

УДК 533.9.004.14 + 621.039.6

В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко*

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахстан, г. Алматы
Научно-исследовательский институт новых химических технологий и материалов, Казахстан, г. Алматы
Институт проблем горения, НТО Плазмотехника, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: ust@physics.kz

Переработка топлив в плазмохимических реакторах

Представлены результаты многолетних исследований плазмохимических технологий пиролиза, гидрогенизации, термохимической подготовки к сжиганию, газификации, радиационно-плазменной и комплексной переработки твердых топлив, включая урансодержащие сланцы, и крекинга углеводородных газов. Термохимическая подготовка топлива к сжиганию осуществляется в плазменно-топливной системе, представляющей собой реакционную камеру с плазмотроном, а остальные плазменные технологии топливоиспользования – в плазмохимическом реакторе совмещенного типа номинальной мощностью 100 кВт, в котором зона тепловыделения от электрической дуги совмещена с зоной химических реакций.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменный реактор, топливо, термохимическая подготовка к сжиганию, пиролиз, газификация, гидрогенизация, комплексная переработка угля.

V.E. Messerle, A.B. Ustimenko

Fuel processing in plasma-chemical reactors

The results of long-term studies of plasma-chemical technology of pyrolysis, hydrogenation, thermo-chemical pre-combustion, gasification, plasma radiation and complex processing of solid fuels, including uranium-bearing shales, and cracking of hydrocarbon gases are presented. Thermo-chemical preparation of fuel for combustion is carried out in a plasma-fuel system which is a reaction chamber with a plasma torch while the remaining fuel use plasma technology are carried out in a plasma-chemical reactor of combined type with nominal capacity of 100 kW in which the zone of heat release from an electric arc is combined with the zone of chemical reactions.

Key words: plasma torch, plasma reactor, fuel, thermochemical pre-combustion, pyrolysis, gasification, hydrogenation, complex processing of coal.

В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко

Плазмохимиялық реакторларда отынды өңдеу

Жұмыста көміртектес газдардың крекингінің, қатты отынның радиациялық тозанды және толық өңделуінің, пиролиздің, гидрогенизациялануының, жағуға термохимиялық дайындаудың, газификациялаудың плазмалық технологияларының ұзақ жылдық зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Отынды жағуға термохимиялық дайындау, плазмотрон мен реакциялық камерадан тұратын плазмалық-отындық жүйеде жүзеге асады, ал қалған плазмохимиялық технологиялар шектік қуаты 100 кВт, химиялық реакциялар зонасы доғаның жылу бөліну зонасымен біріктірілген плазмохимиялық реакторда жүзеге асады.

Түйін сөздер: плазмотрон, плазмалық реактор, отын, жағуға термохимиялық дайындау, пиролиз, газификациялау, гидрогенизациялау, отынды жүйелі өңдеу.

Мировая энергетика в настоящее время и на обозримую перспективу (до 2100 г.) ориентирована на использование органического топлива, главным образом низкосортных углей, доля которых в выработке электроэнергии составляет 40%, а тепловой – 24%. В этой связи разработка технологий их эффективного и экологически

чистого использования является приоритетной задачей современности. Рассматриваемые плазмохимические технологии переработки топлив отвечают этим требованиям. В последнее время актуальность плазмохимических технологий переработки топлив возрастает еще больше в связи с истощением запасов нефти и газа, снижени-

ем качества твердых топлив и темпов прироста мощностей АЭС.

В настоящей работе представлены результаты многолетних исследований плазмохимических технологий пиролиза, гидрогенизации, термохимической подготовки к сжиганию, газификации, гибридной (радиационно-плазменной) и комплексной переработки твердых топлив, а также крекинга углеводородных газов [1-6]. Применение этих технологий для получения целевых продуктов (водород, технический углерод, углеводородные газы, синтез-газ, ценные компоненты минеральной массы углей, включая редкоземельные элементы) соответствует современным эколого-экономическим требова-

ниям, предъявляемым к базовым отраслям промышленности. Плазмохимические технологии переработки твердых топлив отличаются, главным образом, различными концентрациями газа-окислителя (воздуха, водяного пара, диоксида углерода, кислорода), обусловленные различными значениями коэффициента избытка окислителя α_{ox} (таблица 1). В таблице значение $\alpha_{ox}=0$ соответствует пиролизу угля, а $\alpha_{ox}=1$ – полной газификации угля при использовании воздуха в качестве окислителя. Следует отметить, что теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1000 кг этого угля составляет 5250 кг, т.е. почти в 2,5 раза больше, чем для его полной газификации ($\alpha_{ox} = 1,0$).

