

УДК: 537.868.531

УГОЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**Вл.В.Саломатов^{1,2}, С.О.Сладков³, С.Э.Пащенко², Вас.В.Саломатов¹**¹Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск²Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет, г.Новосибирск³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

Аннотация

Приведены данные о масштабных проектах разных стран в части обработки угля СВЧ-энергией. На основе анализа мирового опыта обосновываются преимущества микроволновых технологий в топливно-энергетическом комплексе экономики. Указаны для данного временного этапа области преимущественного применения СВЧ-поля: сушка угля, обработка водоугольной суспензии, получение синтез-газа, зажигание и горение с помощью СВЧ-плазмы, удаление токсичных газов, получение ультрачистого топлива. Именно здесь можно ожидать ускоренного технологического прорыва с достижением высоких показателей по экономической и экологической эффективности. Созданы и успешно функционируют, прежде всего, такие корпорации: Coal Tech Inc, Micro Coal Technologies Ltd, Ukr Plasma Co., деятельность которых направлена на коммерциализацию этих технологий.

Ключевые слова: энергия, топливо, уголь, токсичные газы, синтез-газ

Введение

СВЧ-излучение является экономически и экологически выгодным источником энергии для использования его в угольной энергетике и угольной промышленности. Физические основы применения СВЧ-поля для воздействия на уголь подробно изучены в работе [1], поэтому не требуют здесь дальнейшего рассмотрения. Известно, что микроволновое излучение уже давно используется в угольном секторе развитых и развивающихся стран. Однако анализ этого мирового опыта не проводился до сих пор. Рассмотрение наиболее эффективных разработанных угольных технологий составляет цель данной работы.

Украина обладает большими мощностями по добыче бурых углей. Однако, их высокая влажность не позволяет непосредственное их использование в энергетике. На основе многолетних исследований [2-11] разработана технология СВЧ-плазменного сжигания низкосортных бурых углей. Плазма обладает целым рядом преимуществ [6]: быстрый нагрев (СВЧ-плазма является очень неравновесной, и температура её электронов может достигать нескольких десятков тысяч градусов); энергия плазмы, воздействующая на топливо, является высококонцентрированной в единице объема; большое количество возбужденных частиц, участвующих в процессе (ионов, атомов, ради-

калов); простота автоматизации в силу малой инерционности плазмы. А ее воздействие на угольную пыль приводит к возникновению ряда позитивных процессов: измельчение угольной пыли, отслоение минеральных составляющих (рис. 1) от угля; увеличение скорости реакции и газификация угольной пыли; снижение механического недожога. Все перечисленное повышает стабильность горения. Кроме того, важным положительным эффектом при таком способе воздействия на топливо является то, что удается добиться одинакового воспламенения угля при подаче «холодного» воздуха с температурой $t=10-15$ °С и при подаче предварительно нагретого воздуха с температурой $t=100$ °С [8], т.е. исключается стадия предварительного подогрева воздуха. При этом раннее воспламенение пылевоздушной смеси происходит при температуре <300 °К.

Более того приводится расчет экономической выгоды реализации такого процесса [9]. Известно, что растопка котлов до 30% номинальной паровой нагрузки осуществляется на газе или мазуте. После чего в горелки подается уголь с одновременным постепенным снижением доли растопочного топлива до 6÷10%. В целом растопка котла из холодного состояния обычно осуществляется в течение ~9 ч, из них ~3 ч – на газе или мазуте. Расход газа на растопку котла блока мощностью 200 МВт составляет 53000 м^3 , 60% от этого количества расходуется в начальный период растопки.

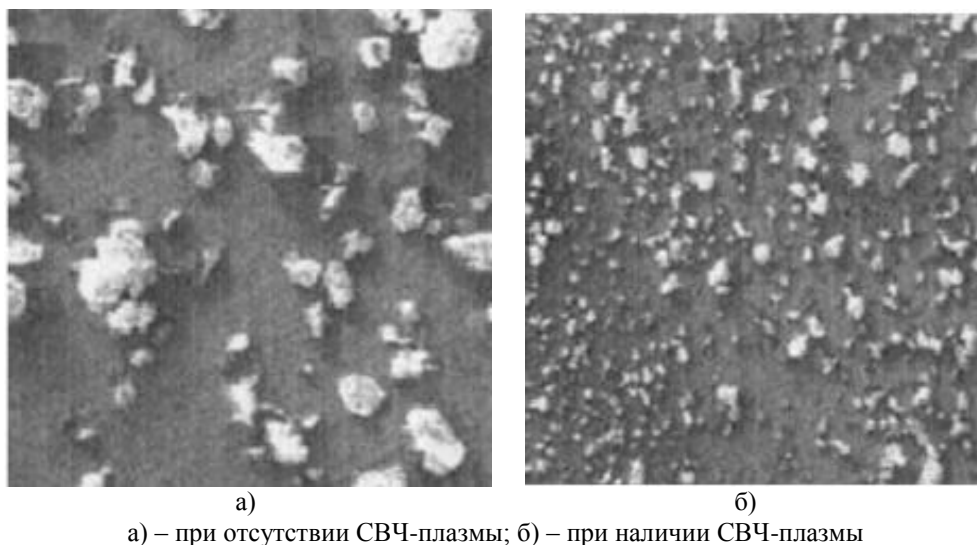


Рис. 1 – Частицы угольной пыли (снимки растрового электронного микроскопа)

Как показывают расчеты, для растопки котлов можно использовать СВЧ-плазмотроны, которые необходимо установить в 50% горелочных устройств (в области пода топки). При этом доля обрабатываемого угля в каждой из плазменных горелок не будет превышать 30%. В этом случае даже при энергозатратах 0.08 кВт·ч на 1 кг угля общая суммарная мощность СВЧ-плазмотронов не превысит 900 кВт, что составляет 0.45% электрической (тепловой) мощности блока. При работе в растопочном режиме всех плазмотронов на максимальной выходной мощности 900 кВт расход электроэнергии за весь период растопки составит 8100 кВт·ч, т. е. около 5% (с учетом КПД блока) от теплоты сгорания соответствующего расхода природного газа. Таким образом, использование плазменных СВЧ-горелок представляется экономически выгодным как за счет снижения затрат на эксплуатацию газового и мазутного хозяйства, так и за счет разности стоимостей используемых видов топлива. Проведены испытания на котельном агрегате (рис. 2) и разработаны схемы и конструкции портативных промышленных СВЧ-плазменных горелок (рис. 3) для их внедрения на ТЭС. Существенным преимуществом является то, что рассматриваемые СВЧ-плазменные горелки можно внедрять в уже имеющиеся промышленные котлоагрегаты, а не производить их полную реконструкцию.

Промышленная СВЧ-плазменная горелка (рис. 3) состоит из прямоугольного волновода 1, коаксиального волновода 2, центральной трубы 3, воздушного канала 4, канала

розжиговой аэросмеси 5, канала основной аэросмеси 6, канала вторичного воздуха 7, воздушного регистра 8, регистра основной аэросмеси 9, огнеупорного покрытия 10.

При дополнительном использовании лопаточного завихрителя (рис. 4) в такой схеме сжигания угля, осуществляется закрутка воздушно-угольной смеси и эффективность сжигания увеличивается еще [10]. На рис. 5 изображен снимок СВЧ-плазменного факела горения угольной пыли с воздухом при наличии закрутки аэросмеси на выходе из плазмотрона. На фото видно, что СВЧ-разряд расщеплен на несколько светящихся шнуров. Причина такого расщепления объясняется неоднородностью уровней температур угольных частиц, что подтверждено измерениями в одном из сечений на выходе из зоны СВЧ-плазмы (рис. 6).

Показано (рис. 7), что при наличии закрутки температура продуктов СВЧ-плазмотермической переработки (угольная пыль + воздух) на выходе из СВЧ-горелки распределена более равномерно, чем при отсутствии закрутки. Равномерность распределения температуры достигается благодаря тому, что закрутка смеси отклоняет частицы угля в радиальном направлении, и они сталкиваются с боковыми стенками горелки. Оттолкнувшись от боковых стенок, частицы устремляются к оси горелки, где закрученный поток опять отклоняет их к боковым стенкам и т.д. Процесс происходит до тех пор, пока частицы не пройдут всю рабочую зону.

