

УДК 620.92

## О возможности использования мощных плазмотронов переменного тока «Звезда» для газификации водоугольных суспензий

В.В. Кошлаков<sup>1</sup>, С.Г. Ребров<sup>1</sup>, А.Н. Голиков<sup>1</sup>, И.А. Федоров<sup>1</sup>,  
А.Г. Морозов<sup>2</sup>, А.В. Ильюша<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия

<sup>2</sup> ООО «Амальтея-Сервис», Москва, 119180, Россия

<sup>3</sup> ООО «Техноподземэнерго», г. Люберцы, 140002, Россия

e-mail: angolikov@mail.ru; info@vodougol.ru; ooo\_tpeavi@inbox.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-374-384

Поступила в редакцию 30.07.2020

После доработки 03.09.2020

Принята к публикации 03.09.2020

Проведены эксперименты, которые продемонстрировали возможность эффективной газификации водоугольной суспензии при ее непосредственной подаче в камеру мощного плазмотрона переменного тока «Звезда». В обоснование энергетической эффективности и экологических параметров данного технологического процесса выполнены параметрические расчеты равновесного состава продуктов газификации. Определен оптимальный режим работы плазмотрона в зависимости от состава исходных продуктов. Показано, что калорийность получаемого на выходе синтез-газа может превышать 12 МДж/кг.

**Ключевые слова:** трехфазный плазмотрон, водоугольная суспензия, газификация, равновесный состав, энергетическая эффективность.

### Введение

Разработанные ранее для решения задач ракетно-космической отрасли плазмотроны переменного тока с уровнями мощности до нескольких мегаватт могут быть применимы для реализации новых технологий в энергетике, металлургии и ряде других отраслей. Среди достаточно широкого круга возможных направлений использования плазмотронов можно выделить наиболее актуальные, в которых требуется переработка углеродсодержащих веществ:

1) переработка бытовых и промышленных отходов;

2) газификация углей и тяжелых нефтяных фракций.

В обоих случаях конверсия углеродсодержащих соединений приводит к получению синтез-газа, который может непосредственно использоваться как экологически чистое топливо,

а также представляет большой интерес для химических технологий.

Одним из наиболее интересных направлений в плане практической реализации в промышленности представляется использование плазмотронов для газификации тонкодисперсных водоугольных суспензий (ВУС). Одной из перспективных программ развития угольной энергетики является использование водоугольного топлива (ВУТ) [1]. Задача газификации ВУС важна для развития современной угольной энергетики, которая предполагает наличие экологически чистых и экономически выгодных технологий, причем не только на заключительной стадии использования твердого топлива (угля), но также и в процессах добычи, транспортировки и переработки угля, включая функционирование всей логистической инфраструктуры по использованию больших запасов твердого топлива.

Характеристики водоугольного топлива, которые делают его привлекательным в энергетике, отмечены в работе [2]. Тонкодисперсная водоугольная суспензия, технология получения которой в настоящее время освоена, представляет собой однородную (гомогенную) смесь измельченного угля, воды и в ряде случаев стабилизирующей добавки. По внешнему виду водоугольные суспензии (водоугольное топливо) соответствуют жидкому топливу с вязкостью, близкой к мазуту. Основной проблемой при использовании ВУТ является его низкая реакционная способность на начальном участке горения [2]. Известны технологии инициации зажигания и горения водоугольного топлива другим топливом, мазутом или высокорекционной угольной пылью. В работе [2] также отмечено, что перспективным вариантом воспламенения водоугольного топлива следует считать применение плазменной технологии.

Необходимо отметить ряд принципиальных моментов, которые требуются для эффективного использования плазмотронов в промышленности. Во-первых, должна обеспечиваться высокая производительность технологического процесса. Из соображений стехиометрии химических реакций понятно, что для переработки веществ с высокой скоростью плазмотрон должен работать на больших расходах рабочего тела. Во-вторых, режим работы плазмотронов должен регулироваться в широких пределах. В частности, это относится к давлению газа, так как на выходе могут присутствовать устройства (реакторы) с различным (а также и с переменным) гидравлическим сопротивлением, которые не должны нарушать выбранный режим работы плазмотрона. Наконец, для оптимальной организации технологического процесса и обеспечения его энергетической эффективности требуется правильный выбор рабочего тела плазмотрона.

