

***К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ  
ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ УГЛЕЙ***

Петров С.В., докт. техн. наук, Литовкин В.В., канд. техн. Наук

Ключевые слова: плазма, низкореакционные угли, энергетика, топливообеспечение, розжиг, подсветка, технология сжигания

На протяжении многих лет стратегия развития отечественной энергетики базировалась на увеличении доли газа и мазута в топливном балансе. Такая тенденция во многом определялась технологическими проблемами горения и ценовой политикой. Сегодня можно говорить, что она себя исчерпала. Прогноз, сделанный в «Энергетической стратегии России на период до 2020 года» предусматривает достижение равенства цен на уголь и газ к 2005 году, а к 2020 году выхода на соотношение цен уголь/газ как 1:2 [1]. В Украине угольная промышленность является основным поставщиком собственного топлива. Такая ситуация сохранится и в будущем благодаря большим запасам угля. Однако, несмотря на декларирование о приоритетности развития угольной отрасли реальных изменений пока не происходит, действенные меры по повышению эффективности сжигания традиционных видов топлива, в том числе угля, на базе новых технологий не принимаются. Все это ведёт к тому, что уровень энергобезопасности Украины остается слишком низким. Основным фактором, который обуславливает такое положение, является монополярная зависимость от импорта Российского природного газа и нефти [2]. Доля топлива в общих расходах на производство энергии на электростанциях Украины достигла 80,5 %, рентабельность составляет 2,2 %. По оценкам экспертов ожидается тенденция изменения топливного баланса энергетики в сторону повышения доли угля при ухудшении его качества с упором на малотоксичные технологии сжигания. А общий рост потребления тепловой и электрической энергии может привести к еще большему увеличению расхода твердого топлива.

Обеспечение сгорания углеродсодержащих компонентов каменных углей с малым выходом летучих-горючих веществ было достигнуто благодаря развитию в угольной электроэнергетике нескольких направлений: камерные топki с жидким шлакоудалением, циклонные предтопки с пылевидной подачей топлива, вихревые топki с пережимом.

Испытывались различные схемы топливоподготовки и аэродинамические принципы смесеобразования пылевоздушных потоков. Однако, внедренные в электроэнергетике котлы с вихревыми горелками для блоков 150, 200, 300, 800 МВт практически эксплуатировались с большим механическим недожегом топлива: для АШ составляет 20-35%, для тощего угля марки Т – 15-18%. При пониженных температурах горячего воздуха и ведении топочного процесса в диапазоне температур 1850-2070 К механический недожег в золе-уносе может быть и больше [3]. Значительные топочные потери требовали определенных усилий для организации экономичной работы топок. При энергии активации для реакции  $C + O_2 = CO_2$  у коксов твердого топлива (Т, АШ) равной 140 -146 МДж/кмоль требовалось компенсировать недостаток тепла при сжигании высокозольных, низко реакционных углей мазутом или газом. Это продолжалось почти полвека и в золоотвалы было отправлено десятки миллионов тонн недогоревшего углерода.

С 80-х годов XX века начавшийся рост цен углеводородного сырья (нефть, газ) стимулировал поиск новых путей розжига и поддержания устойчивого горения энергетических углей. А дефицит растопочного топлива (при низких ценах) потребовал развития альтернативных технологий растопки и создания нового котельно-топочного оборудования. В СССР после 1985 г. В области горелочной техники развивались два направления ступенчатого сжигания с термохимической подготовкой (ТХП) угольной пыли:

-газовые (мазутные) муфельные горелки, встроенные коаксиально в центральную втулку вихревой пылеугольной горелки (двухулиточные, улиточно-лопаточные):

-горелки, оснащенные плазмотроном и камерой ТХП [4].