Таблица 1 – Состав воздушно-угольных смесей

Номер смеси	α_{ox}	Масса, кг	
		уголь	воздух
1	0	1000	0
2	0,17	1000	360
3	0,30	1000	640
4	0,50	1000	1067
5	0,75	1000	1600
6	1,00	1000	2133

На рисунках 1 и 2 представлен характерный равновесный состав газовой и конденсированной фаз при плазмохимической переработке низкосортного каменного угля зольностью 40 % и теплотой сгорания 16632 кДж/кг при $\alpha_{ox}=0,5$. Газовая фаза в основном представлена синтез-газом ($CO+H_2$), термодинамически устойчивым к побочным продуктам процесса газификации. Концентрации балластирующих примесей H_2O и CO_2 снижаются до нуля при увеличении температуры до 1400 К. Азотсодержащие вещества представлены в основном молекулярным азотом. При повышении температуры выше 1750 К концентрация H_2 за счет его диссоциации падает, а в газовой фазе появляется атомарный водород (H), концентрация которого увеличивается с температурой и достигает при 4000 К 23,34 %. Минеральные компоненты в газовой фазе представлены в основном алюминием (Al) и кремнием (Si). Концентрация углерода в конденсированной фазе снижается за счет его газификации

в интервале температур 800-1200 К. В интервале температур 1200-1600 К его концентрация практически не меняется в связи с отсутствием свободного кислорода в газовой фазе. В интервале температур 1600-1800 К концентрация углерода резко снижается за счет его участия в реакциях восстановления оксидов железа и кремния с образованием их карбидов (Fe_3C и SiC). С увеличением температуры (1800-2600 К) все минеральные компоненты выходят в газовую фазу в форме следующих газообразных веществ: Al, Si, SiS , Fe, Al_2O , SiC_2 и др.

Технология плазмохимического крекинга заключается в нагреве углеводородных газов в электродуговом совмещенном реакторе до температуры их пиролиза (1900-2300 К) с образованием в едином технологическом процессе высокодисперсного технического углерода и водорода. Из рисунка 3 видно, что практически во всем диапазоне температур в газовой фазе преобладает водород с концентрацией, близкой к 20

масс. %. В интервале температур 2500-5000 К в газовой фазе присутствует ряд углеводородов (C_3H , C_2H_2 , C_4H_2 и др.), которые с повышением температуры диссоциируют на составляющие

их элементы: водород и углерод. Конденсированный углерод ($C(s)$) полностью переходит в газовую при температуре выше 3200 К.

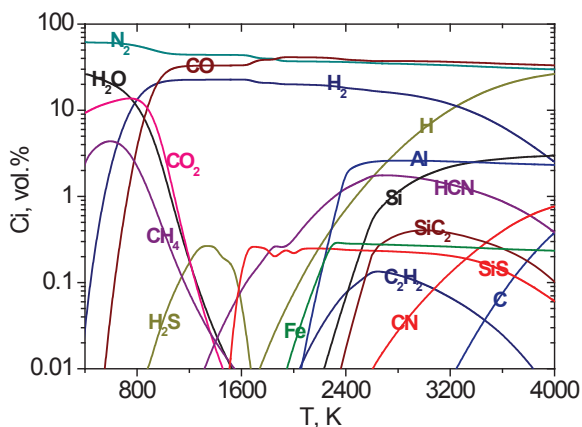


Рисунок 1 – Зависимость концентраций органических и минеральных компонентов в газовой фазе от температуры плазмохимической переработки твердого топлива.