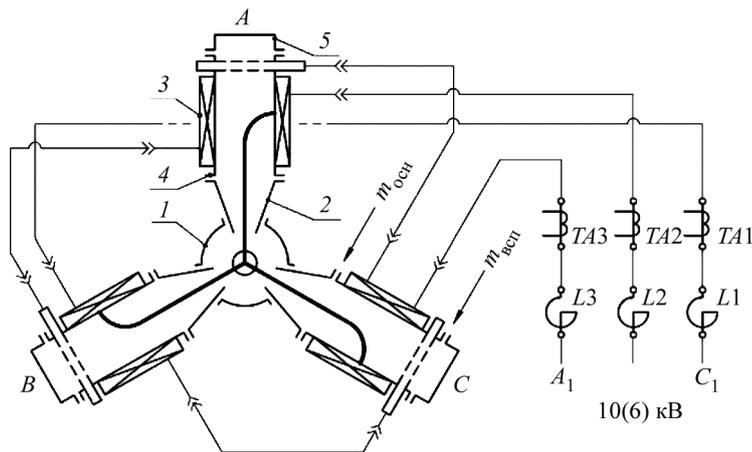
В настоящее время общепризнано, что наиболее перспективной технологией конверсии углеродсодержащих веществ (в том числе и техногенных отходов) является паровая плазмохимическая переработка, основанная на высокотемпературном воздействии и химическом преобразовании исходных продуктов с помощью термической плазмы водяного пара. При взаимодействии с углеродсодержащими веществами плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом.

Поэтому созданию пароводяных плазмотронов посвящено достаточно много работ [3–5]. Нами также было экспериментально опробовано несколько вариантов работы трехфазного плазмотрона «Звезда» при дуговой мощности порядка 1 МВт с использованием воды и водяного пара в качестве рабочего тела и выявлены возникающие при этом проблемы.

### **Особенности работы мощных трехфазных плазмотронов переменного тока**

В настоящее время наиболее мощными и эффективными устройствами для получения газовых потоков с экстремальными параметрами по расходу, энтальпии и давлению являются трехфазные электродуговые плазмотроны с непосредственным питанием от высоковольтных промышленных электросетей [6–10]. Они могут использоваться как источники высокотемпературного газа в тех случаях, когда необходимо обеспечить возможность выбора в широких пределах параметров газового потока: его расхода, температуры и давления. Такая возможность имеет место вследствие того, что дуговая мощность плазмотрона, которая определяется токами и напряжениями дуговых разрядов, также может изменяться в широком диапазоне. Дуговые токи можно изменять переключением индуктивных балластных нагрузок (реакторов), которые включаются последовательно с дуговыми разрядами. Напряжения на дуговых разрядах, которые уменьшаются при росте дуговых токов, могут быть сильно увеличены при росте расхода и давления газа в плазмотроне. Давление газа в камере плазмотрона, зависящее от дуговой мощности, расхода газа и диаметра выходного сопла, также может выбираться в широком диапазоне – от единиц до примерно сотни атмосфер.

Температура газа в камере плазмотрона может изменяться в диапазоне от 2500 до 5000 К, а при использовании на выходе плазмотрона газовых смесителей, которые используются для точной регулировки температуры, этот диапазон может быть расширен в сторону меньших температур с одновременным увеличением расхода газа (до нескольких кг/с). В качестве рабочих тел могут использоваться воздух, а также азот и ряд других газов, в том числе инертные (аргон, гелий), а также углеродсодержащие газы,



**Рис. 1.** Схема плазмотрона «Звезда» и его подключение к электросети: 1 – смесительная камера; 2 – конфузор; 3 – магнитные катушки; 4 – электрод; 5 – затыльник; A, B, C – места подключения фаз электросети

включая  $\text{CO}_2$ . Использование мощных плазмотронов требует создания определенной инфраструктуры: систем высокого давления с регулятором подачи газа, системы охлаждения с большим расходом воды, системы высоковольтного электропитания со стабилизирующими ток индуктивными реакторами. Для безопасной работы требуются также работающие в реальном времени системы диагностики и автоматического управления. Накопленный к настоящему времени большой опыт работы с мощными плазмотронами позволяет качественно изготавливать как сами плазмотроны, так и инфраструктуру для них.

С точки зрения электрофизики плазмотроны являются электродуговыми нагревателями газа со стабилизированными в пространстве электрическими дугами. В мощных трехфазных плазмотронах применяется комбинированная (газодинамическая и электромагнитная) стабилизация дуговых разрядов. Газодинамическая стабилизация обеспечивается за счет вихревой подачи газа в дуговые каналы. Это позволяет создавать разницу давлений и температур между пристеночными зонами и осью дугового канала. Так как напряжение пробоя газа зависит от температуры и давления, дуговой разряд удастся удерживать на оси разрядного канала, а холодный вихрь газа у стенок защищает их от расплавления. Если задан расход газа через плазмотрон, то скорости газа в нем зависят также от диаметра выходного сопла: при уменьшении диаметра давление в плазмотроне будет расти, а скорости газа в нем уменьшаться.