Анализ работ, связанных с методами сокращения использования газа и мазута на пылеугольных ТЭС показывает, что практика инженерных методов снижения потребления дорогих импортных энергоносителей не достигла успехов во внедрении термохимической подготовки топлива прежде всего из-за ошибочно формируемых технических заданий. Во-первых, подменялась задача инициирования воспламенения низко реакционного топлива с незначительным выходом горючих-летучих веществ задачей компенсации недостаточной калорийности топлива, что на современном этапе развития горелочной техники ступенчатого сжигания невозможно. Последняя задача тупиковая для пылеугольных котлов с открытыми и полукрытыми топочными камерами и сохраняющимися горелками первоначальной конструкции. Во-вторых, не учитывалось изменение механизма реакций. Так при термическом разложении топлива, активированном повышенной температурой, образуются промежуточные соединения, которые существенно изменяют механизм реакции по сравнению с условиями

воспламенения рециркулирующими газами с температурой 1500-1700 °С. В [3] приведены данные, свидетельствующие о том, что уголь в процессе термической подготовки от 600 °С до 700 °С имеет в 2 раза более высокую реакционную способность, чем при одностадийном доведении до температуры воспламенения в 700 °С. В-третьих, оставались несогласованным физические параметры пыли (размер частиц, время пребывания, концентрация в объеме окислителя) с конструктивным исполнением устройств термохимической подготовки пылевидного угля.

Ожидаемые тенденции в топливообеспечении энергетики, ориентированные на повышение роли угля на тепловых станциях, и ужесточение экологических требований обуславливают необходимость существенных изменений в технологической структуре производства электроэнергии. В первое время несомненный приоритет в использовании ограниченных инвестиционных ресурсов получают малозатратные и с коротким инвестиционным циклом проекты. Увеличение доли угля в топливном балансе за счет замены газа и мазута может произойти на уже существующих энергетических объектах. К числу наиболее подготовленных технологий с коротким инвестиционным циклом может быть отнесена система плазменного розжига и подсветки.

Плазменная техника нашла широкое применение в промышленности, но, к сожалению, обойдена вниманием электроэнергетикой. Сориентировав полвека тому назад процессы воспламенения угля на мазуте и газе, ТЭК сегодня не восприимчив к практике применения плазменных процессов для организации топочных процессов в котлах большой мощности. Тем не менее для повышения эффективности сжигания угля создаются новые плазменно-топливные системы. Они являются основным элементом при реализации плазменно-энергетических технологий. Среди них – пылеугольные горелки, оснащенные электродуговым плазмотроном и комбинированные плазменные газификаторы для ТЭС. Плазменно-топливные системы обеспечивают безмазутную растопку пылеугольных котлов, стабилизацию горения факела и, как следствие, одновременное снижение мехнедожога топлива, образования оксидов азота и сернистых соединений.

Плазменно-энергетические технологии основаны на плазменной термохимической подготовке угля к сжиганию. Она состоит в нагревании электродуговой плазмой воздушно-топливной смеси (аэросмеси) до температуры выделения летучих угля и частичной газификации углеродного остатка. Вследствие этого, независимо от качества угля, из воздушно-угольной смеси получается высокорекреакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ и коксовый остаток). Когда это топливо подается в топку, то при смешении со вторичным воздухом, оно воспламеняется и устойчиво горит без сжигания

дополнительных топлив (мазута или природного газа), традиционно используемых для растопки котлов и стабилизации факела низкосортных энергетических углей.

Плазменно-топливные системы испытаны на 26 энергетических котлах паропроизводительностью от 75 до 670 т/ч и оборудованных различными типами пылеугольных горелок (прямоточные, муфельные и вихревые горелки) [5]. 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 интервале от 1600 до 6000 ккал/кг.

В результате испытаний доказано, что плазменные технологии безмазутной растопки котлов и стабилизации факела имеют следующие преимущества перед традиционными технологиями:

- сокращение расхода мазута и газа на ТЭС;
- энергетическая эффективность плазменно-топливных систем - 3-4 раза выше, т. к. относительная электрическая мощность плазмотронов составляет (в зависимости от типа угля и горелки) лишь 0,5-2% от тепловой мощности пылеугольной горелки;
- замещение стабилизирующего топлива (мазута или природного газа) углем позволяет снизить образование оксидов азота на 40-50% из-за преобразования топливного азота в молекулярный азот в обедненных кислородом зонах воспламенения и сжигания, выделения оксидов серы снижается на 30-40% (если углем замещается высокосернистый мазут), а выбросы пятиоксида ванадия подавляются почти полностью;
- снижение эмиссии диоксида углерода благодаря повышению эффективности процесса сжигания на пылеугольных котлах в результате уменьшения мехнедожога топлива;
- возможность растопки энергетических блоков ТЭС при потере собственных паровых нужд станции;
- использование широкой гаммы энергетических углей, лигнита, горючего сланца, торфа, биомассы и их смесей при сохранении технических, экономических и экологических показателей энергетических блоков.