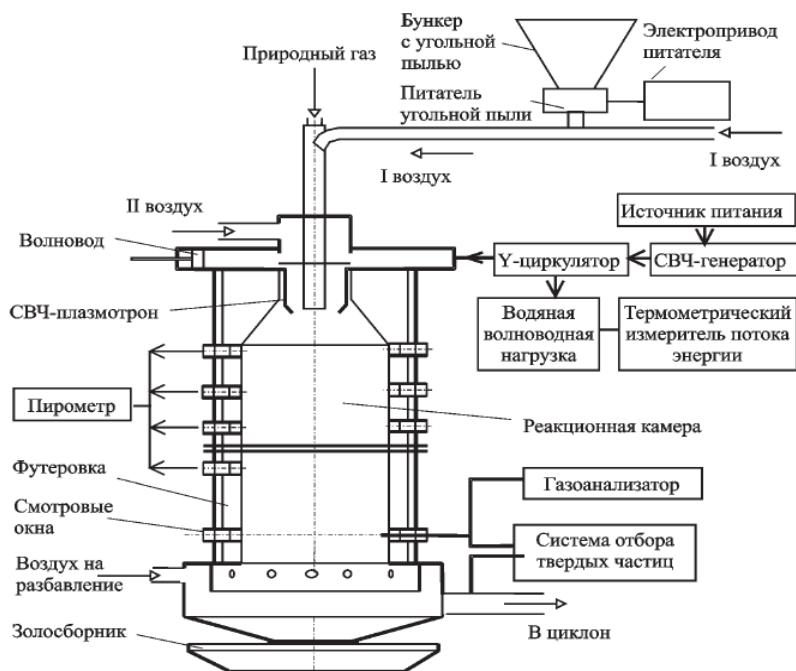


Рис. 2 – Схема реактора для СВЧ-плазменного сжигания угля

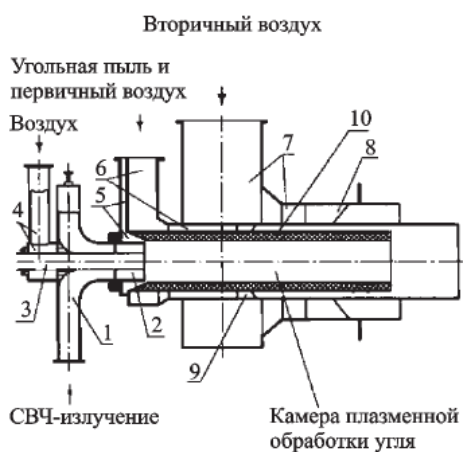


Рис. 3 – Промышленная СВЧ-горелка

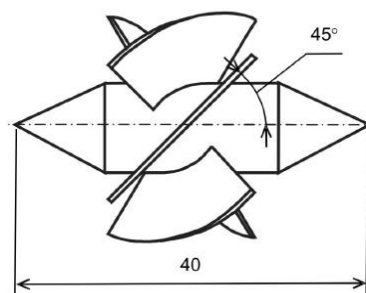


Рис. 4 – Схема лопаточного завихрителя

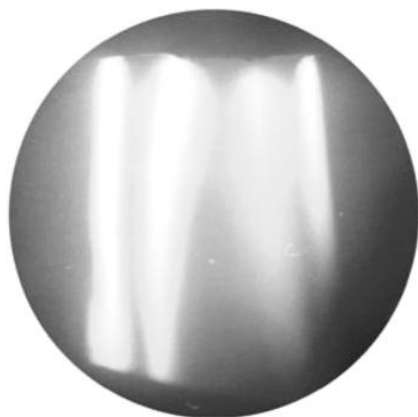


Рис. 5 – СВЧ-разряд закрученной аэроосеси угля

- 1-1410 К
- 2-1385 К
- 3-1360 К
- 4-1335 К
- 5-1310 К
- 6-1285 К
- 7-1260 К
- 8-1235 К
- 9-1210 К



Рис. 6 – температура угля за СВЧ-плазмой

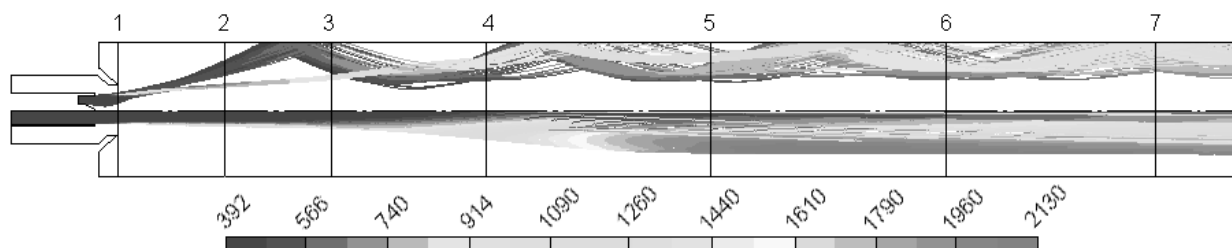


Рис. 7 – Траектории частиц угля и их температура (К), показанная разными цветами: сверху – при наличии закрутки потока; внизу – при отсутствии закрутки потока

В 1995 году в г. Харькове была основана компания UKR PLASMA Co для разработки и внедрения микроволновых технологий, основанных на технических решениях аэронавигационных и космических исследований [11]. В Канаде (г. Монреаль) существует представительство этой фирмы. С 2004 года компания включила в сферу своих интересов разработку и производство микроволновых плазменных горелок, а также устройств обработки и поджига различных неорганических и органических веществ. Преимущество использования таких микроволновых плазматронов заключается в простоте технологического процесса и соответствующего технологического оборудования. На рис. 8 изображена станция СВЧ-плазменного сжигания угля, созданная этой фирмой.

Промышленные СВЧ-плазменные горелки, поставляемые этой фирмой, делятся на не-

сколько видов: МПГ-50, МПГ-100, МПГ-300. МПГ-500 - Микроволновая мощность этой горелки составляет 25 – 50 кВт. Такая горелка предназначена для целей обработки (нагрева, сушки, поджига) небольшого количества материалов. МПГ-100 – модель микроволновой горелки мощностью от 75 до 100 кВт. Такая горелка используется для поджига пылеугольной смеси в котлах теплоэлектростанций, для обработки рисовой шелухи в производстве кремния и многих других технологических процессах. МПГ-300 – микроволновая горелка мощностью от 100 до 300 кВт. Горелки используются для переработки бытовых и промышленных отходов, сушки ковшей на металлургических предприятиях и в других энергоемких процессах. Установками с микроволновой мощностью от 300 кВт и выше обеспечивается достижение высоких температур при небольших эксплуатационных расходах.



Рис. 8 – Станция СВЧ-плазменного сжигания угля (кадр видеofilьма)

Корейскими университетами ведутся исследования по воздействию СВЧ факельной плазмы на уголь (буроугольная пыль). Начальные эксперименты [12] были направлены на создание установки СВЧ-плазменного сжига-

ния угля и выявление на ее основе особенностей этого процесса. Схема эксперимента изображена на рис. 9.

СВЧ-плазматрон атмосферного давления состоит из СВЧ-генератора частотой 2.45ГГц и

сужающегося волновода WR-340 (86×20мм). Волновод используется для увеличения интенсивности СВЧ-поля и включает следующие элементы: изолятор, направленный ответвитель, трехсогласующий шлейф (линии передачи), накладной электрод, питатель системы

угля. Сначала создается плазма, и микроволновая энергия выпускается в направлении ее поглощения. Электрическое поле СВЧ-излучения в кварцевой трубе может быть максимальным за счет регулирования трехсогласующего шлейфа волновода.

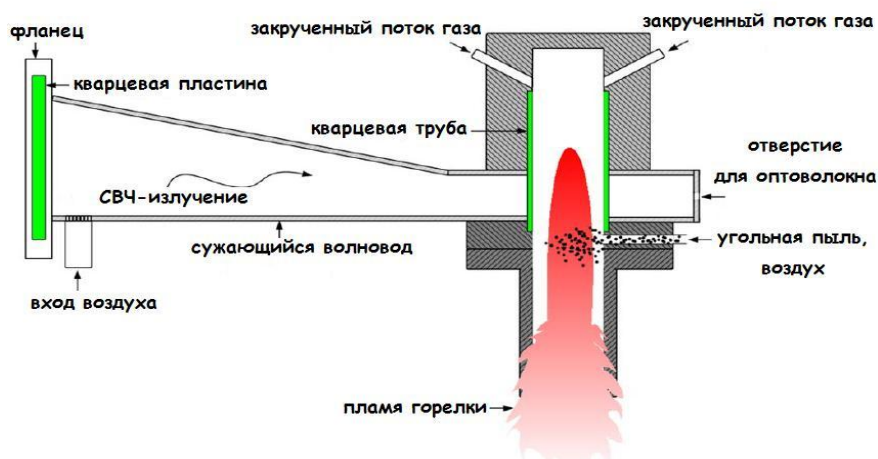


Рис. 9 – Схема микроволнового плазматрона для сжигания угля

Мощность отражённой волны регулируется также посредством трехсогласующего шлейфа волновода, который является почти нулевым. Даже если все шлейфы полностью замкнуты, мощность отраженного СВЧ-излучения составляет всего 10% от изначально направленного излучения. Направленная мощность и отраженная мощность контролируются направленным ответвителем. Зажигание плазмы происходит либо поверхностной электроискровой системой, либо искрой от вольфрамовой нити, введенной в кварцевую трубу в волноводе. Плазма генерируется внутри кварцевой трубы, а ее стабилизация осуществляется путем инжекции закрученного потока газа, который подается в газоразрядную трубу с разных сторон через четыре небольших отверстия. Подаваемый закрученный газ создает вихревой поток, стабилизирующий пламя газовой горелки в центре трубы и защищающий стенки трубы от перегрева. Поток газа состоит из воздуха, кислорода или их смеси. Отмечается, что такой закрученный газовый поток снабжает атомарным водородом и гидроксидными молекулами пылеугольную смесь. Кроме того, таким газовым потоком поставляется атомарный кислород и высокоплотный молекулярный синглетный кислород, которые требуются для осуществления схемы близкой к идеально-правильному сжиганию угольной пыли, подаваемой из питателя. Кварцевая пла-

стина установлена для того, чтобы предотвратить проникновение потока воздуха в трехсогласующий шлейф, а отверстие для оптоволоконной связи используется для подключения аппаратуры при измерении эмиссионных линий плазмы.

Результаты показывают, что использование направленных струй закрученного газового потока значительно увеличивает интенсивность пламени микроволновой-плазменно-пылеугольной аэросмеси, что проявляется в возникновении вспышек белого пламени около 13 раз, которые визуальным образом зафиксированы (рис. 10) [13]. Мощность СВЧ-установки 4 кВт, а частота 2.45 ГГц. Расход смеси закрученного газа составляет 20 л/мин кислорода + 15 л/мин воздуха. А расход угольной пыли при этом 32 гр./мин.

Газоанализатор показывает появление компонентов CO (11%) и H_2 (3%) вследствие частичного окисления угля и распада продуктов воды в углях соответственно. Это демонстрирует принципиальную возможность получения продуктов реакции $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ при сжигании угля в высокотемпературной СВЧ-плазме. В последующих работах на основе этой установки (мощность СВЧ-генератора 2-5кВт.) предлагается осуществить процесс газификации угля и получить обогащенный водородом синтез-газ.