Существует минимальный диаметр сопла, при котором вихревая газодинамика в плазмотроне еще будет работать. Установка на выходе плазмотрона смесителя с дополнительной подачей газа эквивалентна уменьшению выходного сопла плазмотрона – в этом случае можно рассчитать эффективный диаметр выходного сопла, который зависит как от реальных выходных сопел смесителя и плазмотрона, так и от соотношения расходов газа через них. Для электромагнитной стабилизации дуги и, главное, для быстрого перемещения по поверхности электродов контактирующих с ним участков дуги (так называемых «ножек» дуговых разрядов) на внешней поверхности электродов установлены электродные катушки, которые создают внутри электродов магнитное поле, способное вращать ножки дуговых разрядов синхронно с газовым вихрем.

Для этого фазы переменного магнитного поля и переменного тока дуги внутри электрода должны совпадать, что достигается специальной схемой подключения электродных катушек и выбором толщины стенок электродов (при прохождении через стенку электрода магнитное поле претерпевает фазовый сдвиг). Быстрое перемещение по поверхности электродов ножек дуговых разрядов способствует увеличению ресурса работы электродов и плазмотрона в целом. Схема плазмотрона переменного тока, который имеет устоявшееся в технике название «Звезда», представлена на рис. 1.

Плазмотрон состоит из трех идентичных дуговых каналов, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу, и общей смесительной камеры 1. Дуговой канал содержит затыльник 5, трубчатый электрод 4 и конфузор 2, назначением которого является интенсификация нагрева газа. На наружной поверхности электродов установлены магнитные катушки 3. К электродам подведены фазы питающей сети, причем они подключены через магнитные катушки соседней фазы. Чем больше дуговой ток, тем сильнее магнитное поле внутри дугового канала. Электроды отделены от конфузоров электрическими изоляторами. Эти изоляторы одновременно играют роль завихрителей – устройств, через которые осуществляется тангенциальная подача

рабочего газа. Основной расход рабочего газа подается через завихрители, небольшая часть расхода (10–20%) подается со стороны затыльника. Смесительная камера I содержит выходное сопло, ось которого перпендикулярна плоскости рисунка. Для промышленной (10 кВ) трехфазной сети плазмотрон представляет собой активную нелинейную и равномерную по фазам нагрузку. Зажигание каждой дуги производится либо с помощью вспомогательного высоковольтного разряда, либо путем пробоя промежутка электрод–конфузор рабочим напряжением при пониженном расходе газа. Чтобы обеспечить устойчивое горение каждой дуги и иметь возможность изменять величину тока дуги, в каждую фазу последовательно с дугой включена катушка индуктивности ( $L1-L3$ ), причем с помощью переключений можно менять величину индуктивности и стабилизировать ток на разных уровнях. Контроль токов производится с помощью измерительных трансформаторов (ТА1–ТА3).

Важными для практического использования плазмотронов являются факторы, которые определяют насколько плазмотрон удобен в эксплуатации и, в частности, какой у него ресурс. В случае плазмотрона «Звезда» все узлы, кроме электродов, при правильной эксплуатации теоретически не подвержены износу. Эрозия электродов возникает в местах контакта дуги с материалом электрода. Кручение ножки дуги с помощью магнитного поля, создаваемого магнитной катушкой, а также иногда применяющееся непрерывное изменение (девиация) соотношения расходов газа, подаваемого через завихрители и затыльники, способствуют равномерному износу электродов. Другим теплонапряженным участком дугового канала, который также может влиять на ресурс и надежность плазмотрона, является поверхность конфузора в месте входа газа в общую камеру плазмотрона. Этому способствует сразу несколько факторов. Во-первых, в конфузорах дуга имеет большое сопротивление за счет радиального вдува в нее холодного газа, поэтому в конфузорах осуществляется максимальное вложение электрической энергии в газ. Во-вторых, торцы конфузоров подвержены большим тепловым потокам (как лучистым, так и конвективным) со стороны высокотемпературной камеры. Перегретый участок вблизи торца конфузора может способ-