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 никто его не может продемонстрировать).

Сегодня не видны пути существенного повышения ресурса медных электродов. Другие, способные реально обеспечить значительно больший ресурс, это: самовосстанавливающийся из газовой фазы катод, вольфрамовый, расходуемый графитовый - применительно к энергетике не рассматриваются. Скорость эрозии медных электродов (катода и анода) определяется многими факторами и особенно величиной тока дуги. Причем, эрозионные характеристики анода и катода могут как полностью совпадать, так и обнаруживать значительное расхождение – в зависимости от динамики приэлектродных процессов. В воздушной среде существует критический режим – значение тока, при превышении которого эрозия материала резко возрастает. Причиной появления критического режима является потеря устойчивости вращения потока газа в полости электрода. Поэтому при создании плазмотрона для энергетики к числу основных вопросов относится обеспечение неизменности уровня удельной эрозии электродов при длительной работе в диапазоне докритических токов. 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. После 50 часов работы в приповерхностном слое материала электродов появляются растрескивания по границам зерен. Причем, у катода на более значительную глубину вдвое по сравнению с анодом. Эрозионная поверхность у анода меньше окисляется, чем катодная. Эрозия медных электродов в основном определяется плотностью теплового потока и скоростью перемещения приэлектродных участков дуги. При обеспечении хорошей стабильности работы электродов сегодня можно говорить о гарантированном ресурсе в воздушной среде катода 200 часов, анода – 1000 часов при токе 200 А и глубине срабатывания материала  $6 \cdot 10^{-3}$  м. Поэтому реальный путь использования плазмотронной техники в энергетике – это снижение мощности плазмотронов на порядок (с 300 до 30 кВт), что даст такое же увеличение ресурса электродов, т.е. составит тысячи часов. Это главное. В дополнение улучшается экономика, так как тепло от электричества значительно дороже тепла от угля.

В Институте газа НАН Украины разработан новый подход ТХП пылеугольного топлива, обеспечивающий как улучшенные технико-экономические показатели плазменной аппаратуры и процесса, так и получение приемлемого для энергетики ресурса непрерывной работы плазмотронов [6,7]. Выполнены поисковые работы, конечной целью которых было снижение необходимой мощности плазмотрона (соответственно установленной мощности электрооборудования) для устойчивого горения пылеугольной смеси с обеспечением более, чем 10 кратного умножения тепловой мощности струи. Это достигается благодаря повышению скорости горения низкорреакционных углей за счет использования технологически значимых плазменных эффектов. Дальнейшим развитием

данного подхода является проведение в плазменно-струйном реакторе высокотемпературной паровой конверсии с получением синтез-газа и высокореакционных частиц несгоревшего топлива. Исследования проведены на разработанных комбинированных плазменно–угольных горелочных устройствах для установки на прямоточные пылеугольные горелки (Рис.1).

Оценки показывают, что встроенные плазмохимические реакторы в горелки мощностью  $50 \div 100$  МВт (Рис.2) позволяют применить плазмопиролиз в присутствии воды или пара ( $H_2O$ ) и при неполной газификации получить  $1,5 \div 1,8$   $nm^3/kg$  синтез-газа с содержанием  $CO + H_2$  до  $95 \div 98\%$  при соотношении  $CO/H_2$  как 1/1. Котельная подсветка плазменным синтез-газом в размере  $3000$   $nm^3$  эквивалентна расходу электроэнергии до  $1,2 \cdot 10^3$  кВт·ч. Это как раз те летучие-горючие вещества, которые необходимы для сжигания низкорекреационного АШ в указанных горелках.