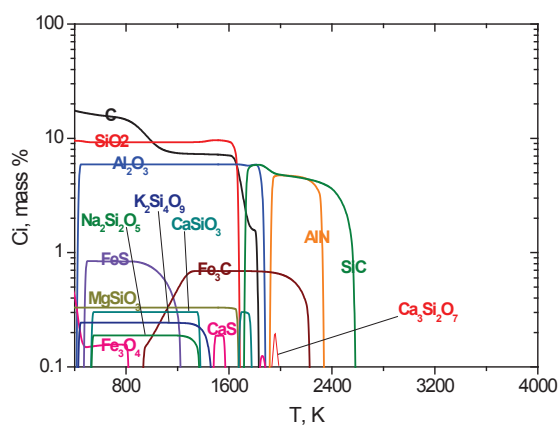


Рисунок 2 – Зависимость концентраций углерода и минеральных компонентов в конденсированной фазе от температуры плазмохимической переработки твердого топлива.

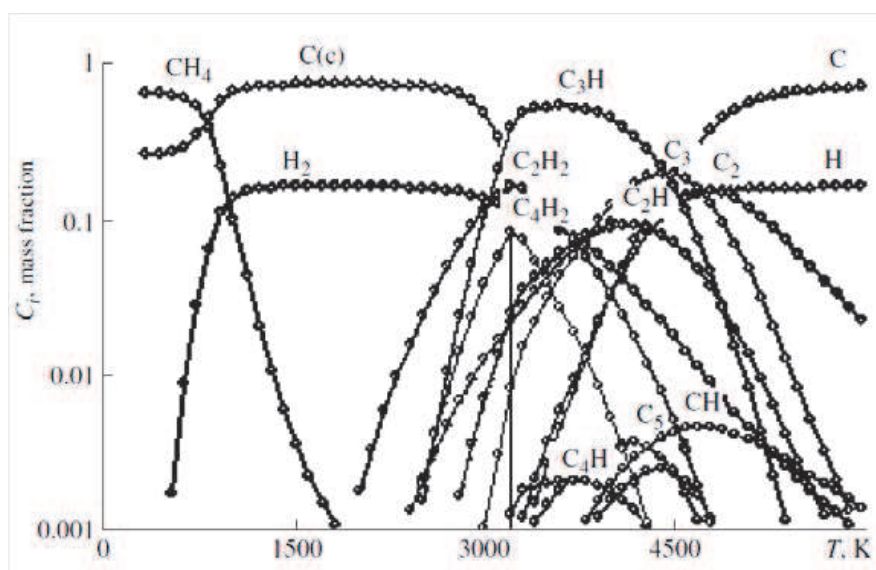


Рисунок 3 – Температурная зависимость состава продуктов плазмохимического крекинга пропанобутановой смеси

Плазмохимическая гидрогенизация твердых топлив, представляющая собой пиролиз угля в водородной среде, позволяет получить из дешевых низкосортных углей путем их обработки водородной плазмой ацетилен и другие непредельные углеводороды (этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 ,

этан C_2H_6 и др.) [5]. Плазмохимическая гидрогенизация угля является новым и малоизученным процессом прямого получения ацетилена и алкенов в газовой фазе в отличие от традиционных процессов гидрогенизации (ожижения) углей.

В результате экспериментов по гидрогени-

зации низкосортного угля в плазмохимическом реакторе (рисунок 4) при его мощности 50 кВт и расходах угля 3 кг/ч и пропанобутановой смеси 150 л/ч получен газ следующего состава, масс. %: $C_2H_6=50$, $C_2H_2=30$, $C_2H_4=10$.

Плазменное воспламенение углей основано на плазмохимической подготовке топлив к сжиганию, результатом которой является образование из низкосортного угля высокорекреационного двухкомпонентного топлива (горючий газ и коксовый остаток), состав которого представлен на рисунках 1 и 2. Высокореакционное двухкомпонентное топливо образуется уже при $T = 900-1200$ К, что позволяет проводить данный процесс при сравнительно низких удельных энергозатратах (0,05-0,4 кВт ч/кг угля) и эффективно использовать на ТЭС для безмазутной растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела [3, 5, 6]. На рисунке 5 показан процесс самовоспламенения высокорекреационного двухкомпонентного топлива (ВДТ) в открытом пространстве.