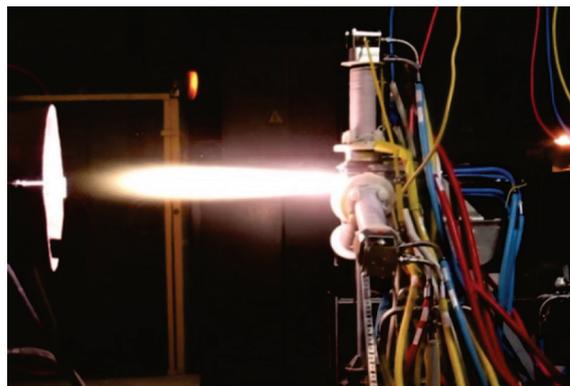


Рис. 2. Плазмотрон «Звезда» в работе

ствовать шунтированию на него дугового разряда, что резко увеличивает и без того большие тепловые потоки в стенку данного узла, делая невозможным его охлаждение. В последних модификациях плазмотронов «Звезда» используются сменные наконечники конфузоров. Вид автономно работающего плазмотрона «Звезда» типовой конструкции на дуговой мощности 4 МВт показан на рис. 2. Данный плазмотрон позволяет работать при давлениях в камере до 4 МПа.

### Предварительные эксперименты с подачей в плазмотрон воды и водяного пара

Для выбора оптимальной схемы подачи водоугольных суспензий в плазмотрон был проведен ряд экспериментов с подачей в плазмотрон чистой воды и водяного пара. Наиболее простым вариантом работы с водой является ее ввод под давлением через дюзы малого диаметра в завихрители плазмотрона, где она вместе с основным рабочим телом (воздухом) образует мелкодисперсную аэрозоль. При этом плазмотрон до подачи воды включается на воздухе и выходит на стационарный температурный режим. Тогда в предварительно нагретых дуговых каналах вводимая аэрозоль должна превращаться в газовую смесь, содержащую сухой пар высокого давления. Однако такой вариант оказался неработоспособен без внесения изменений в конструкцию плазмотрона, которая была рассчитана на хорошие изоляционные свойства рабочего тела. После необходимого увеличения изоляции электродов от заземленных конфузоров и камеры плазмотрона был испытан вариант работы, в котором вода подавалась в воздушный коллектор работающего на воздухе

плазмотрона через диспергирующие дюзы. При этом рабочее тело поступает в завихрители плазмотрона в виде готового аэрозоля с равномерной концентрацией воды. В данном варианте стабильная работа плазмотрона была получена, но только при массовых содержаниях воды менее 50% от суммарного расхода. Очевидно, что оба рассмотренных варианта не допускают работы плазмотрона на чистом водяном паре, поскольку для диспергирования воды в рабочем теле должна присутствовать значительная газовая составляющая.

В альтернативном варианте пар приготавливался до плазмотрона с использованием парогенератора высокого давления. Для того чтобы не допустить конденсации пара, плазмотрон и в этом случае запускался на воздухе для прогрева дуговых каналов. Кроме того, должен быть прогрет весь тракт подачи рабочего тела в плазмотрон. Это требует подачи в плазмотрон предварительно нагретого воздуха. Эксперименты с подачей в плазмотрон воздуха с температурой более 200°C от внешнего проточного нагревателя привели к периодическим пробоям

вследствие снижения изоляционной стойкости как самого газа, так и изоляционных материалов. В дальнейших опытах после запуска плазмотрона на воздухе в воздушный коллектор плазмотрона подавали пар от трубчатого парогенератора высокого давления, который при росте расхода пара перекрывал подачу воздуха в коллектор. В последнем варианте работы плазмотрон устойчиво работал на практически чистом водяном паре. Однако разборка плазмотрона после 80 с непрерывной работы показала, что сильной эрозии подвержена практически вся внутренняя поверхность дугового канала – как электрода, так и конфузора, что не позволяет говорить о большом ресурсе работы плазмотрона.

Наилучшим оказался вариант, в котором вода подается непосредственно в камеру плазмотрона. Подача производилась через дюзу, установленную во фланце камеры, расположенном напротив выходного сопла. Подача воды в камеру не нарушает работу дуговых каналов, а увеличение электропроводности газа в камере благоприятно для замыкания в ней дуговых разрядов. Кроме того, снижение температуры в камере при подаче воды значительно облегчает тепловой режим камеры, так как тепловые потоки в стенки уменьшаются пропорционально снижению температуры.

### Непосредственная подача водоугольной суспензии в камеру плазмотрона, анализ полученных результатов

На основании экспериментов с подачей воды было принята схема с непосредственной подачей водоугольной суспензии (ВУС) в камеру плазмотрона (рис. 3).