Принципы проектирования плазменно-угольных систем для их последующего промышленного использования сформулированы в результате расчетов и сопоставления с экспериментальными данными [8,9]. Математическое моделирование процесса плазменной переработки угля позволяет не только проверить воздействие отдельных параметров плазмохимического реактора на форму и характеристики факела, но также рассчитать влияние различных характеристик топлива на характер воспламенения и стабильность факела. В экспериментах в качестве топлива использовалась угольная пыль Донецкого антрацита марки АШ фракцией до 250 мкм. Тепловая мощность плазменной струи регулировалась в пределах  $5 - 50$  кВт. Угольная пыль, транспортируемая воздухом, подавалась с одного, двух и трех питателей в воздушную плазменную струю плазменно-горелочного устройства. Расход угольной пыли через один питатель дозатор составлял  $1 - 15$  г/сек. Исследовано влияние следующих факторов на повышение скорости окисления угля: 1) Длина начального участка плазменной струи – изменялась в пределах 3-7 калибра при одинаковых среднemasовых параметрах на срезе сопла плазмотрона; 2) Высокочастотная пульсационная составляющая тока дуги плазмотрона с амплитудой  $(0,1 - 0,5)$   $In$ ; 3) Акустические воздействия; 4) Электрический потенциал плазменно-угольного факела. Оценка скорости окисления угольных частиц проводилась по их недожегу на выходе плазменно-горелочного устройства, Проводилось полное калориметрирование факела, определялись количество, фракционный состав, зольность угольной пыли на входе и выходе плазменного горелочного устройства. Также измерялись температура и скорость частиц, покидающих горелку. Доказано, что с помощью указанных выше внешних маломощных физических воздействий на высокотемпературную зону горения угольной пыли можно в 3-5 раз увеличить скорость реакций их окисления. При этом резко

повышается количество выгоревшего угля и мощность факела. Практически на такую же величину можно снизить необходимую тепловую мощность плазмотрона. При работе на пониженной мощности плазмотрона снятие (например) потенциала с запыленной струи приводит к затуханию пылеугольного факела и при продувании пыли через раскаленный муфель.

Умножение мощности пылеугольного факела и плазменная стабилизация горения несгораемой в данных условиях низкорекционной угольной пыли демонстрируется на Рис.3.

Из экспериментальных исследований (Рис.3) и расчетов (Рис.4) можно сделать вывод, что факт более чем десятикратного умножения мощности доказан. Кроме того, при поперечном вдуве пылеугольного факела, инициированного в плазменноугольном реакторе (Рис.2) в основной поток поджигаемой угольной пыли его эффективность будет заметно (в несколько раз) выше, чем у плазменной струи той же тепловой мощности. Поскольку объем и дальнобойность у пылеугольного факела значительно больше, поэтому соответственно большим у него будет и объем области взаимодействия с поджигаемой пылью. Кроме того, в факеле содержится достаточно большое количество нагретых до высокой температуры коксовых частиц крупных фракций. Глубоко проникая в сносящий поток, эти частицы воспламятся при контакте с находящимся в нем кислородом, увеличивая тем самым поджигающий и стабилизирующий горение эффект факела.

Накопленный опыт использования плазменно угольных технологий и выполненные новые исследования свидетельствуют о том, что какие либо физические запреты или непреодолимые технические ограничения для промышленной реализации данной технологии отсутствуют, а польза и преимущества доказаны.

В частности, кроме оговоренного выше, целесообразно отметить следующее. В стремительно развивающейся Европейской интеграции и стоящего на повестке дня порядка выполнения ратифицированного Киотского протокола энергокомпания столкнутся с фактом платежей до 100 Евро/т твердых выбросов. Плазменная технология приближает качество золы ТЭС к Евро стандарту EN450 ( $C \leq 6\%$ ), а ТЭС к порогу максимальной коммерческой выгоды от продажи минеральных отходов промышленности Известны оценки плазмохимически обработанного угольного сырья как полупродукта получения цемента – 40дол/т, цемент из энергетического сырья – 70 дол/т. Во многих странах ЕС промышленные комплексы создаются по каскадному проекту, где отходы, образующиеся на одном предприятии, служат сырьем для другого.

Желающие освоить плазменные технологии необоснованно пугаются стартовых капиталовложений в плазменное электротехническое оборудование. Но без инвестиций в такое оборудование, которое является основным средством производства с длительным сроком безремонтной эксплуатации, нельзя приступить к отработке оптимальных схем плазмохимической обработки, тем более, что приобретаемая техника выполнит как эксплуатационные, так и ремонтные задачи. При незначительном дооснащении плазменной установки она может использоваться в ремонте для плазменной резки и напыления защитных покрытий.