Рис. 10 – Слева: вспышка белого пламени (13 раз), справа: факел горения СВЧ-плазмы

Из-за больших выбросов парниковых газов прямое сжигание углей является экологически и экономически невыгодной технологией. Поэтому одним из методов использования угольного топлива является его газификация. Конвекционная газификация осуществляется благодаря реакции частичного окисления угля и поэтому требует постоянного присутствия кислорода. Одним из преимуществ СВЧ-газификации угля является то, что процесс поддерживается за счет высокой температуры СВЧ-плазмы и необходимость в использовании кислорода отпадает. Хотя иногда возникают случаи, когда калорийность, поддерживаемая СВЧ-плазмой и необходимая для процесса газификации угля, снижается, поэтому требуется создание условий частичного окисления за счет подвода кислорода [14]. Другим преимуществом микроволновой плазменной газификации является то, что ее можно проводить при атмосферном давлении в отличие от конвекционной обработки, проводимой при высоком давлении. Вследствие всего этого снижается стоимость процесса, не требуется воздушная сепарация, а также появляется возможность использования низкосортных углей, применение которых затруднительно в конвекционной газификации.

Однако, в настоящее время при СВЧ-газификации угля используется большое количество плазмообразующего газа (обычно в виде смеси азота и воздуха), который разбавляет синтетический газ, снижает его калорийность и поэтому препятствует использованию его в производстве электроэнергии, синтетического топлива и химических продуктов [15]. Поэто-

му процесс СВЧ-плазмотермического получения газа из угля предлагается проводить с использованием пара. Пар повысит калорийность синтез газа, облегчит его изотопное разделение, а также позволит увеличить долю водорода в получаемом синтетическом газе до 60% [15]. Максимальная температура такого парового плазменного факела, измеренная методом оптической эмиссионной спектроскопии, составляет $6500^{\circ}\text{K} \pm 200^{\circ}\text{K}$ по осевой линии, а критическая концентрация электронов приблизительно равна $5\text{-}8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [16]. Одна из существующих схем [14-17] такой установки представлена на рис.11. Азот используется как плазмообразующий газ, а кислород как окислитель. Оба газа регулируются с помощью контроллеров массового расхода.

В 2013 году на основе этих исследований запущена заводская станция средних размеров по СВЧ-газификации угля [18], которая позволяет использовать низкосортное топливо. В табл. 1 приведены количественные данные такого синтетического газа, полученного при СВЧ-плазменном сжигании угольной пыли и пара. Расчетные данные, приводимые авторами, показывают, что входная мощность, которая складывается из теплотворной способности угля (90 кг/час), мощности СВЧ-генератора, теплотворной способности пара (60 кг/час) и соответственно (487.2 кВт + 70 кВт + 38 кВт) составляет 595 кВт. А теплотворная способность синтез-газа, как видно из табл. 1, равна 501.6 кВт. Получается, что из входной мощности 595 кВт производится синтез-газ теплотворной способностью 501.6 кВт. Следовательно, КПД обогащенного водородом

синтез-газа (холодного газа) составляет 84%. Частота СВЧ-генератора используемого в таком процессе равна 915 МГц, а максимальная

мощность – 75 кВт. Работа ведется при поддержке Министерства экономики знаний республики Корея.

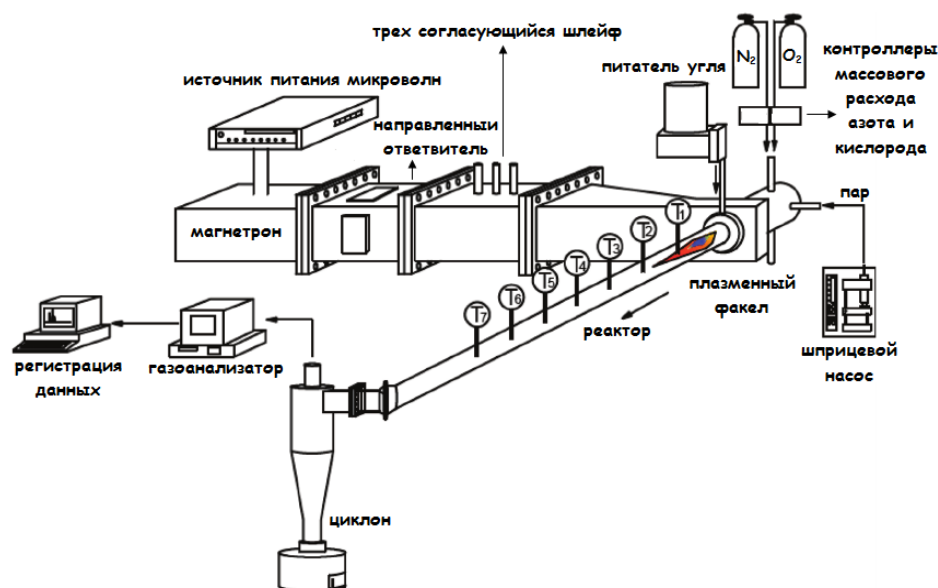


Рис. 11 – Схема СВЧ-плазменного получения синтез-газа из угля

Таблица 1 – Синтез-газ объемом 3299 литров в минуту

Компоненты синтез-газа	Относительная концентрация	Литр/мин	Моль/сек	Энергия эмиссии (кВт)
H ₂	0.398	1313	0.977	279.2
CO	0.320	1056	0.786	222.4
CO ₂	0.182	600	0.446	–
H ₂ O	0.003	10	0.007	–
N ₂	0.097	320	0.238	–
Общее количество	1	3299	–	501.6

В некоторых странах (Индия, Китай) проводятся исследования по СВЧ-обработке водоугольного топлива (ВУТ). Подчеркивается, что воздействие СВЧ-поля на водоугольную суспензию приводит к увеличению псевдопластических свойств такой неньютоновской среды, т.е. происходит уменьшение вязкости при увеличении скорости сдвига [19]. В таком состоянии водоугольная суспензия легче транспортируется по трубопроводу, а за счет усиления характеристик потока происходит снижение эрозии трубопроводов. Большим преимуществом является и то, что микроволновая обработка водоугольной суспензии приводит к сверхтонкому помолу угля внутри такой жидкости, в связи с чем, отпадает необходимость использования химических диспергирующих добавок.

В работе [20] доказывается способность увеличения концентрации ВУТ китайских углей и объясняется причина, по которой это происходит. Микроволны, проникая в структуру суспензии, уменьшают количество ее внутренней влаги и удельной поверхности. Это приводит к более хорошему реологическому поведению и увеличению концентрации угля в ВУТ. Таким образом, изначальная 58.23% (угля) концентрация ВУТ после МВО составила 62.14% (угля) (450 Вт, 60 с), что эффективнее в сравнении с конвекционной обработкой посредством которой концентрация ВУТ достигает 60.41% (угля) (450 °С, 30 мин). При этом изначальное напряжение сдвига равнялось 79.8 Па, после конвекционной обработки снизилось до 42.4 Па, а после микроволновой до 36.4 Па. Экономический эффект такой обработки следующий: при облуп-

чении микроволновой энергией (мощностью 420 Вт в течение 20 с) концентрация угля в ВУТ увеличивается на 1%, что в пересчете на килограмм угля составляет 0.115 кВт·ч/(кг угля). Стоимость электроэнергии составляет 0.04\$ США/кВт·ч или 4.6\$ США за тонну обработанного угля. Однако, для промышленных масштабов такая обработка получается не очень выгодной. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по выявлению эффективности МВО ВУТ: требуется использование углей с большим содержанием влаги, снижение времени микроволнового облучения и создание специального микроволнового реактора.

В ряде стран ведутся разработки по снижению уровня серы в углях и получению ультрачистого топлива. Ультрачистые угольные технологии включают метод промывки традиционными способами, тонкодисперсный размол топлива, а затем обработку его химическими растворами для окончательного снижения зольности до уровня менее 1%. Однако, предлагается использовать не только химические методы обработки угля различными растворами, но и дополнять их физическими методами воздействия (микроволновой, ультразвуковой).

Американскими учеными еще в 1982 году на основе метода спектроскопии Мёссбауэра было показано, что микроволновая обработка угля на частоте 915 МГц и 2.45 ГГц в течение 1 минуты способна осуществить конверсию ($\geq 10\%$) неорганической серы в пирротит [21], а учеными Китая на основе этого же метода, показано, что микроволновое облучение угля осуществляет превращение внутреннего пирита (FeS_2) одновременно в две фазы: в пирротит (Fe_{1-x}S , $0 < x \leq 0.125$) и троилит (FeS) [22]. В итоге при обработке угля СВЧ-полем (2.45 ГГц и 1.5 кВт) в течение 30, 60, 80, 100 секунд эффективность неорганического обессеривания достигла 5, 24, 40, 44 процентов соответственно.

В Китае, Турции и Южной Африке соединение микроволновых и химических методов обработки угля с целью его обеззоливания и десульфизации позволило прийти к следующим результатам:

- при использовании метода кислотной промывки и микроволнового излучения (100 с) удалось почти полностью (на 97%) удалить неорганическую серу [23] из одного из видов углей;

- при разжижении угля кислотой или спиртом и обработке СВЧ-полем (2.45 ГГц) снижение уровня общей серы составило 55-70% (90% неорганической и 20-30% органической) [24];

- соединение химических способов, микроволнового (280 Вт, 30 мин.) и ультразвукового (500 Вт, 70 мин.) облучения трех углей позволили снизить содержание органической серы на 51.6, 45.6 и 23.4 процентов соответственно [25];

- при СВЧ-облучении мощностью 700 Вт в течение 12 мин., фильтрационной сушке в течение 15 часов при температуре 600 °С, удалось понизить уровень серы на 47.1% при использовании раствора HNO_3 (концентрация 139 мл) и на 79.26% при использовании раствора NaOH (концентрация 80 мл) [26];

- применение раствора троны (концентрация 1,25-15%) и МВ-облучение мощностью 90,180 и 360 Вт, в течение 30-480 с двух турецких углей позволило снизить содержание пиритной серы на 48% и 38% и общей серы на 38% и 32% соответственно [27];

- после обработки высокосернистых и низкосернистых африканских углей СВЧ-полем с частотой 2.45 ГГц, мощностью 650 Вт в течение 8,10 минут удалось уменьшить уровень серы для всех видов углей приблизительно на 40% [28, 29]. А совместное использование каустического раствора и СВЧ-облучения (60 с, 500 Вт) двух видов африканских углей позволило снизить содержание серы на 60% [30].