Подачу ВУС производили после запуска плазмотрона на воздухе и выхода его на стационарный температурный режим через форсунку, расположенную в центре противоположного от выходного сопла фланца камеры. Содержание твердой фазы в ВУС составляло 60%, воды 40%, гранулометрический состав – частицы менее 120 мкм. Изготовителем ВУС является ООО «Амальтеа-Сервис». Подача ВУС

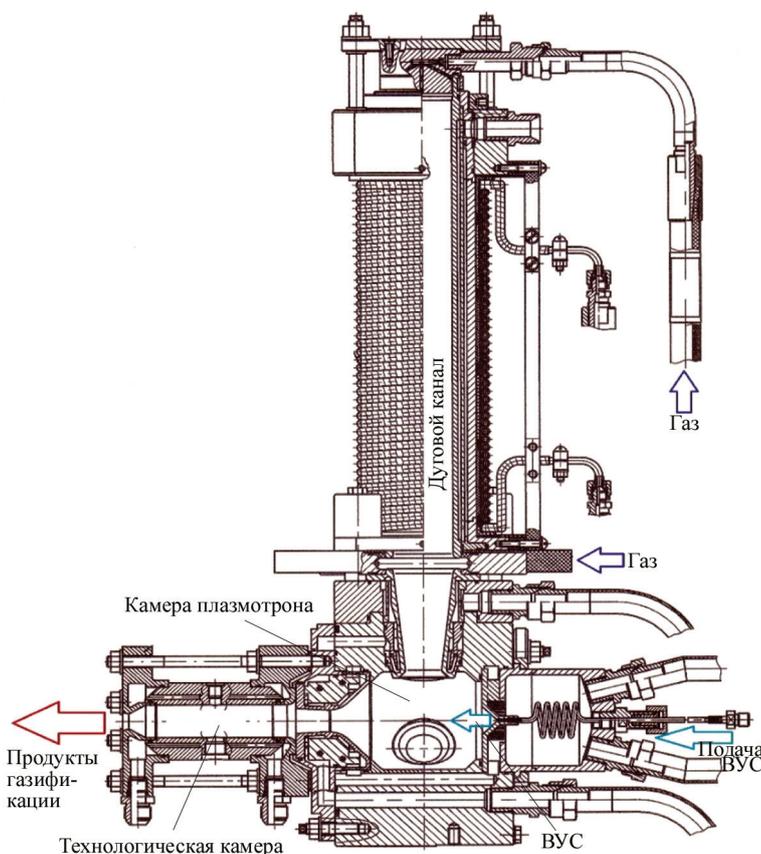


Рис. 3. Схема подачи водоугольной суспензии в камеру плазмотрона «Звезда»

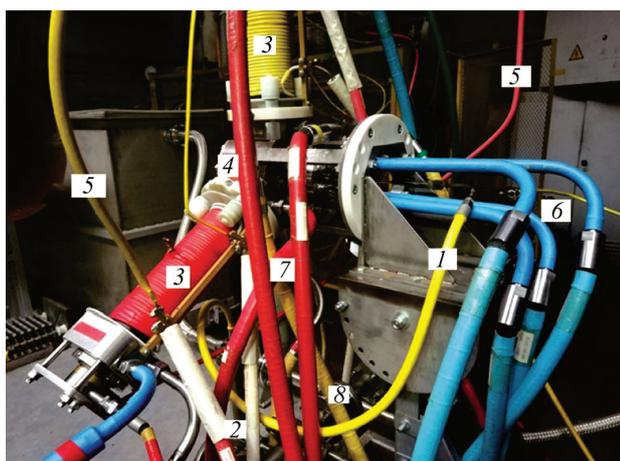


Рис. 4. Плазматрон с системой подачи водоугольной суспензии в камеру: 1 – шланг подачи ВУС; 2 – пневмоцилиндр с ВУС; 3 – дуговые камеры; 4 – смесительная камера; 5 – кабели высокого напряжения; 6 – сливные водяные шланги; 7 – напорные водяные шланги; 8 – шланг подачи газа в плазматрон

осуществлялась с использованием пневмоцилиндра давлением около 4 МПа. На рис. 4 приведен вид плазматрона и его систем.

В табл. 1 приведен режим работы плазматрона до момента подачи ВУС в камеру (стационарный режим плазматрона).

При подаче ВУС электрическая мощность плазматрона несколько увеличилась (табл. 2). Массовый расход ВУС определяли по известному объему пневмоцилиндра, времени подачи и удельному весу ВУС.