Плазменная газификация, радиационно-плазменная и комплексная переработка углей для получения синтез-газа и ценных компонентов из минеральной массы углей исследовались на универсальной экспериментальной установке (рисунок 4). С экологической точки зрения эти технологии наиболее перспективны. Их сущность состоит в нагревании угольной пыли электродуговой плазмой, являющейся окислителем, до температуры полной газификации, при которой органическая масса угля превращается в экологически чистое топливо - синтез-газ, свободный от частиц золы, оксидов азота и серы. При комплексной переработке углей одновременно с газификацией органической массы в том же реакционном объеме происходит восстановление оксидов минеральной массы угля углеродом коксового остатка (рисунок 2) и образование ценных компонентов, таких как технический кремний, ферросилиций, алюминий и карбосилиций, а также микроэлементы редких металлов: уран, молибден, ванадий и др.

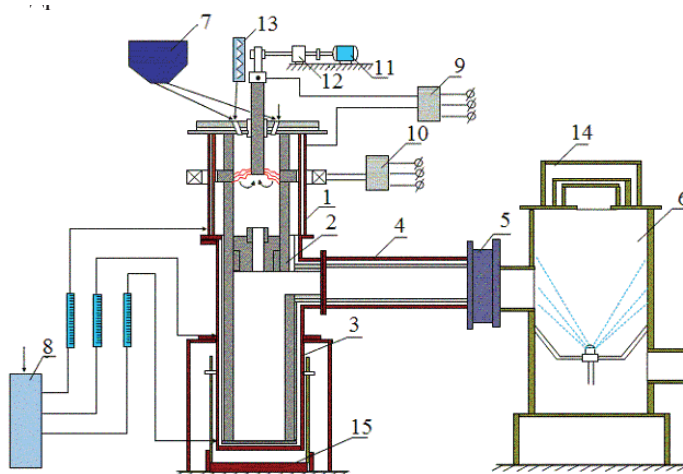


Рисунок 4 – Схема установки для плазмохимической переработки топлива: 1 – плазмохимический реактор; 2 – диафрагма и камера разделения газа и шлака; 3 – шлакоосборник; 4 – камера окисления; 5 – диафрагма; 6 – водяной скруббер; 7 – подача твердого топлива; 8 – система водяного охлаждения; 9, 10 – система электроснабжения; 11, 12 – система подачи центрального электрода; 13 – парогенератор; 14 – предохранительный клапан; 15 – подъемник шлакоосборника



Рисунок 5 – Факел ВДТ (расход угля 1 т/ч)

На основе сведения материального и теплового балансов были найдены интегральные показатели процесса. В таблице 2 представлены характерные результаты плазменно-паровой газификации низкосортного бурого угля зольностью 28 % и теплотой сгорания 13180 кДж/кг. Выход синтез-газа составил 95,2%, степень газификации углерода 92,3 % и степень обессеривания угля – 95,2 %.

Степень восстановления проб твердого остатка из различных узлов установки для

плазмохимической переработки топлива и специальной ванны расплава около графитовой диафрагмы 2 (рисунок 4) представлена в таблице 3. Из таблицы видно, что восстановленный материал обнаружен в шлаке и представлен в виде ферросилиция, карбидов кремния и железа. Максимальная степень восстановления оксидов минеральной массы угля наблюдается в шлаке со стенок электродуговой камеры реактора в зоне максимальных температур и достигает 47 %.

Таблица 2 – Интегральные характеристики плазменной газификации низкосортного бурого угля

T, K	$Q_{уд},$ $кВт \times ч/кг$	CO	H_2	$X_c, \%$	$X_s, \%$
		Объемные %			
3100	5,36	45,8	49,4	92,3	95,2

Таблица 3 – Степень восстановления (Θ) минеральной массы угля

Место отбора проб	T, K	$\Theta, \%$
Шлак из ванны расплава	2600-2800	8,5-44,0
Шлак со стенки дуговой камеры	2600-2900	16,5-47,3
Материал из шлакоборника	2000-2200	6,7-8,3

При радиационно-плазменной переработке угольная пыль подвергалась предварительной активации электронным пучком, а затем перерабатывалась в плазмохимическом реакторе 1 (рисунок 4). Эксперименты выполнялись в плазменном газификаторе номинальной мощностью 100 кВт. В результате проведенных измерений материального и теплового балансов процесса были получены следующие интегральные показатели: среднемассовая температура 2200-2300 К и степень газификации углерода 82,4-83,2 %. Выявлено заметное положительное влияние предварительной электронной активации пылеугольного топлива на выход синтез-газа в процессе его переработки. Выход синтез-газа при термохимической подготовке к сжиганию необработанной угольной пыли составил 24,5 %, а в случае электронной активации угля выход синтез-газа достиг 36,4 %, что на 48 % выше.