В Иране [31] используется технология, совместного СВЧ-облучения угля и кислотного выщелачивания. В начале два вида угля облучаются микроволновой энергией, и применяется первая ступень кислотного выщелачивания (HF -выщелачивание), посредством чего удается снизить зольность с исходного уровня 8.31% и 10.36% до уровня 2.57% и 2.44% соответственно. А затем применяется вторая ступень кислотного выщелачивания (HNO_3 -выщелачивание), посредством чего удаляются отложения фторида и пиритной серы, а зольность снижается с уровня 2.57% до уровня 0.69% (один час HNO_3 -выщелачивания) и с уровня 2.44% до уровня 0.44% (три часа HNO_3 -выщелачивания).

Кроме того, этими же учеными показано, что такую схему очищения можно дополнить применением ультразвуковой энергии [32] и осуществлять в четыре этапа. На первом этапе

проводить HF-выщелачивание концентрацией 3.5 молей в течение 2.5 часов мелкодисперсного угля при температуре 50 °С. Вторым этапом осуществлять микроволновую обработку мощностью 900 Вт в течение 7 минут. Третьим этапом проводить ультразвуковое воздействие частотой 43 кГц в течение 30 минут. Посредством трех первых этапов удастся снизить зольность на 95.5%. Затем после применения HNO₃-выщелачивания (четвертый этап) концентрацией 1.5 моля в течение 1 часа при температуре 65 °С конечный уровень зольности достигает 0.6%.

А в работе [33] сочетание метода промывки надуксусной кислотой и СВЧ-облучения одного из иранских углей привело к сокращению различных видов серы. Уменьшение составило: пиритной серы в интервале 26÷91%, органической серы в интервале 2.6÷38.4% и общей серы в интервале 17÷65%. Методом Фурье – инфракрасной спектроскопии – зафиксировано отсутствие значительных

изменений в органической части угля после микроволнового-кислотного обессеривания. Это значит, что при таком способе обработки угля удаление серы будет происходить без разрушения угольной органической матрицы. В последующих работах [34] создан метод прогнозирования микроволновой-надуксусной десульфуризации (МНД) угля, базирующийся на применении технологии нейронных сетей с ядерной регрессией Надарайя-Уотсона (рис. 12). Этот метод имеет коэффициент корреляции 0.97 (органическая сера) и 0.99 (пиритная сера) и является более эффективным, чем многомерный регрессионный анализ, имеющий коэффициент корреляции 0.90 (органическая сера) и 0.91 (пиритная сера) для этих же видов углей. Поэтому такой точный метод может использоваться для прогнозирования сокращения уровней органической и неорганической серы на заводах по обессериванию угля.

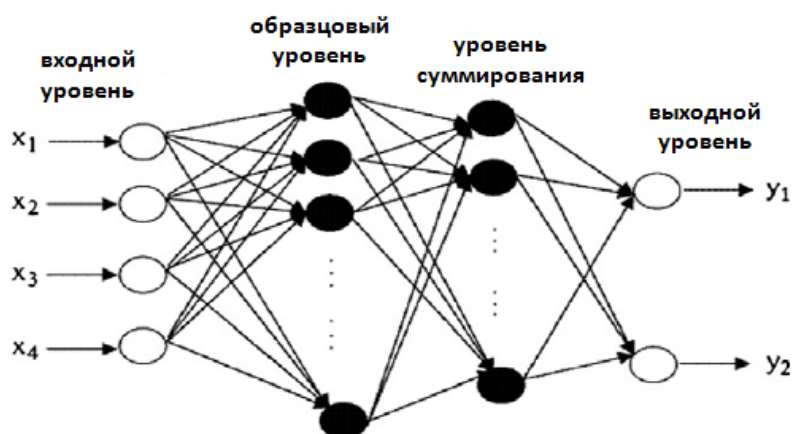


Рис. 12 – Диаграмма нейронной сети с ядерной регрессией Надарайя-Уотсона

Воздействие СВЧ-поля на уголь для формирования кокса более эффективно, чем конвекционная обработка. Исследования по формированию структуры кокса после МВ-облучения 300 граммового битумного угля Англии мощностью 8 кВт в течение 70 минут выявили на основе анализа степени анизотропии, внутренней химической реакционной способности и диэлектрических свойств, что такой полученный продукт соответствует коммерческому коксу [35]. Эксперимент проведен по следующей схеме рис. 13.

Уголь располагается под тремя слоями: стеклянный стакан, слой песка, стакан из пирекса (термостойкое стекло). Впуск азота осу-

ществляется для того, чтобы сократить воспламенение во время удаления летучих компонентов из угля. На рис. 14 приведены снимки структуры кокса после 25 мин. и 70 мин. воздействия СВЧ-поля на 300 г угля, сделанные микроскопом. Макропоры справа (рис. 14) вероятнее всего, являются остаточным явлением после дегазации (удаление летучих компонентов).

Влага и –ОН связи более всего реагируют на СВЧ-излучение и являются причиной начальной стадии нагрева угля. Нагревание угля до более высоких температур приведет к увеличению ароматичности углеродосодержащих материалов.

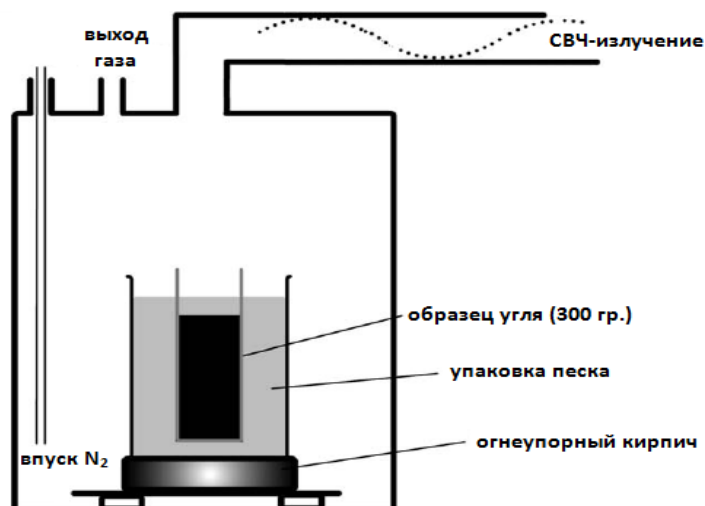


Рис. 13 Схема получения кокса методом СВЧ-облучения угля

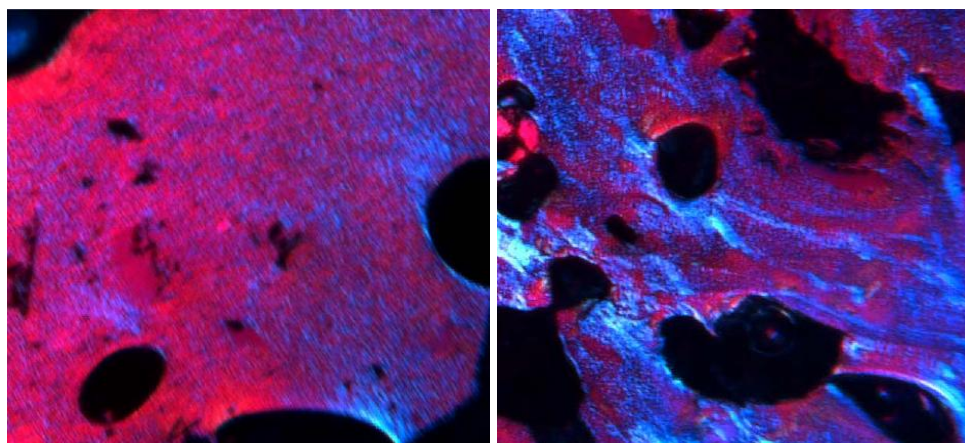


Рис. 14 – Структура кокса полученного из СВЧ-облученного (8 кВт) 300 г угля
слева: 25 мин. облучения, справа 70 мин. облучения

Это, частично, происходит из-за потери летучих компонентов во время пиролиза, которые высококалорийны к материалам с углеродной структурой и также проявляется в переупорядочении структуры углерода на более графитизированные ароматические пласты. Это позволяет достичь более высокой степени электропроводности и, следовательно, даже более высоких уровней нагрева, в результате потерь гидроксильных радикалов и усиленного переноса π -электронов между ароматическими пластами. Перенос этих электронов может быть затруднен плохо упорядоченными структурами низкокачественных углей. Но когда связи разрываются (при температуре выше 400 °С), мобильность этих электронов увеличивается с увеличением уровней упорядоченности между ароматическими пластами. Диэлектрические потери также зависят от мо-

бильности электронов через каналы микропор в результате удаления летучих. Между 400 °С и 500 °С электроны сдвигаются с π -орбиталей на σ -орбитали, в результате ароматических перераспределений. Между температурами 500 °С и 600 °С диэлектрическая константа может временно увеличиваться благодаря потере OH^\cdot радикалов в углеродной матрице. Эта тенденция становится обратной при температуре 600 °С, когда промежутки в молекулярной решётке расширяются, что позволяет увеличить мобильность электронов с их перескоком между ароматическими пластами. При температуре близкой к 600 °С электропроводность угля понижается, а при температуре в интервале 600-900 °С снова увеличивается.

Естественно, что нельзя обойти вниманием самую востребованную отрасль угольной микроволновой обработки – сушку. В работе

[36] исследователи отмечают, что за последние два десятилетия количество патентов этой технологии составляет больше 1500.