Температура в камере плазматрона во время подачи ВУС была рассчитана расходным методом (по давлению в камере) при следующих параметрах газовой смеси: показатель адиабаты  $k = 1.27$ , молекулярная масса  $M = 22.4$  г/моль. Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что во время подачи ВУС в камере выросло давление, несмотря на то что температура упала. Рост давления вызвал рост дуговых напряжений и, соответственно, дуговой мощности. На рис. 5 приведены графики зависимости от времени следующих параметров: давления в камере плазматрона, дуговой мощности и его тепловой эффективности (КПД). Последний параметр определяется как отношение мощности, которая вкладывается в рабочее тело, к его дуговой мощности. Мощность, которая вкладывается в рабочее тело, равна разности дуговой мощности и мощности, отводимой в систему охлаждения плазматрона (сброс мощности в систему охлаждения калориметрируется при испытаниях). Примечательно, что КПД плазматрона не падает

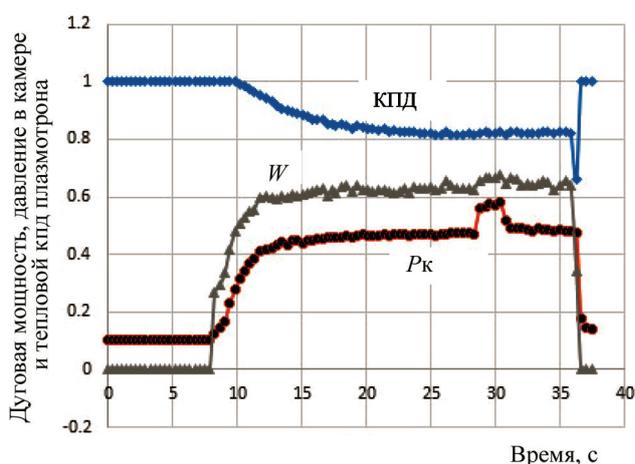


Рис. 5. Дуговая мощность  $W$ , МВт, давление в камере  $P_k$ , МПа, и тепловая эффективность плазматрона КПД в запуске с подачи водоугольной суспензии непосредственно в камеру

Таблица 1. Режим работы плазматрона до подачи ВУС в его камеру

Параметр	Значение параметра
Дуговая мощность $W$ , кВт	640
Давление в камере $P_k$ , МПа	0.47
Температура в камере $T_k$ , К	3430
Диаметр выходного сопла $d_N$ , мм	20
Расход плазмообразующего газа $G_g$ , г/с	97

Таблица 2. Режим работы плазматрона во время подачи ВУС в камеру

Параметр	Значение параметра
Дуговая мощность $W$ , кВт	677
Давление в камере $P_k$ , МПа	0.581
Температура в камере $T_k$ , К	1350
Расход газа $G_g$ , г/с	97
Расход ВУС $G_{ВУС}$ , г/с	70.3

при росте дуговой мощности во время подачи ВУС, он остается на уровне  $\eta = 0.8$ . Это связано с уменьшением тепловых потерь в камере вследствие снижения температуры при подаче ВУС.

В эксперименте расход ВУС был стабильный, закоксовывания канала подачи не происходило. После прекращения подачи ВУС плазматрон продолжал нормально работать на параметрах, которые достаточно близки к тем, которые наблюдались до подачи ВУС (см. табл. 1).

Оценка равновесного состава продуктов газификации в проведенном эксперименте с ВУС проводилась с использованием программы для моделирования фазовых и химических равновесий «ТЕРРА» [11]. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Результаты расчета

Таблица 3. Расчетный состав смеси после газификации ВУС в работающем на воздухе плазмотроне

Компонент	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	NO	C	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Содержание, моль/кг	9.05	0.124	15.9	0.4·10 <sup>-10</sup>	3.35	17.4	0.12	0.065

состава основных компонентов смеси на выходе плазмотрона приведены в табл. 3.

### Энергетическая эффективность и экологические факторы при газификации водоугольной суспензии в плазмотроне

Оценим калорийность полученной на выходе плазмотрона газовой смеси как сумму калорийностей CO (283 кДж/моль) и H<sub>2</sub> (240 кДж/моль) с соответствующими мольными долями. Для приведенного в табл. 3 состава она составляет  $Q_{см} = 7.1$  МДж/кг. Представляется интересным сравнить  $Q_{см}$  с величиной удельных энергозатрат на работу плазмотрона, определяемую как отношение дуговой мощности плазмотрона к расходу смеси:  $Q_{пл} = W/G_{сум}$ . Для оценки энергетической эффективности процесса газификации введем коэффициент  $K = Q_{см}/Q_{пл}$ . Принимая для условий эксперимента  $W = 0.677$  МВт,  $G_{сум} = 0.167$  кг/с, получаем  $Q_{пл} = 4.1$  МДж/кг,  $K = Q_{см}/Q_{пл} \approx 1.75$ . Достаточно невысокая калорийность смеси обусловлена наличием азота, который является балластом.

Одним из путей увеличения калорийности продуктов плазменной переработки водоугольной суспензии является использование CO<sub>2</sub> в качестве рабочего тела плазмотрона. На рис. 6 показаны результаты расчета равновесного состава выходной смеси при различных температурах при подаче в плазмотрон 50% CO<sub>2</sub>+50% ВУС (по массе). Расчет показывает, что максимальный выход синтез-газа имеет место уже при температуре ~1500 К.