Никто не обсуждает отношение стоимости блочного трансформатора к стоимости блока, без которого оборудование стоимостью в 150 млн. долларов просто склад техники, а стоимость плазменного технологического комплекса окупается за счет ценовой разницы производства электроэнергии на газе и на угле, а это для 1 МВт·ч не менее 8 долларов. В зависимости от используемых углей срок возврата инвестиций на реализацию системы плазменного розжига и подсветки топлива может находиться в пределах от нескольких месяцев до нескольких лет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурашев В.Н., Чернова Г.В. Региональные особенности топливообеспечения энергетики России // сб. Докл. Конференции „Модернизация электростанций, использующих низкорреакционные угли в странах СНГ”, Москва, Россия, 21-22 апреля 2004. – с. 1-13.
2. Куцан Ю.Г., Білодід В.Д. Щодо проекту концепції енергетичної політики України на період до 2003 року. Енергетики и электрификация. 2001.№3.-с. 2-11.
3. Литовкин В.В. О неиспользованных резервах повышения эффективности сжигания низкорреакционных топлив в пылеугольных котлах.//Енергетика и электрификация, №5, 1995г.-с.1-3.
4. Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., Перегудов И.С. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела. Новосибирск: Наука, 1996.- 304 с.
5. Мессерле В., Сакипов З., Ибраев Ш. Электротермохимическая подготовка угля к сжиганию. – Алматы: Наука. – 1993. – 259с.
6. Петров С.В., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. ТОПАС, Киев: 2000.- 218 с.
7. Петров С.В. Плазменная обработка низкорреакционных углей// Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, №11 [63], 2003 .- с.71-80.
8. Петров С.В., Сааков А.Г., Котляров О.Л., Яценко В.П. К проблеме снижения энергозатрат на плазменный розжиг и стабилизацию горения пылеугольного факела// Технічна електродинаміка, 2004, №3, с. 84-87.
9. Petrov S.V., Saakov A.G. Plasma – catalyst of combustion of low-reactive coals// 16<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry. Taormina-Italy. June 21-27, 2003. P. 346-356.

