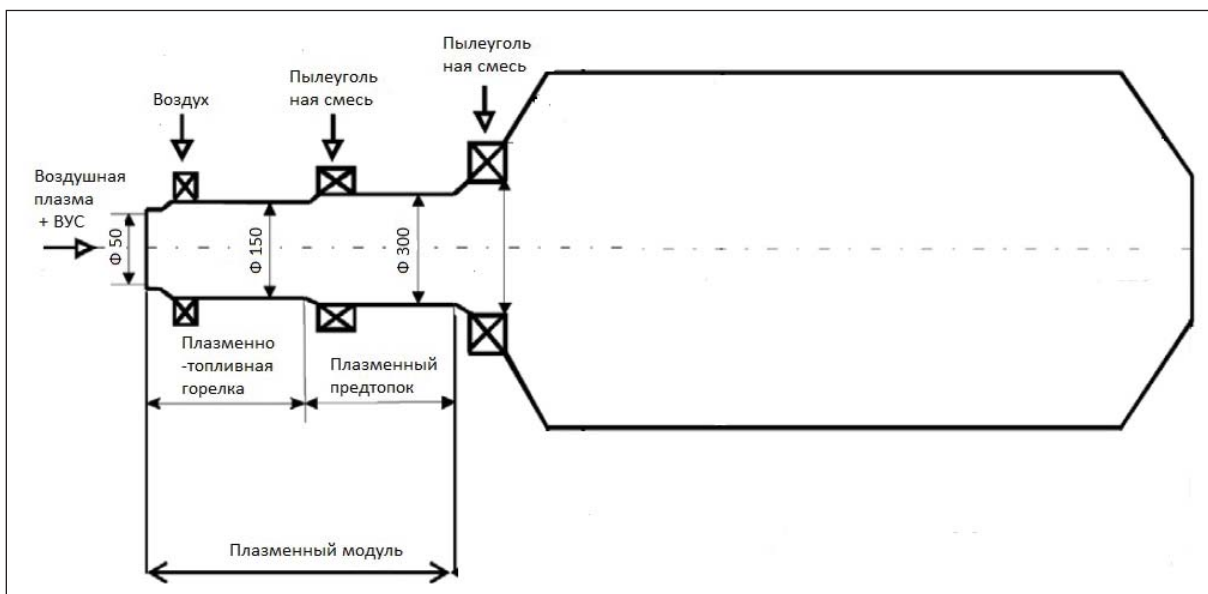


Рис. 6. Геометрическая схема плазменного модуля для розжига и подсветки пылеугольного факела

коэффициентного пыле-золоулавливания. Основной идеей инновационной технологии является создание с помощью генераторов турбулентности (различных плохобтекаемых тел – цилиндров, клиньев, полос) повышенной степени турбулентности газа в активной зоне взаимодействующих фаз – на струйном участке сухих циклонов, в зоне распыления жидкости в мокрых скрубберах. Разработан новый метод снижения в 5 и более раз (в зависимости от дисперсности улавливаемой пыли) уноса пыли из сухих циклонов – за счет увеличения (на порядок и более) величины интенсивности турбулентности на струйном участке циклона, расположенным в зоне вхождения газового потока в корпус циклона и характеризующимся перестройкой скорости потока, наличием условий для создания нестационарных процессов тепло- и массообмена. При этом резко возрастает интенсивность протекания процессов переноса субстанции – в том числе и осаждения частиц пыли на ограждающие поток поверхности – на стенку внутренней поверхности циклона, на поверхность движущихся к выгрузному отверстию циклона «жгутов» пыли. Для мокрых аппаратов улавливания пыли (скрубберов Вентури, механических и др.) использование предложенного метода повышения степени улавливания пыли за счет увеличения (на порядок и более) величины интенсивности турбулентности в зоне взаимодействия фаз – капель жидкости, газового потока, частиц аэрозоля позволяет снизить конечную запыленность газового потока более чем в пять раз.

В зависимости от конструкции каплеуловителя золоочистной установки определяется место размещения генератора турбулентности для обеспечения максимальной величины пофракционной степени

очистки. На рис. 7 приведены результаты компьютерного моделирования распределения скорости и интенсивности турбулентности потока газа в разных зонах каплеуловителя диаметром 3 200 мм (с генератором турбулентности, размещенном на расстоянии 300 мм от фланца входного патрубка) золоочистной установки МВ-УООРГЭС котла «БКЗ-160-100ПТ».