Сущность плазменной технологии получе-

ния оксидов урана, молибдена и ванадия из твердого топлива состоит в переработке его смеси с водяным паром в плазмохимическом реакторе 1 (рисунок 4) [6]. Процесс извлечения урана, молибдена и ванадия из угля (сланца) с использованием плазменного нагрева осуществляется следующим образом (рисунок 6). Угольная пыль из бункера 1 и водяной пар из парового котла 2 с массовым отношением уголь – водяной пар, равным 8-12, поступает в плазмохимический реактор 3. В реакторе 3 пароводяная плазма нагревает угольную пыль до температуры 2500-2900 К. По мере нагрева угля происходит газификация органической массы сырья и возгонка содержащихся в минеральной части соединений ванадия, молибдена и урана в виде оксидов в газовую фазу, состоящую в основном из синтез-газа. Затем двухфазный плазменный поток (газовая фаза + расплавленный шлак) поступает в камеру разделения газа и шлака 4 (рисунок 6), отку-

да шлак поступает в шлакосборник 5, а газовая фаза направляется в серию теплообменников 6, 8, 10 для ступенчатого охлаждения и сепаратной конденсации целевых продуктов. В теплообменнике 6 газовая фаза охлаждается до температуры 2300-2400К, при которой конденсируются оксиды молибдена (Mo_nO_m) и улавливаются в приемнике 7. Из теплообменника 6 газы поступают в теплообменник 8, где охлаждаются до $T = 2000\text{--}2200\text{ K}$, при которой конденсируются оксиды

урана (U_nO_m) и улавливаются в приемнике 9. Из теплообменника 8 оставшиеся отходящие газы попадают в теплообменник 10, где их температура снижается до $T=1800\text{--}1900\text{K}$, при которой конденсируются оксиды ванадия (V_nO_m) и улавливаются в приемнике 11. Из теплообменника 10 синтез-газ поступает в блок утилизации 12. В таблице 4 приведены результаты экспериментов по плазменной переработке урансодержащего сланца, содержащего 0,02 % урана.

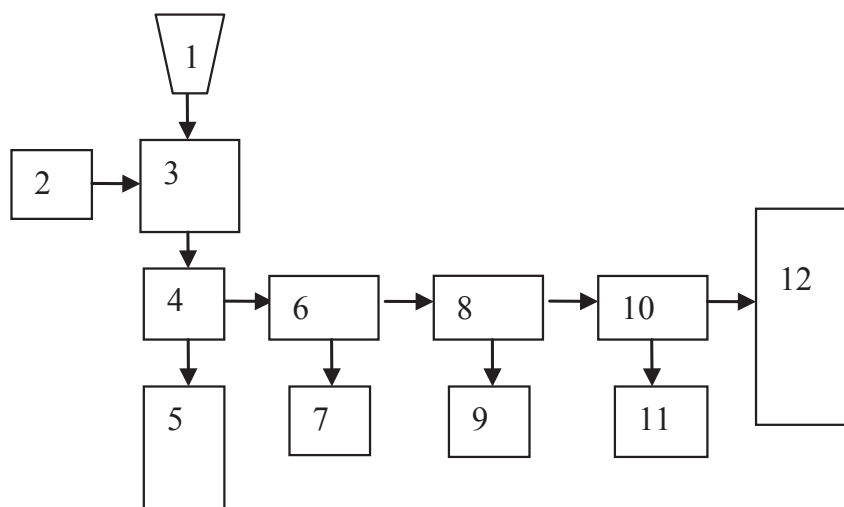


Рисунок 6 – Блок-схема плазменного процесса извлечения урана, молибдена и ванадия из угля: 1 – бункер пыли, 2 – парогенератор, 3 – плазмохимический реактор, 4 – камера разделения газа и шлака, 5 – шлакосборник, 6, 8, 10 – теплообменник, 7, 9, 11 – приемник конденсата, 12 – блок утилизации отходящих газов