Австралийский проект (Drycol) развиваемый фирмой DBA Global показал: снижение уровня общей влаги в интервале 62-94% после СВЧ-сушки пяти разных углей находящихся на ленточном конвейере [37]. При этом дополнительно происходит снижение общей

серы от 0.6 до 0.5% одного из видов углей. Вдобавок ко всему, зафиксировано снижение содержания калия от 0.32 до 0.05% в коксе, приготовленном из СВЧ-обработанного угля. А также снижение фосфора в угле от 0.06 до 0.0%. Разработана конструкция опытно-промышленной установки (рис. 15) и схема ее внедрения в цикл сталелитейного производства [38].

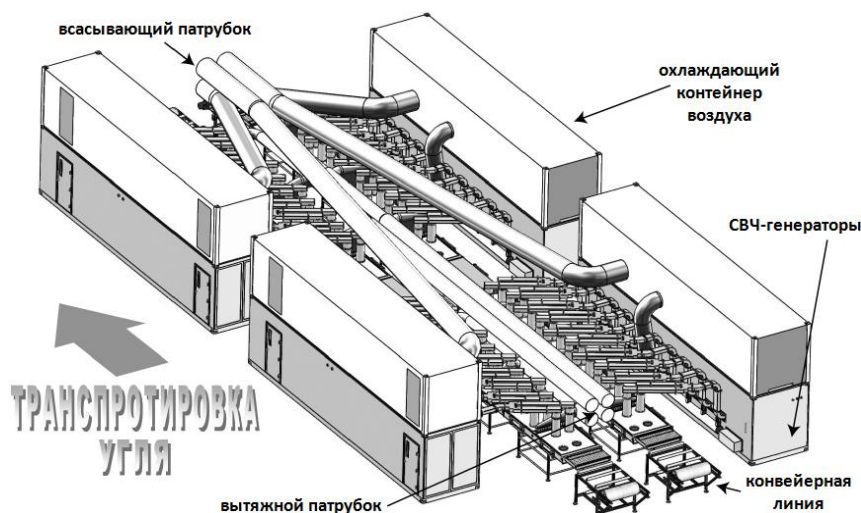


Рис.15 – Концептуальное изображение промышленной установки СВЧ-сушки угля

В США [39-40] исследования микроволновой сушки угля на частоте 2.45 ГГц и мощности 800 Вт показали, что эффективность обезвоживания составляет 3\$/тонну угля при снижении влажности на 10%. Благодаря исследованиям МВ-сушки угля стало возможным создание фирмы CoalTek Inc. - одной из самых успешных компаний в СВЧ-угольных технологиях. Многочисленные патенты [41-50] этой организации показывают, что технологию воздействия микроволн можно использовать для промышленной сушки и очищения угля и получать при этом твердое топливо высокого качества. Приведен расчет необходимой мощности для испарения 8% влаги из 10 тонн угля [41]. При 100% эффективности 1 кВт электромагнитной энергии может испарить 3.05 фунтов воды за час. Хорошо сконструированная СВЧ-установка 98% этой энергии превращает в тепло. Для упоминаемого 1 кВт электромагнитной энергии требуется 1.15 кВт электрической энергии, чтобы испарить 2.989 фунтов воды. Следовательно, 61.6 кВт электричества требуется для испарения 160 фунтов воды ($61.6 \text{ кВт} \cdot 2.989 \text{ фунтов воды} / 1.15 \text{ кВт} = 160 \text{ фунтов воды}$). А подведение 533 кВт в час испаряет 1385 фунтов воды ($533 \text{ кВт} \cdot 2.989 \text{ фун-$

тов воды / $1.15 \text{ кВт} = 1385 \text{ фунтов воды}$). 1385 фунтов воды составляет 8% влаги в 10 тоннах угля. Поэтому можно использовать три 200 кВт СВЧ-установки для создания требуемой мощности. Время работы СВЧ-установки зависит от размеров и конфигурации рабочей камеры, доступной электромагнитной мощности и размеров угольного образца и изменяется в интервале от 0.05÷45 минут. Посредством микроволнового воздействия совместно с сокращением влаги удастся снизить уровень зольности минимум на 10% и максимум более 65%, уровень общей серы на 50÷75% и значительно увеличить калорийность топлива (табл. 2) [49].

На рис. 16 изображена детальная схема полной системы архитектуры комплекса обработки твердого топлива по технологии CoalTek [50]. Для удобства пояснения этой схемы выделим следующие блоки:

Блок №1 – фиолетовые узлы; Блок №2 – красные узлы; Блок №3 – синие узлы; Блок №4 – оранжевые узлы; Блок №5 – розовые узлы; Блок №6 – коричневые узлы; Блок №7 – узлы цилиндрической формы; Блок №8 – зеленые узлы.

Таблица 2 – Изменение калорийности углей после СВЧ-обработки

Марка угля и образцы	*BTU/lb	BTU/lb (%)	Влага	Влага (%)	Мощность (кВт)	Время (с)
Lignite F	6849	-	32.97	-	-	-
30728128	8517	24.35	19.88	39.70	10	45
30728129	8545	24.76	19.88	37.03	20	15
30728130	8280	20.89	18.43	44.10	20	15
30728131	8838	29.04	12.97	60.66	20	30
30728132	9854	43.88	4.74	85.62	5	300
30728133	10318	50.65	6.28	80.95	5	300
30728134	10210	49.07	7.81	76.31	30	15

*2.326 BTU/lb=1.0 кДж/кг

Каждый блок состоит из узлов. Для обозначения взаимодействия блоков и узлов между собой используются стрелки.

Блок № 1 включает источник питания (однофазная или многофазная линия переменного тока) и линию передачи высокого напряжения (линия постоянного тока).

Блок № 2 в схеме отвечает за хранение, подготовку и транспортировку угля из шахты к месту обработки и имеет название: Шахта. Хранилище угля содержит шахтный уголь, однако может включать и предварительно измельченный уголь. Транспортировка угля из хранилища (осуществляется с помощью конвейера, грузовика, трактора) идет или на поставку покупателю (отправкой кораблем или баржей) или на отправку к месту обработки в блок №3. Кроме того на этом этапе стандартными тестами определяются характеристики угля, которые могут включать следующие параметры: процентное содержание влаги, зольности, летучих, связанного углерода, а также формы серы, индекс Хардгрова, количество общей ртути, температуру плавления золы, анализ минералов золы, электромагнитное поглощение/отражение, диэлектрические свойства и т.д.

Блок № 3 один из самых больших и имеет название: Обработка угля. Здесь происходит полная обработка угля главным образом методом СВЧ-облучения. С левой стороны блока располагаются несколько узлов. В узле генерации газа вырабатывается инертный газ для комплекса анти-воспламенения, отвечающего за предотвращение возгорания угля на конвейерной ленте. Газогенератор может использовать процесс адсорбции при переменном давлении для снабжения инертным газом. В качестве инертного газа можно применять азот и аргон, регулируемые с помощью контроллера, который использует обратную связь с сенсо-

ров. Система контроля представляет собой компьютерное устройство, состоящее из отдельных узлов (настольный компьютер, ноутбук, сервер, веб-сервер) или их совокупности и соединенные между собой сетью (р2р, интернет, интранет, LAN, WAN, и т. д). Система контроля сравнивает характеристики обработанного твердого топлива с желаемыми характеристиками твердого топлива и определяет параметры регулирования обработки угля. Система поглощения контролирует поток и объем поступающего на обработку угля, а комплекс генерации параметров, представленный в виде персонального компьютера или их наборов, служит для хранения требуемых конечных характеристик угля. С правой стороны рассматриваемого блока располагаются три узла. В узел системы охлаждения уголь попадает после полной обработки в блоке №4. Охлаждение угля необходимо для того, чтобы предотвратить возникновение участков с повышенным тепловыделением в угольном топливе, ре-абсорбцию (повторное поглощение) влаги и другие нежелательные химические реакции, которые могут возникнуть на этой стадии. Затем уголь отправляется на финальную стадию, где он подвергается вентиляции. Из этого узла (система вентиляции) берут образцы угля для тестирования и определения параметров угля на выходе (узел блока №7) и оттуда же уголь отправляется в блок №8 для его сжигания, переработки и выделения побочных продуктов.

Блок № 4 представляет собой конвейерную ленту около 40 футов длиной. Стадия предварительного нагрева позволяет осуществить нагрев угля до температуры эксплуатационных параметров, которые обеспечиваются контроллером.