На рис. 8 приведено распределение интенсивности турбулентности во входном патрубке каплеуловителя при оптимальном месте размещения генератора турбулентности – на расстоянии 0,2 м от фланца.

Основные результаты промышленной проверки новой системы очистки (при сжигании угля) дымовых газов парового котла «БКЗ-160-100ПТ (паропроизводительность 160 т/час) следующие: при степени очистки типового каплеуловителя – 87,75%, с генератором турбулентности – 97,7%. Снижение конечной концентрации пыли после реконструкции каплеуловителя составляет в 1,75 раза. Дальнейшее снижение выбросов золы уноса и доведением эффективности очистки до уровня 99% и выше возможно при модернизации не только каплеуловителя, а и других систем очистки (конфузора трубы Вентури, газохода перед конфузором трубы Вентури).

Перспективы использования результатов исследования. Из приведенного анализа и исследований можно заключить, что плазменная технология как более простая и удобная для розжига и сопровождения горения низкорекреационных углей, чем с применением растопочного топлива, может быть рекомендована для использования в энергетике. Улучшение экономических и экологических показателей работы энергогенерирующих предприятий может осуществляться за счет модернизации существующего оборудования.

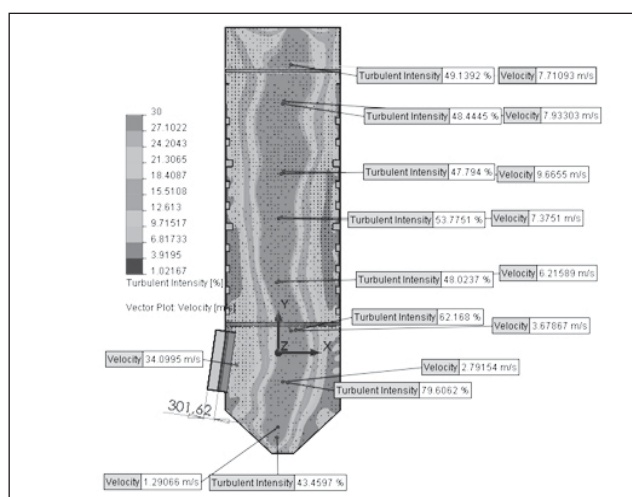


Рис. 7. Распределения скорости и интенсивности турбулентности потока газа в разных зонах каплеуловителя диаметром 3 200 мм (с генератором турбулентности, размещенном на расстоянии 300 мм от фланца входного патрубка) золоочистной установки МВ-УООРГЭС котла «БКЗ-160-100ПТ»

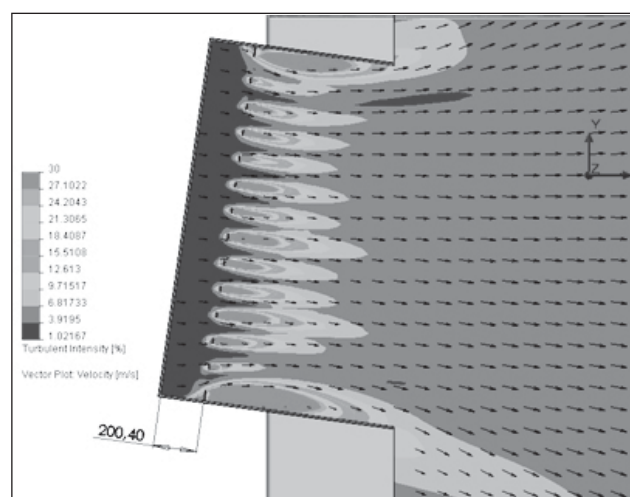


Рис. 8. Распределение интенсивности турбулентности во входном патрубке каплеуловителя при оптимальном месте размещения генератора турбулентности – на расстоянии 0,2 м от фланца