Таблица 4 – Интегральные показатели плазменной переработки урансодержащего сланца

№ опыта	$G_{\text{тп}}, \text{ кг/ч}$	$G_{\text{пар}}, \text{ кг/ч}$	$\gamma = \frac{G_{\text{пара}}}{G_{\text{тп}}}$	$T_{\text{ср}}, \text{ K}$	$Q_{\text{уд}}, \text{ кВт ч/кг}$	$X_{\text{U}}, \%$	$X_{\text{Mo}}, \%$	$X_{\text{V}}, \%$	$X_{\text{C}}, \%$
1	5,82	0	0	2900	2,84	48,0	54,5	58,6	56,2
2	8,40	0	0	2500	1,93	25,7	34,5	41,7	54,6
3	6,60	0,60	0,09	2700	2,20	78,6	79,0	81,3	66,4
4	4,33	0,40	0,09	3150	3,04	23,6	24,3	29,0	70,4

Эксперименты по плазменному пиролизу (крекингу) пропанобутановой газовой смеси были проведены в плазмохимическом реакторе номинальной мощностью 100 кВт (рисунок 4). В экспериментах расход пропанобутановой смеси составлял 300 л/мин, а электрическая мощность плазмохимического реактора 60 кВт [5]. Во вре-

мя экспериментов водород и сажа разделялись в водоохлаждаемой камере разделения газовой и конденсированной фаз 2. Водород удалялся в камеру окисления 4, а технический углерод высаживался на стенках реактора, медных водоохлаждаемых спиральных коллекторах, расположенных под крышкой и на выходной диа-

фрагме реактора, а также в сажесборнике 3. После завершения экспериментов был произведен отбор проб из вышеуказанных узлов реактора. Физико-химический анализ проб технического углерода проводился с помощью просвечивающего электронного микроскопа, который показал, что продукты плазменного пиролиза пропанобутановой смеси, сконденсированные на поверхности графитовых электродов плазменного реактора, представляют собой различные наноуглеродные структуры преимущественно в форме «колоссальных» нанотрубок (рисунок 7), обладающих высокой электропроводностью и механической прочностью, в 30 раз превышающей прочность кевларовой ткани [5]. На негативе 9091 проба в основном состоит из круп-

ных «мохнатых» углеродных нанотрубок диаметром около 100 нм и длиной, превышающей 5 мкм. На негативе 9094 видны колоссальные углеродные нанотрубки с включением внутри металлической фазы каплевидной формы. Их диаметр достигает 300 нм. Негатив 9104 представляет «коленчатую» углеродную нанотрубку с диаметром 200 нм и более с внутренней перегородкой. Колоссальные нанотрубки могут представлять собой структуры в форме «октопуса» (негатив 9110). Диаметр такого октопуса в месте своего разветвления составляет около 400 нм. Характерно, что толщина стенок колоссальных нанотрубок может варьироваться от 30 нм (негатив 9104) до 100 нм (негативы 9094 и 9110).