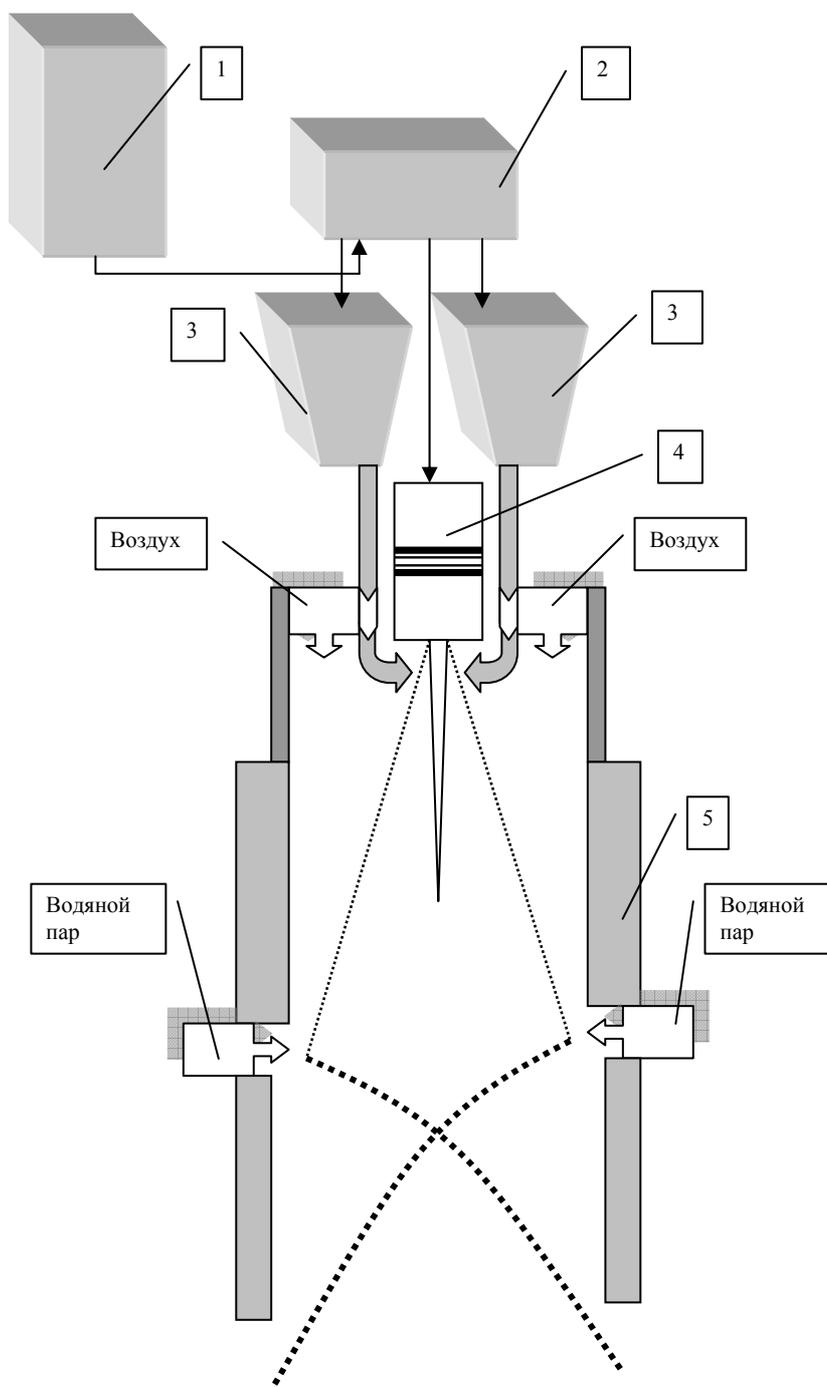


Рис.1 Плазменно-угольное горелочное устройство

1- источник электропитания, 2- пульт управления, 3- питатель-дозатор угольной пыли, 4- плазмотрон, 5- муфель

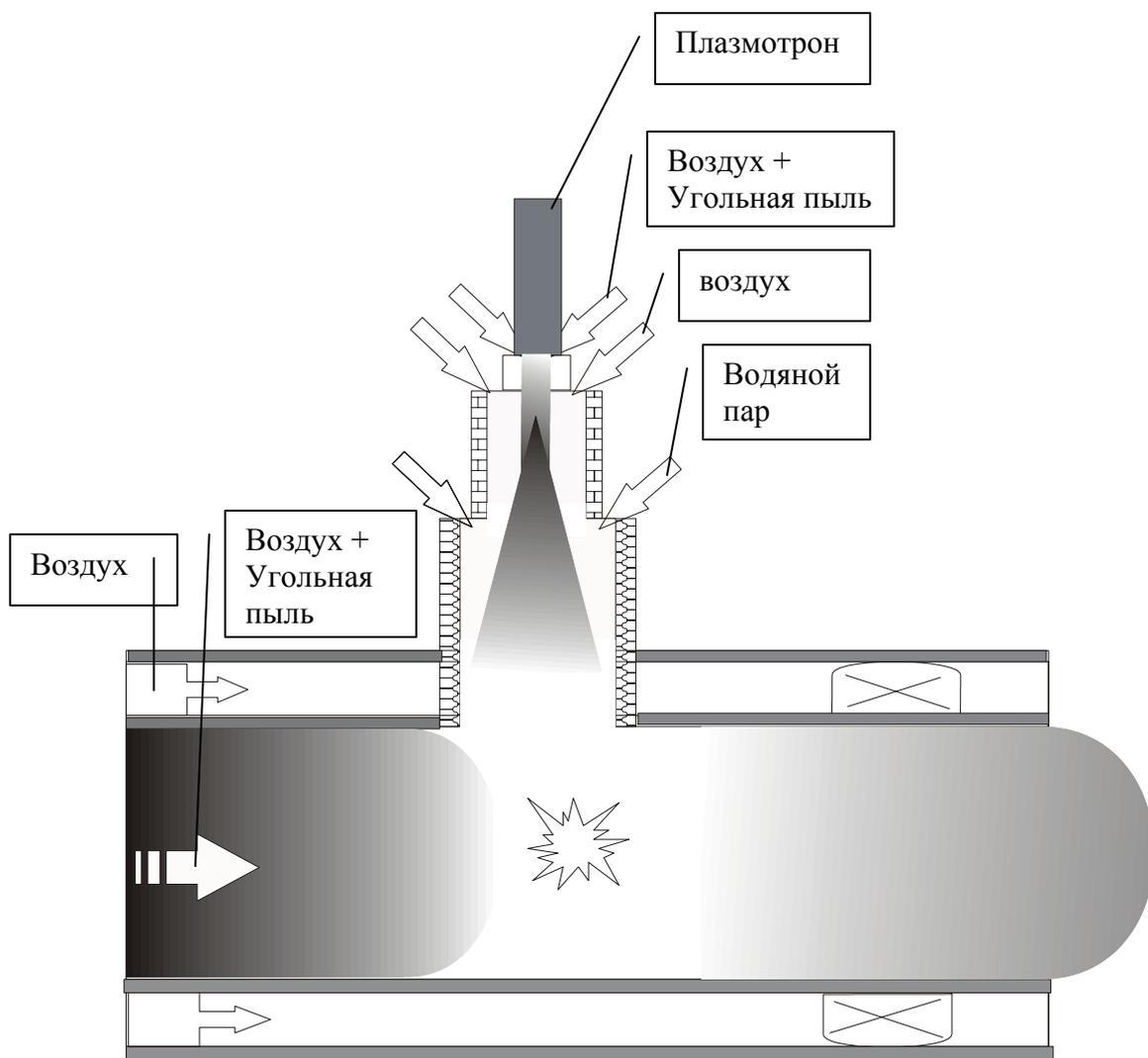
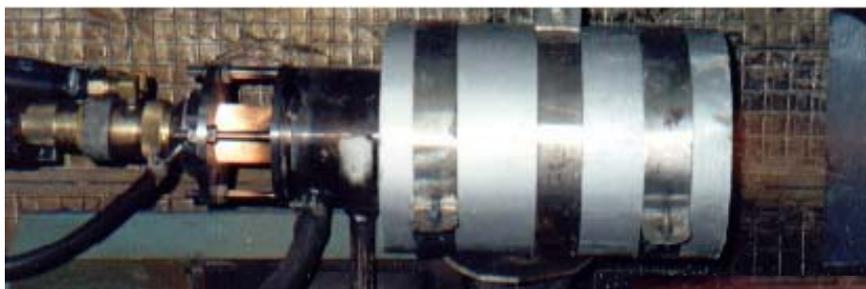