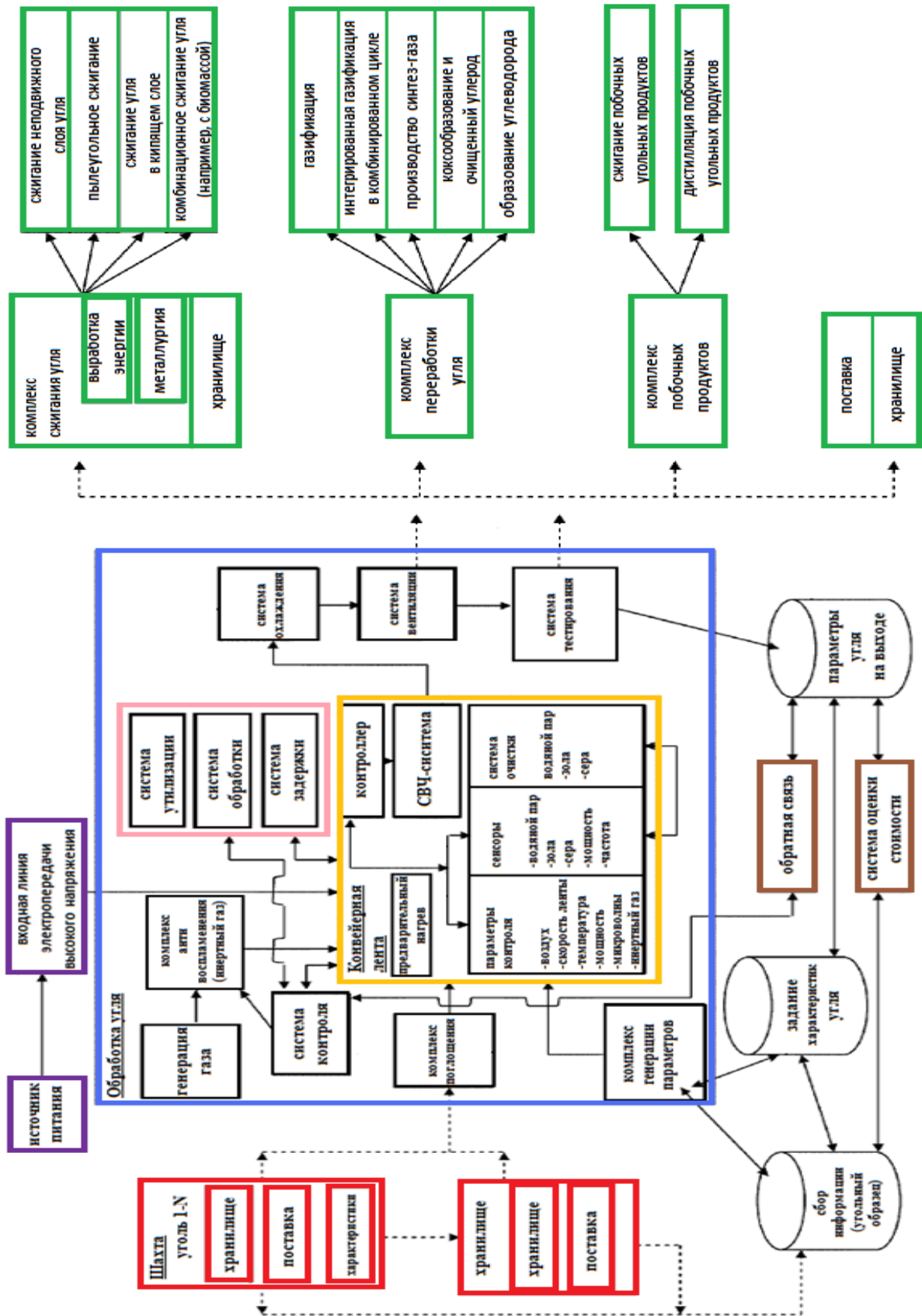


Рис. 16 – Схема полной системы архитектуры комплекса обработки угля по технологии CoalTek

Контроллер управляет группой параметров, как показано на схеме и представляет собой компьютер с сетью передачи данных (LAN, WAN) оснащенный контуром обратной связи и интерфейсом.

Предварительный нагрев служит для удаления излишней поверхностной влаги и влаги находящейся сразу под поверхностью. После предварительного СВЧ-нагрева осуществляется стадия более глубокой микроволновой обработки угля – удаления внутренней влаги, а так же золы, серы, водорода, гидроксильных летучих компонентов. СВЧ-система представляет собой систему генераторов, каждый из которых может иметь мощность, например 15 кВт (928 МГц или ниже) или 75 кВт (902 МГц), а выходная частота всей системы лежит в пределах от 100 МГц до 20 ГГц. Система сенсоров замеряет значения таких величин, как частота и мощность СВЧ-поля, температуру угля, скорость ленты, поток инертных газов, влажность и т. д. и может располагаться вдоль линии конвейера. Например, измерение влажности сенсорами, установленными до СВЧ-генератора и после, позволит затем на основе этой информации вычислить количество выпаренной влаги. Сенсоры, считывая информацию, передают ее в узел контроля параметров. Сенсоры могут быть аналоговыми и цифровыми, поэтому узел контроля параметров содержит аналогово-цифровой преобразователь. Система очистки удаляет влагу, золу, серу, водород и летучие компоненты.

Блок № 5. После удаления жидких и газообразных продуктов (влага, зола, сера, водород и летучие компоненты) узел системы задержки, представляющий собой контейнер или резервуар (бак) собирает и накапливает их. Затем из резервуара эти компоненты перемещаются в систему обработки. Система обработки может включать в себя большое количество фильтрационных и разделительных процессов, таких как: осаждение, флокуляция, центрифугирование, фильтрация, дистилляция, хроматография, электрофорез, жидкостная экстракция, пылеулавливание, дробное замораживание, просеивание, отвеивание. Затем вещества, выделенные из угля в виде отдельных компонентов, отправляются в узел системы утилизации, где производится удаление нетоксичных компонентов (вода, пар и др.) и реализация продукции/коммерческая продажа выделенных неугольных компонентов.

Блок № 6 содержит два узла, обозначенных коричневыми цветами. Система обратной связи это компьютер (персональный, ноутбук, сервер) или их совокупность связанных между собой сетью (p2p, интернет, интранет, LAN, WAN, и т. д.). Система обратной связи получает запись данных о заново полученных характеристиках угля, а также все записи данных для определяемого угля, включая среднеарифметические и статистические данные. Система оценки стоимости определяет стоимость и цену готового продукта (угля) после всего комплекса обработки. Специальное прикладное программное обеспечение рассчитывает цену продукта, сравнивая стоимость начального образца угля (первый узел блока №7) со стоимостью обработанного угля (третий узел блока №7).

Блок № 7 состоит из трех узлов. Первый узел собирает начальную информацию об угольном образце. Второй узел содержит информацию о требуемых характеристиках, которые необходимо присвоить углю на стадии обработки. Наконец, третий узел содержит информацию о топливе, которое получилось после обработки. Информацию второго и третьего узлов необходимо постоянно сравнивать, чтобы определить: обладает ли конечный продукт нужными свойствами и соответствует ли требуемому качеству.

Уголь после микроволновой обработки и прохождения всех предыдущих блоков отправляется в последний блок №8, предназначенный для сжигания и переработки угля, а также выделения побочных продуктов. Совокупность различных видов сжигания, переработки и выделения побочных продуктов приведена в схеме на рис. 16.

В 2006-2007 годах был запущен первый завод, способный перерабатывать 15 т угля в час, при этом уровень влажности снижается от 28% (исходная) до 12% (конечная). Второй завод с возможностью переработки 50 т угля в час запущен в четвертом квартале 2007 года. Такой первый коммерческий 3 МВт завод СВЧ-обработки угля работает в г. Кавер-Сити (штат Кентукки) (рис. 17), а рис. 18-19 – фотографии процесса [51]. С 2013 года начаты работы по основанию завода с технологией CoalTek в Китае (Внутренняя Монголия), нацеленный на годовую производительность 10 миллионов т угля. Планируется сотрудничество с Южной Африкой и Европой.



Рис. 17 – Завод СВЧ-сушки угля (вид с пешеходного мостика), г. Кавер-Сити



Рис. 18 – Зона питателя угля



Рис. 19 – Высушенный уголь на выходе из СВЧ-сушилки

В Канаде (г. Ванкувер) создана коммерческая фирма **Micro Coal Technologies Ltd**, выполняющая работы по микроволновой сушке и деконтаминации угля. В технологию инвестировано 10 млн. \$. и фирма MicroCoal Technologies Ltd имеет нескольких представительств (рис. 20). С 2013 года компания входит в состав Канадской Национальной Фондовой биржи [52].

Технология позволяет сокращать количество влаги с 45% до 10% и увеличивать калорийность топлива с 4200 ккал до 11000 ккал [53]. Важным преимуществом относительно экологии является то, что технология позволяет получать уголь со сниженным до 70% содержанием SO_x , со сниженным до 50% содер-

жанием NO_x , со сниженным до 17% содержанием CO_2 [54].

Более того посредством такого воздействия удается снизить уровень ртути в углях после МВО. Испытания, выполненные на предприятии Hazen Research Inc. (г. Голден, штат Колорадо, США) показали, что процесс может быть реализован в промышленном масштабе при учете всех уровней риска.

Фирма MicroCoal Technologies оказывает услуги таким странам, как Польша, США, Канада, Индонезия. Согласно консолидированному финансовому отчету в 2012-2013 году компания совершила работы по оснащению микроволновыми установками предприятий этих стран, а также по созданию заводов на основе таких технологий [55].

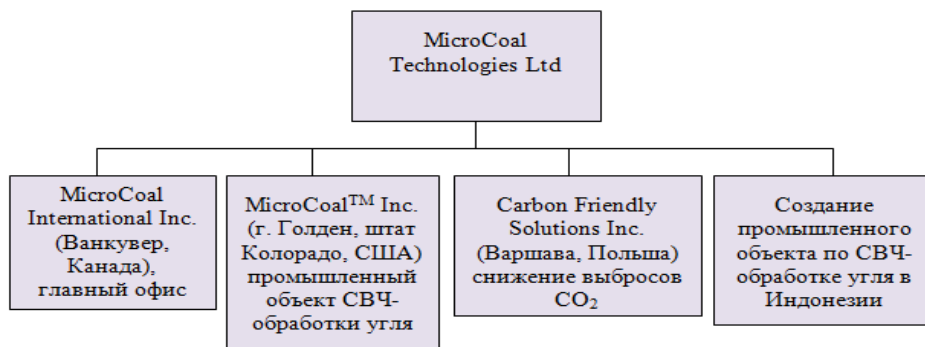


Рис. 20 – Схема объектов MicroCoal Technologies Ltd

Для Канады: поставка оборудования на сумму 16.5 тыс. долларов в 2012 году и на сумму 13 тыс. долларов в 2013 году. Для Польши: поставка оборудования на сумму 377 тыс. долларов в 2012 году. Для США: поставка оборудования на сумму 24.5 тыс. долларов в 2012 году, а также создание заводов с такими технологиями на сумму 3.5 миллиона долларов в 2012 году и 5 миллионов долларов в 2013 году.

В России в теоретических работах [56-58] выполнено приближенно-аналитическое моделирование СВЧ-нагрева угля. А начальные экспериментальные исследования по воздействию СВЧ-поля на угольное топливо отмечают положительные аспекты в следующих областях: сушка [59-61], диспергирование [61-63], получение синтез-газа [64], активация [65-67], плазменное сжигание [68-70], переработка [71-72], формирование структуры кокса [73-74], абсорбция [75]. Даже на этапе лабораторных исследований удается снизить в несколько раз время сушки, увеличить абсорбционную способность, произвести активацию топлива, приводящую к его усиленному воспламенению, получать продукты СВЧ-переработки угля.