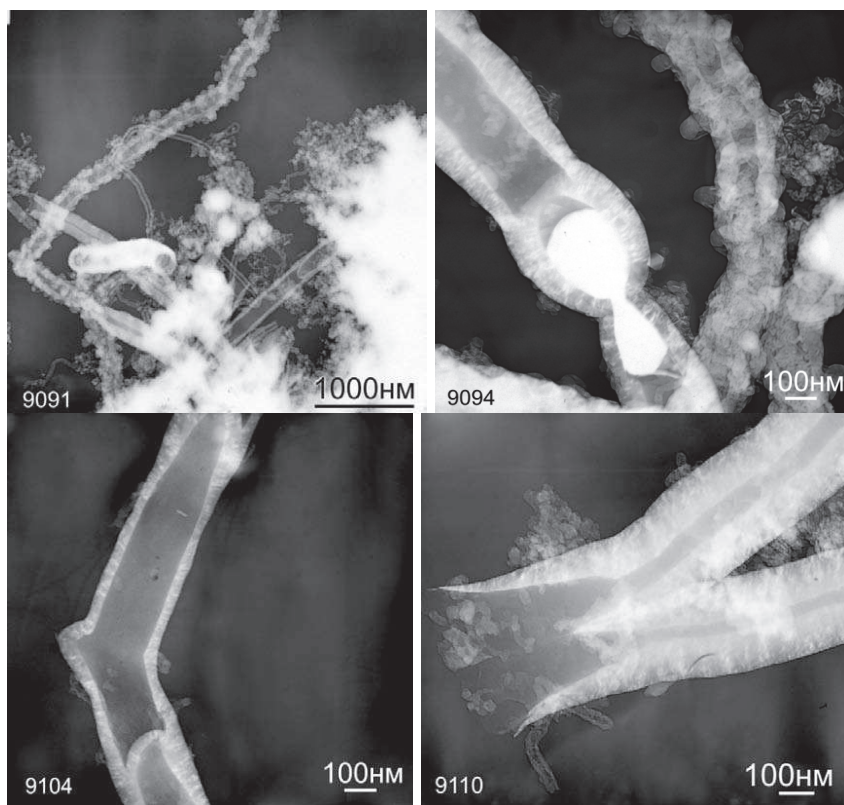


Рисунок 7 – Фотографии наноуглеродных структур, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Результаты экспериментов подтвердили возможность получения водорода и конденсированного углерода, содержащего наноструктуры в виде колоссальных углеродных нанотрубок. На основании полученных результатов разработано техническое решение по созданию пилотной

установки мощностью 1 МВт и производительностью по исходному природному газу 330 нм³/ч для осуществления плазмохимического крекинга углеводородных газов. Ожидаемый выход целевых продуктов составит 74% технического углерода (171 кг/ч) и 25% водорода (58 кг/ч).

В таблице 5 обобщены результаты исследований плазмохимической переработки твердых и газообразных топлив. Массовые отношения твердое топливо / окислитель варьируются в интервале 1,3-2,75, отношение уголь / водород составило 10 кг/кг, а расход пропанобутановой смеси для переработки в плазмохимическом реакторе мощностью 60 кВт составляет 18 м³/ч. Среднемассовые температуры процессов варьировались от 800 до 3200 К. Поскольку плазмохимическая подготовка угля к сжиганию основана на частичной газификации (степень конверсии 15-30 %), то температуры (800-1200 К) и удельные энергозатраты на этот процесс (0,05–0,40 кВт·ч/кг) невысокие.

В результате плазмохимической подготовки угля к сжиганию из исходного низкосортного угля получают высокорекреационное двухкомпонентное топливо, которое активно воспламеняется при его смешении с вторичным воздухом в топке котла и устойчиво горит без сжигания дополнительного высокорекреационного топлива, мазута или газа, традиционно используемых для растопки котлов и подсветки пылеугольного факела на ТЭС.

При комплексной переработке углей конверсия их минеральной массы требует высоких температур (2200–3100 К), что приводит к повышению удельных энергозатрат до 2-4 кВт·ч/кг. При этом достигается высокая степень конверсии угля (90-100 %).

Плазменно-паровая газификация обеспечи-

вает перевод в газовую фазу в основном органической массы угля, что не требует столь высоких температур, как при комплексной переработке, и позволяет осуществлять процесс при сравнительно низких удельных энергозатратах (0,5-1,5 кВт·ч/кг) и достигать высокой степени конверсии (90-100 %).

Радиационно-плазменная переработка углей позволяет повысить степень конверсии исходного топлива на 48 %.

При плазменной переработке урансодержащего сланца достигнуты следующие показатели: при температурах процесса 2700 - 2900 К степень газификации сланца составила 56,2 - 66,4 %, степень перевода микроэлементов в газовую фазу достигала для урана - 48,0 - 78,6 %, молибдена - 54,5 - 79,0 % и ванадия - 58,6 - 81,3%, что качественно согласуется с расчетами по программе TERRA [6].

Плазмохимическая гидрогенизация угля требует высоких температур (2800–3200 К), что приводит к высоким удельным энергозатратам на этот процесс (6,5–8 кВт·ч/кг), позволяющих достигнуть высокой степени конверсии (70-100 %) при прямом (одностадийном) получении ацетилена и алкенов в газовой фазе.