Рис.2. Плазмохимический реактор с проточной пылеугольной горелкой



Плазменная струя 10 кВт



Пылеугольный факел 200 кВт

Рис.3. Умножение мощности в плазменноугольном реакторе

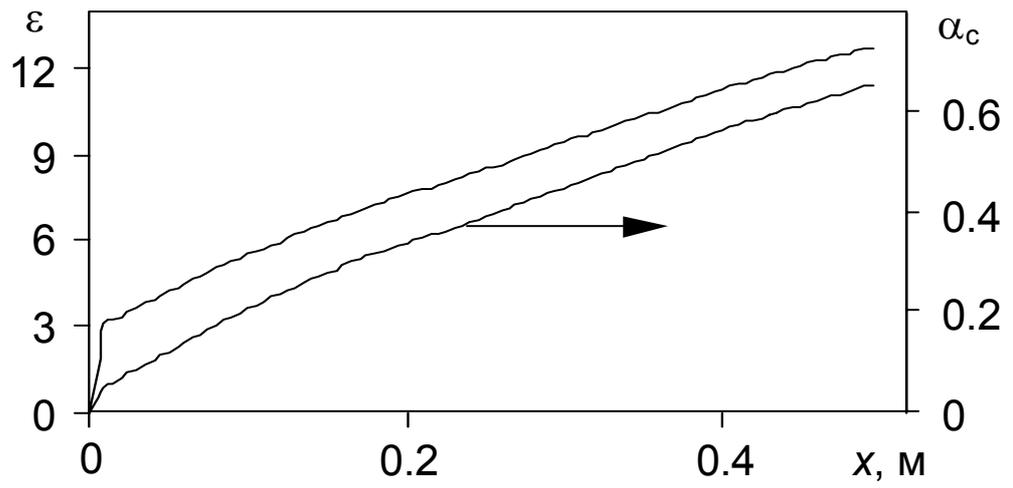


Рис.4. Коэффициенты конверсии угольной пыли ( $\alpha_c$ ) и прироста мощности ( $\epsilon$ ) по длине реактора