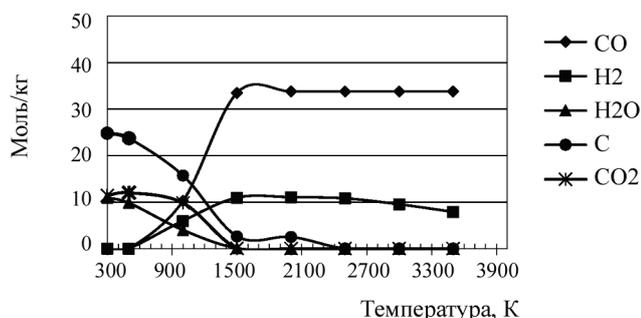


Рис. 6. Зависимость мольного состава выходной смеси от температуры

Как видно из рис. 6, в широком температурном диапазоне примерно от 1500 до 3000 К на выходе плазмотрона можно получать практически чистый синтез-газ (смесь водорода и окиси углерода), масса которого составляет примерно 0.94 от массы компонентов исходного рабочего тела, оставшиеся 6% приходятся на долю экологически безопасных компонентов CO<sub>2</sub> (4%) и H<sub>2</sub>O (около 2%). Конечно, реальный состав ВУС несколько отличается от принятого в расчетах идеального состава, но принципиальной картины газификации ВУС в плазмотроне это не меняет. Для количественного сравнения энергоэффективности пары воздух+ВУС и CO<sub>2</sub>+ВУС целесообразно сравнить величины коэффициента  $K$  при одинаковых энергозатратах  $Q_{пл}$ . Удельная дуговая энергия  $Q_{пл}$  с учетом теплового КПД плазмотрона расходуется на увеличение полной энтальпии его рабочего тела  $\Delta I$ . Зависимости величины  $K$  от  $Q_{пл}$  для указанных составов приведены на рис. 7.

При  $Q_{пл} = 4.1$  МДж/кг, который имел место в эксперименте воздух+ВУС, значение  $K$  для пары CO<sub>2</sub>+ВУС примерно такое же. Однако при увеличении  $Q_{пл}$  разница в величинах  $K$  заметно растет. Так, при  $Q_{пл} \geq 6$  МДж/кг, значение  $K$  для пары CO<sub>2</sub>+ВУС превышает соответствующее значение для пары воздух+ВУС в полтора раза, что свидетельствует о целесообразности замены воздуха на CO<sub>2</sub> для повышения калорийности смеси при использовании ВУС.

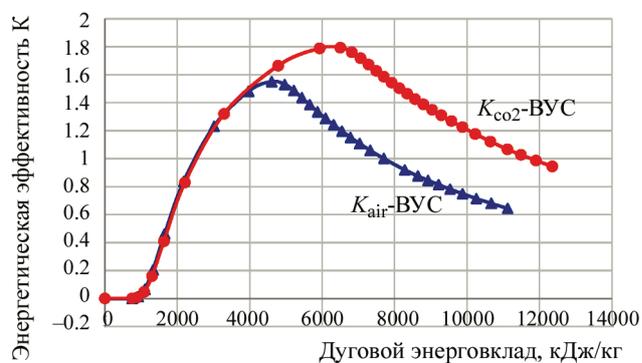


Рис. 7. Сравнительные зависимости коэффициента энергетической эффективности газификации  $K$  от энергозатрата  $Q_{пл}$  при работе плазмотрона на смесях воздух+ВУС (50%/50%) и CO<sub>2</sub>+ВУС (50%/50%)

Наличие экстремумов для коэффициента энергетической эффективности  $K$  (рис. 7) означает, что для заданного состава продуктов на входе плазматрона всегда можно определить оптимальный режим его работы (так как он определяет удельный энерговклад в дуговые разряды). Одним из отрицательных моментов при использовании в технологических целях мощных плазматронов, работающих на воздухе, с точки зрения экологии, является достаточно высокое содержание в продуктах истечения окислов азота (рис. 8).