Заключение

Подводя итог, важно подчеркнуть несколько фактов. Во-первых, к настоящему времени накоплен большой международный опыт в СВЧ-угольных технологиях. Он, прежде всего, показывает, что положительных экономических и экологических аспектов посредством применения СВЧ-поля для воздействия на уголь можно добиться в следующих областях: сушка, обработка водоугольного топлива, плазменное сжигание, добыча сингаза, удаление токсичных примесей и получения ультра-

чистого топлива. Во-вторых, зарубежные исследования по микроволновой обработке углей находятся минимум на высоком лабораторном уровне, а во многих странах они переросли в промышленный масштаб. Проводятся испытания на промышленных объектах и создаются соответствующие СВЧ-установки. Разрабатываются схемы предприятий микроволновой обработки угля. В ряде стран (Польша, Индонезия, Китай) работы по созданию заводов МВО угля только начинаются, а в США несколько таких заводов уже созданы и успешно работают. Также созданы несколько корпораций (UKRPLASMA Co, CoalTek Inc., MicroCoal Technologies Ltd) направленных на коммерциализацию этой технологии.

Становится очевидным преимущества использования такого метода и при воздействии на угли России. Однако, для перехода на промышленные испытания и для создания заводов с такой технологией необходимо внимание к этим разработкам со стороны бизнеса и государства и соответствующее финансирование таких проектов. Этим, бесспорно, определяется отставание России в СВЧ-угольных технологиях.

Литература

1. Саломатов В. В., Сладков С. О., Пашенко С. Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // ИФЖ. – 2012. – Т. 85, № 3. – С. 535-549.
2. Канило П. М. и др. Экспериментальный стенд для исследования СВЧ-технологий сжигания высокозольных углей // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – №1. – С. 3-7.
3. Казанцев В. И., Ваврив Д. М., Канило П. М., Расюк Н. И., Шунеманн К., Грицаенко С.В., Тымчик А.В., Мессерле А. В. Иссле-

дование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 39-44.

4. Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I, Schiinemann K., Varviv D.M. Microwave plasma combustion of coal. Fuel, v.82, №2, 2003. P. 187-193.

5. Канило П. М., Расюк Н. И., Тымчик А. В., Костенко К. В., Костюк В. Е., Коваленко А.Н. Обработка конструкции СВЧ-плазменной горелки на основе численного исследования течения пылеугольной аэросмеси // Двигатели внутреннего сгорания, 2004. – №2. – С. 47-53.

6. Varviv D.M., Kazantsev V.I., Kanilo P.M., Rasyuk N.I, Schiinemann K., Crytsayenko S.V. Microwave plasma technology of pulverized coal combustion // Telecommunication and radio engineering, 2004. – V.61, №8. – P. 650-662.

7. Канило П.М. Ваврив Д.М. Шунеман К. 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.

8. Варвив Д. М., Канило П. М., Расюк Н. И., Тымчик А. В., Бермотов В. Н., Костенко К. В., Шевченко А. В., Соловьев Г. В., Шевцова Л. В., Ермак С. А., Шунеманн К. Исследование процесса сжигания угольной пыли в экспериментальной СВЧ-плазменной горелке // Промышленная теплотехника, 2007. – Т.29, №2. – С. 47-54.

9. Варвив Д. М., Казанцев В. И., Канило П. М., Расюк Н. И., Шунеманн К., Грицаенко С. В., Тымчик А. В. СВЧ-плазменная технология сжигания угольной пыли // Радиопизика и радиоастрономия, 2002. – Т.7, №1. – С. 88-96.

10. Мацевитый Ю. М., Ваврив Д. М., Канило П. М., Костюк В. Е., Коваленко А. Н. Исследование влияния закрутки потока в СВЧ-плазменной горелке на выгорание пылеугольной аэросмеси // Авиационно-космическая техника и технология, 2005. – №8(24). – С. 150-159.

11. UKR PLASMA Co (<http://www.ukrplasma.com>).

12. Yong Cheol Hong, Sang Ju Lee, Dong Hun Shin, Ye Jin Kim, Yong Uck Shin. Plasma burner enlarged by coal injection into microwave plasma // Plasma science. September 2011. – Vol.39. – Pp. 1829-1833.

13. Yong C. Hong, Sang J. Lee, Dong H. Shin, Ye J. Kim, Bong J. Lee, Seong Y. Cho, Han S. Chang. Syngas production from gasification of brown coal in a microwave torch plasma // Energy 47. – 2012. – Pp. 36-40.

14. Sang Jun Yoon and Jae Goo Lee. Syngas production from coal through microwave plasma gasification: influence of oxygen, steam, and coal particle size // Energy & Fuels. – 2012. – V. 26. – Pp. 524-529.

15. Sang Jun Yoon, Jae-Goo Lee. Hydrogen-rich syngas production through coal and charcoal gasification using microwave steam and air plasma torch // International journal of hydrogen energy. – 2012. – V. 37. – Pp. 17093-17100.

16. Han S. Uhm, Yong C. Hong, Dong H. Shin, Bong J. Lee. Plasma-enhanced gasification of low-grade coals for compact power plants // Physics of Plasmas. – 2011. – V.18. – Pp. 104505.

17. Dong Hun Shin, Yong Cheol Hong, Sang Ju Lee, Ye Jin Kim, Chang Hyun Cho, Suk Hwal Ma, Se Min Chun, Bong Ju Lee, Han Sup Uhm. A pure steam microwave plasma torch: Gasification of powdered coal in the plasma // Surface & Coatings Technology. – 2013. – V. 228. S. 520-523.

18. Han S. Uhma, Young H. Naa, Yong C. Hongb, Dong H. Shinb, Chang H. Cho. Production of hydrogen-rich synthetic gas from low-grade coals by microwave steam-plasmas // International journal of hydrogen energy. – 2014. – V. 39. – Pp. 4351-4355.

19. Sahoo B. K., De S., Carsky M., Meikap B. C Enhancement of Rheological Behavior of Indian High Ash Coal-Water Suspension by Using Microwave Pretreatment // Ind. Eng. Chem. Res. – 2010. – V. 49. Pp. 3015-3021.

20. Jun Cheng, Junhu Zhou, Yanchang Li, Jianzhong Liu, Kefa Cen. Improvement of Coal Water Slurry Property through Coal Physicochemical Modifications by Microwave Irradiation and Thermal Heat // Energy & Fuels. – 2008. – V. 22. – Pp. 2422-2428.

21. Jacobs I. S., Zavitsanos P. D., Golden J. A. Tracking pyritic sulfur in the microwave desulfurization of coal // Journal of Applied Physics. – 1982. – V. 53. – Pp.2730-2732.

22. Sihao Weng. Mossbauer analysis of the microwave desulfurization process of raw coal // Journal of Applied Physics. – 1993. – V. 73. Pp. 4680-4682.

23. Sihao Weng, Jie Wang. Exploration on the mechanism of coal desulfurization using microwave irradiation/acid washing method // Fuel

Processing Technology, September 1992. – V. 31, I. 3. – Pp. 233-240.

24. Jian-kang Yang, Si-feng Chen. Chemical desulfurization of coal using microwave irradiation // *Coal Science and Technology*. – 1993. – V. 21. – Pp. 317-322.

25. Mi J., Ren J., Wang J.-C., Bao W.-R., Xie K.-C. Ultrasonic and Microwave Desulfurization of Coal in Tetrachloroethylene // *Energy Sources*. – 2007. – Part A, 29. – Pp. 1261-1268,

26. Haixiang Zhao, Yong Li, Yuhui Qu, Zihua Duan, Junhui Zhang, Jian Liu. Experimental Study on Microwave Desulfurization of Coal. *Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE)*, 2011. – V. 2 – Pp. 1706-1710.

27. Eker Y., Siitcii H. The Removal of Sulfur from Dursunbey and Iskilip Lignites in Turkey, Using Natural Trona: 2. The Effect of the Microwave Radiation Method // *Energy Sources*, 2013, – Part A, 35 – Pp.134-143.

28. Waseela Mohamed. Desulphurization of South African coal using low power microwave energy. A dissertation submitted to the Faculty of Engineering at the University of the Witwatersrand, Johannesburg, in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering. Johannesburg, 2008. p.86

29. Waanders F.B., Mohamed W., Wagner N. J. Changes of pyrite and pyrrhotite in coal upon microwave treatment. *Journal of Physics: Conference Series* 217 (2010) 012051. International Conference on the Applications of the Mossbauer Effect (ICAME 2009).

30. Rowson N.A., Rice N.M. Desulfurization of coal using low power microwave energy // *Minerals Engineering*. –1989. – Vol. 3, №3/4. – Pp. 363 - 368.

31. Jorjani E., Ghasemi Chapi H., Tayebi Khoram M. Ultra clean coal production by microwave irradiation pretreatment and sequential leaching with HF followed by HNO₃ // *Fuel Processing Technology*. – 2011. – V. 92. – Pp. 1898-1904.

32. Royaei M. M., Jorjani E., Chehreh Chelgani. Combination of Microwave and Ultrasonic Irradiations as a Pretreatment Method to Produce Ultraclean Coal // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2012. – V.32. – Pp. 143-155.

33. Jorjania E., Rezaib B., Vossoughic M., Osanloob M. Desulfurization of Tabas coal with microwave irradiation peroxyacetic acid washing

at 25, 55 and 85 °C // *Fuel*. – 2004. V. 83, № 7-8. – Pp. 943-949.

34. Chehreh Chelgani S., Jorjani E. Microwave irradiation pretreatment and peroxyacetic acid desulfurization of coal and application of GRNN simultaneous predictor // *Fuel*. – 2011. – V. 90. – Pp. 3156-3163.