Література

1. BP Statistical Review of World Energy June 2011. URL: https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/de_de/PDFs/brochures/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf
2. Кравченко А. Глобальные проблемы украинской теплоэнергетики. *Электрик*. 2013. № 9. С. 38–41.
3. Канило П.М., Ваврив Д.М., Шунеман К., Соловей В.В., Костюк В.Е., Костенко К.В. Альтернативные технологии сжигания низкорекреационных углей в теплоэнергетических установках без дополнительного использования мазута или природного газа. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 10 (36). С. 82–90.
4. Karpenko E. I., Karpenko Yu. E., Messerle V. E., Ustimenko A. B. Using Plasma-Fuel Systems at Eurasian Coal-Fired Thermal Power Stations. *Thermal Engineering*. 2009. № 6 (56). P. 456–461.
5. Тимошевский А.Н., Засыпкин И.М., Ващенко С.П., Комарицын В.К. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной. *Новости теплоснабжения*. 2002. № 1 (17). С. 14–21.
6. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / Под. ред В.Е. Мессерле. Новосибирск: Наука. 1996, 415 с.
7. Жуков М.Ф. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 315 с.
8. Жуков М.Ф., Калиненко Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 199. 200 с.
9. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно энергетические технологии топливоиспользования. Новосибирск: Наука, 1998, 385 с.
10. Kalinenko R.A., Kuznetsov A.P., Levitsky A.A., Messerle V.E., Mirokhin Yu.A., Polak L.S., Sakipov Z.B., Ustimenko A.B. Pulverized Coal Plasma Gasification. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1993. №1 (13). P. 141–167.
11. Петров С.В., Литовкин В.В. К вопросу о применении плазмы для эффективного сжигания низкорекреационных углей. *Энергетика и электрификация*. 2005. № 3. С. 36–40.
12. Казанцев В.И., Ваврив Д.М., Канило П.М., Расюк Н.И., Шунеман К., Грицаенко С.В., Тымчик А.В., Мессерле А.В. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей. *Теплоэнергетика*. 2002. № 12. С. 39–44.
13. Hermann F., Klingmann J., Gabriellson R. Computational and Experimental Investigation of Emissions in a Highly Humidified Premixed Flame. *Proceedings of 2003 ASME Turbo Power for Land, Sea & Air*. June 16–19, 2003. Atlanta, Georgia, US. GT 2003–38337.
14. Сорока Б.С., Згурский В.А. Моделирование процессов переноса и образования вредных выбросов при сжигании природного газа с воздухом, увлажненным в цикле Майсоценко. *Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии*. 2013. № 1 (13). С. 403–409.
15. Yun, Zengjie, Guoguang Wu, Xianliang Meng, Yuliang Zhang, Frank Shi, Yaqun He, and Xiaoqiang Luo. A Comparative Investigation of the Properties of Coal–water Slurries Prepared from Australia and Shenhua Coals. *Mining Science and Technology*. 2011. № 3 (21). P. 343–347.
16. Морозов А.Г. Гидроударные технологии в производстве водоугольного топлива. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2010. № 2 (32). С. 12–15.
17. Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов. дис... канд. техн. наук: 05.14.14. Томск, 2014. 130 с.
18. Xiaojun He, Tengcai Ma, Jieshan Qiu, Tianjun Sun, Zongbin Zhao, Ying Zhou and Jialiang Zhang. Mechanism of coal gasification in a steam medium under arc plasma conditions. *Plasma Sources Science and Technology*. 2004. № 13. P. 446–453.
19. Булат А.Ф., Шумриков В.В., Алымов Б.Д., Холявченко Л.Т., Васильев Л.М. Плазменная газификация водоугольных топлив. *Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины*. 2006. Вып. 67. С. 185–196.
20. Syed Muzammil, Waqas Ahmed BE., Fattah Moin Jah. Coal Water Slurry in Energy Sector. *International Conference on Engineering Sciences, Institute of Chemical Engineering & Technology, University of Punjab*. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/221705161_Coal_Water_Slurry_in_Energy_Sector.
21. Glushkov D., Strizhak P., Vershinina K. (2015). The Research of Coal-Water Slurry Fuel Ignition and Artificial Composite Liquid Fuel Droplets in Academic Context. XV International Conference “Linguistic and Cultural Studies: Traditions and Innovations”, LKTI 2015, 9–11 November, Tomsk, Russia. P. 295–300.
22. Шуваева Н.М., Борисенко О.М., Борисенко О.А. Повышение эффективности подготовки к факельному сжиганию низкорекреационных углей Украины. *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2005. № 36. С. 124–129.