Для обеспечения высокой степени конверсии (98-100 %) углеводородного газа в совмещенном плазмохимическом реакторе не требуются такие высокие температуры, что позволяет осуществлять процесс при относительно невысоких удельных энергозатратах (2,2-3,8 кВт·ч/кг).

Таблица 5 – Оптимальные диапазоны рекомендуемых технологических параметров для плазмохимической переработки топлив

Топливо / плазмооб- разующий газ	Т, К	Удельные энергозатраты, <i>кВт·ч/кг топлива</i>	Степень конверсии топлива, %	Концентрация, мг/нм³	
				<i>NO_x</i>	<i>SO_x</i>
1. Плазмохимическая подготовка угля к сжиганию (воздух)					
1,5–2,5	800–1200	0,05–0,40	15–30	1–10	1–2
2. Комплексная переработка углей (пар)					
1,3–2,75	2200–3100	2–4	90–100	1–2	1
3. Плазменная газификация углей (пар)					
2,0–2,5	1600–2000	0,5–1,5	90–100	10–20	1–10
4. Радиационно-плазменная переработка углей (воздух)					
1,5–2,5	800–1200	0,1–0,45	22–45	1–10	1–2

Продолжение таблицы 5

5. Плазменная переработка урансодержащих твердых топлив (пар)					
8-12	2500-3150	2-4	55-70	1-3	1-2
6. Плазмохимическая гидрогенизация углей (водород)					
10	2800-3200	6,5-8	70-100	0	0
7. Плазмохимический крекинг пропанобутановой смеси					
18 м ³ /ч	1500-2500	2,2-3,8	98-100	0	0

Отметим, что для всех исследованных процессов плазмохимической переработки топлив (таблица 5) характерны крайне малые концентрации вредных выбросов оксидов азота и серы, не превышающих 20 мг/нм³, что на поряд-

док ниже, чем при традиционном использовании топлив.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.515.11.0060.

Литература

- 1 Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory // Journal of the Energy Institute. 2005. – Vol. 78, № 4. – P. 157-171.
- 2 Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука. 1990. 200 с.
- 3 Messerle V.E., Ustimenko A.B. "Plasma ignition and combustion of solid fuel. (Scientific-and-technological basics)." (in Russian). Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing (ISBN: 978-3-8473-9845-5), 2012, 404 p. Available: <http://ljubljudnigi.ru/>
- 4 Мессерле В.Е., Устищенко А.Б. Радиационно-плазменная технология переработки угля // Вестник КазНУ. Серия хим. – 2012. – Т. 68, №4. – С. 107-113.
- 5 Мессерле В.Е., Устищенко А.Б. Плазмохимические технологии переработки топлив // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, Вып. 4. – С. 30-34.
- 6 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования // Новосибирск. Т. 1. – Наука, Сиб. предприятие РАН. – 1998. – 385 с.

References

- 1 Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory. Journal of the Energy Institute, 2005. 78(4). P. 157-171.
- 2 Zhukov M.F., Kalinenko R.A., Levitski A.A., Polak L.S. Plasmochemical processing of coal [Plazmokhimicheskaja pererabotka uglia]. Moscow: Nauka, 1990. 200 p.
- 3 Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma ignition and combustion of solid fuel. (Scientific-and-technological basics). (in Russian). Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing (ISBN: 978-3-8473-9845-5), 2012, 404 p. Available at: <http://ljubljudnigi.ru/>
- 4 Messerle V.E., Ustimenko A.B. Radiant-plasma technology of coal processing [Radiatsionno-plazmennaja tekhnologija pererabotki uglia]. // Vestnik KazNU. Seria khim. – Bulletin KazNU. Chem. Ser. 2012. 4 (68). P. 107-113.
- 5 Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasmachemical technologies of fuel processing [Plazmokhimicheskie tekhnologii pererabotki topliv]. Izvestia vuzov. Khimia i khimicheskaja tekhnologija, 2012. 55 (4). P. 30-34.
- 6 Karpenko E.I., Messerle V.E. Plasma-energy technologies of fuel use [Plazmenno-energeticheskie tekhnologii toplivoispolzovania]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Enterprise RAS, 1998. 385 p.