35. Lester E., Kingman S., Dodds C, Patrick J. The potential for rapid coke making using microwave energy // *Fuel*. – 2006. – V. 85. Pp. 2057-2063.

36. Osman H., Jangam S.V., Lease J.D., Mujumdar A.S. Drying of low-rank coal (LRC) - A review of recent patents and innovations // *National University of Singapore*, 2011. – V. 49.

37. Graham J. Microwaves for coal quality improvement: The Drycol Project // *SACPS. International Pittsbrugh Coal Conference 2007*, Johannesburg, South Africa, September 10-14. – 2007. – Pp. 1-12.

38. Graham J. Microwaves for coal quality improvement: The Drycol Project // *Report on drycol project*, 2008. – Pp. 1-9.

39. Seehra M.S., Kalra A., Manivannan A. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves // *Fuel*. – 2007. – V. 86. – Pp. 829-834.

40. Seehra M.S., Singh V. Microwave Heating . Chapter 8: Use of Microwave Heating in Coal Research and in Materials Synthesis, 2011. – Pp. 163-181.

41. Weinberg J.L. et. all. Pre-burning, dry process methodology and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., US2005/0160667A1, 2005, 36 pages.

42. Weinberg J.L. et. all. Methods and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., US2007/0295590A1, 2007, 70 pages.

43. Drozd et. all. Methods and systems for processing solid fuel. Patent of Coaltek Inc., US2009/048875A2, 2009, 299 pages.

44. Weinberg J.L. et. all. Methods and systems for briquetting solid fuel. Patent of Coaltek Inc., WO2009/0373038A1, 2009, 140 pages.

45. Weinberg J.L. et. all. Pre-burning, dry process methodology and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., US7901473B2, 2011, 60 pages.

46. Weinberg J.L. et. all. Methods and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., EP2002179B1, 2012, 81 pages.

47. Weinberg J.L., Aten J.C. Methods and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., EP2511361 A1, 2012, 82 pages.
48. Drozd et. all. Methods and systems for briquetting solid fuel. Patent of Coaltek Inc., US8585786B2, 2013, 140 pages.
49. Weinberg J.L. et. all. Pre-burning, dry process methodology and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., US8579998B2, 2013, 35 pages.
50. Drozd et. all. Methods and systems for enhancing solid fuel properties. Patent of Coaltek Inc., US8585788B2, 2013, 137 pages.
51. DBAGlobal Australia. Microwaves for Coal Quality Improvement. The Drycol Process. DBAGlobal Australia Pty Ltd ABN 54 108 066 520. Drycol Australia Pty Ltd ABN 77 111 945 772. Presentation, pages 1-23.
52. MicroCoal Technologies Inc. Report for the year ended June 30, 2013, 22 pages.
53. MicroCoal Technologies Inc. Presentation 29 July 2013, 23 pages.
54. MicroCoal Technologies Inc. NR 14-02. The Government of Canada Provides Support to MicroCoal Technologies Inc., 2014, pages 1-2.
55. MicroCoal Technologies Inc. (formerly Carbon Friendly Solutions Inc.) Notes to Consolidated Financial Statements For the years ended June 30, 2013 and 2012 (in Canadian dollars), 30 pages.
56. Саломатов Вл. В., Пащенко С. Э., Сладков С. О., Саломатов Вас. В. Математическое моделирование СВЧ-нагрева угольного полумассива // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 31-33.
57. Саломатов Вл. В., Сладков С. О., Пащенко С. Э., Саломатов Вас. В. Аналитическое исследование СВЧ-нагрева плоского угольного слоя // Горение и плазмохимия. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 106-112.
58. Salomatov V.I. V., Sladkov S. O., Pashchenko S. E., and Salomatov Vas. V. Phenomenological Models of Microwave Heating of a Flat Coal Mass with Release of Absorbed Heat by the Convection Law // Journal of Engineering Thermophysics. – 2013. – Vol. 22, No. 2. Pp. 1-10.
59. Хайдурова А. А., Коновалов П. Н., Коновалов Н. П. Патент РФ № 2330225. Способ сушки сыпучих диэлектрических материалов и устройство для его осуществления / Заявлено 24.01.2007 г.; опубл. 27.07.2008 г. БИ № 28.
60. Хайдурова А. А., Федчишин В. В., Коновалов Н. П. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических характеристик // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – N 1/2. – С.31-35.
61. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика теория и практика. – М.: Наука. – 2003. – 406с.
62. Диденко А. Н. Способ измельчения ископаемого угольного топлива. Патент RU №2226208 С2. 20.12.2003.
63. Диденко А. Н. Зверев Б. В., Прокопенко А. В., Щукин А. Ю. СВЧ-технология измельчения и диспергирования каменных углей и кимберлитов // Научная сессия МИФИ-2006. Т.8 Физико-технические проблемы нетрадиционной энергетики и мощная импульсная электрофизика. Физико-технические проблемы ядерной энергетики. – 2006. – С. 34-35.
64. Диденко А. Н., Кондратьев А. С., Петраков А. П. Способ получения синтез-газа из водоугольной суспензии (патент РФ № 2233312), публикация патента: 27.07.2004.
65. Пащенко С. Э. Способ СВЧ-градиентной активации угольного топлива. Патент № 2458107.
66. Пащенко С. Э., Саломатов В. В., Алексеенко С. В., Пащенко С. С., Каляда В. В., Мадирбаев В. Ж., Гартвич Г. Г. Исследование процессов выносов аэрозольно-газовых компонент при активации и воспламенении углей в высокоградиентном СВЧ поле // В сборнике: «Теплофизические основы энергетических технологий» Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск. – 2011. – С. 203-208.
67. Пащенко С. Э., Саломатов В. В., Алексеенко С. В., Пащенко С. С., Каляда В. В., Мадирбаев В. Ж., Гартвич Г. Г., Зарвин А. Е. Базовая роль коагуляционно-конденсационных процессов тяжелых углеводородов при СВЧ иницировании воспламенения углей (экспериментальный подход и численное моделирование). VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – 2012. – С.76.1-76.6.
68. Буров В. Ф., Стрижко Ю. В. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмой // Горение твердого топлива. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2006.
69. Буров В. Ф., Стрижко Ю. В. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмой // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 4, № 2. – С. 103-109.

70. Буров В.Ф. Патент №2328095 (РФ). СВЧ-плазмотрон / заявитель ЗАО «КОТЭС-Сибирь» (RU); заявл. 23.06.06, публ. 27.06.2008.

71. Хайдурова А. А., Коновалов П. Н., Коновалов Н. П. СВЧ-обработка буроугольного концентрата из угля Мугунского месторождения для получения губчатого железа // Химия твердого топлива. – 2008. – № 2. – С. 67-70.

72. Коновалов Н. П. Применение СВЧ-энергии для переработки угля и отходов резины в жидкие продукты // Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.17.07 / Коновалов Н.П. [Иркут. гос. техн. ун-т Министерства образования РФ]. – М.: 2001. – 39 с.

73. Старовойт А. Г., Малый Е. И., Чемеринский М. С. Исследование процесса микроволнового воздействия на слабоспекающиеся газовые угли // Кокс и химия. – 2010. – № 9. – С. 2-4.

74. Старовойт А. Г., Малый Е. И., Чемеринский М. С. Влияние содержания в шихте термически подготовленного угля в микроволновом поле газового угля на качество кокса // Кокс и химия. – 2012. – № 12. – С. 8-12.

75. Данилов О. С., Михеев В. А., Москаленко Т. В. Оценка воздействия электромагнитного микроволнового излучения на микропористую структуру бурого угля // Горн, информ.-аналит. бюллетень. Региональное приложение. Дальний Восток - 1. – 2009. – Вып.4. – С. 285-289.

COAL TECHNOLOGY USING MICROWAVE RADIATION V.V.Salomatov¹, S.O.Sladkov², C.E.Pashenko³, Vas.V. Salomatov¹

¹Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia, vvs@nsc.itp.ru

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³National Research Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract

Microwave coal processing data from large-scale projects in different countries are provided. Basing on the analysis of international experience it is concluded that microwave technologies are advantageous for economics of fuel and energy. At present the following primary applications of microwaves are considered: coal drying, water coal suspension processing, synthesis gas production, microwave plasma ignition and burning, toxic gases removal, ultraclean fuel production. Specifically in those applications we could expect technological breakthrough with high economic and ecological efficiency. There are few companies including Coal Tech Inc, Micro Coal Technologies Ltd, Ukr Plasma Co which actively commercializing the above technologies.

МИКРОТОЛҚЫНДЫ СӘУЛЕ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН КӨМІРТЕК ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Вл.В. Саломатов, С.О. Сладков, С.Э. Пашенко, , Вас.В. Саломатов.

Жылуфизика институты СО РАН, қ. Новосибирск қ.

Новосібір ұлттық мемлекеттік зерттеу университеті, Новосібір қ.

Томск ұлттық мемлекеттік зерттеу университеті, Томск қ.

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

Аннотация

көміртектің микротолқынды энергиясын өңдеу тұрғысынан түрлі елдерде ауқымды жобалар туралы деректер енгізілді. Халықаралық тәжірибені талдау негізіне экономиканың отын-энергетикалық секторындағы микротолқынды технологияларды қолдану енгізіледі. Қолданыс аймағының берілген уақыт кезеңінде микротолқынды аумақты қолдану көрсетілген: көмірді құрғату, көмір-су суспензиясын өңдеу, газды синтездеп алу, Микротолқынды плазма көмегімен тұтану және жану, улы газдарды жою, ультра таза отын алу. Осы арада біз экономикалық және экологиялық тиімділігін жоғары деңгейдегі көрсеткіштерімен жедел-технологиялық серпілісті күтуге болады. Ең алдымен, әсері осы технологияларды коммерцияландыруға бағытталған, осындай корпорациялар: Coal Tech Inc, Micro Coal Technologies Ltd, Ukr Plasma Co. , құрылған және табысты қызмет етеді.