Кардинально содержание окиси азота уменьшается при работе плазматрона с углеродсодержащими веществами. На рис. 9–11 показаны равновесные составы среды в камере плазматрона в зависимости от температуры для соотношения воздух: ВУС = 100:70 (по массе), что соответствует проведенному эксперименту. Видно, что в присутствии углерода практически прекращается окисление азота. Расчеты состава смеси, представленные на рис. 9–11, проведены для различного количества углерода в ВУС: 60, 50 и 40% соответственно. Обращает на себя внимание, что процентное содержание углерода в ВУС может качественно влиять на состав

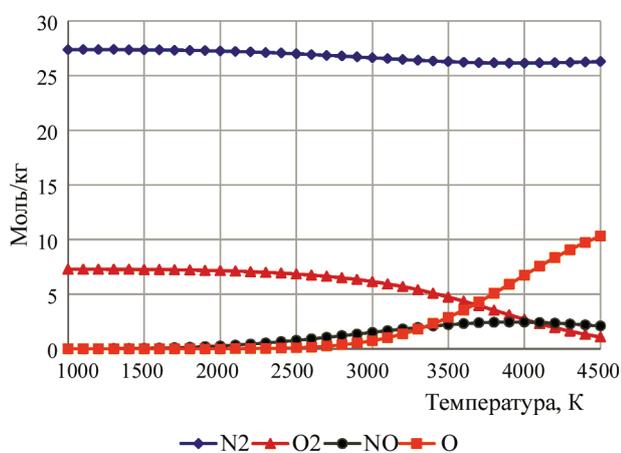


Рис. 8. Результаты расчета состава газовой смеси в камере плазматрона в зависимости от температуры при работе на воздухе

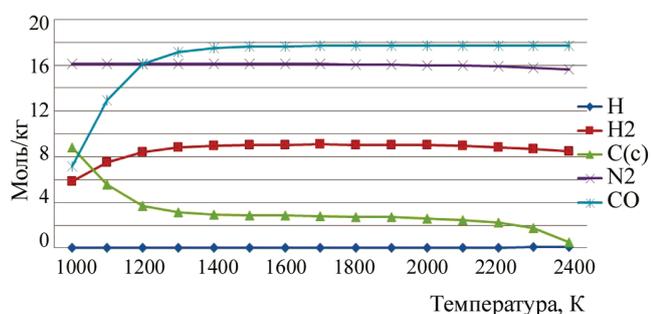


Рис. 9. Состав выходной смеси при работе плазматрона на рабочем теле воздух–ВУС в соотношении 100:70. Содержание углерода в ВУС 60%

смеси на выходе. Так, при 60% углерода в ВУС в выходной смеси значительная доля углерода присутствует в конденсированной фазе.

При снижении содержания углерода до 50% конденсированная фаза отсутствует (рис. 10), появляются небольшие доли воды и  $\text{CO}_2$ .

При дальнейшем снижении содержания углерода в ВУС до 40% конденсированная фаза углерода также отсутствует, но появляется значительное содержание  $\text{CO}_2$  с одновременным снижением содержания  $\text{CO}$  (рис. 11).

На рис. 12 показан состав газовой смеси в камере (в зависимости от температуры) при работе

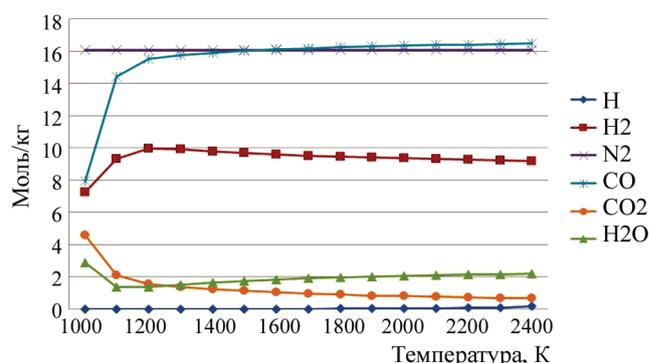


Рис. 10. Состав выходной смеси при работе плазматрона на рабочем теле воздух–ВУС в соотношении 100:70. Содержание углерода в ВУС 50%

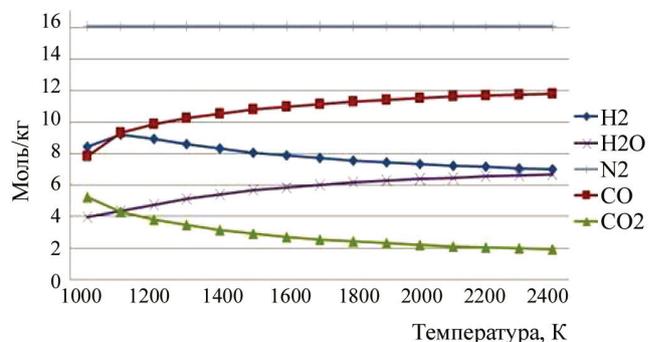


Рис. 11. Состав результирующей смеси при работе плазматрона на рабочем теле воздух–ВУС в соотношении 100:70. Содержание углерода в ВУС 40%

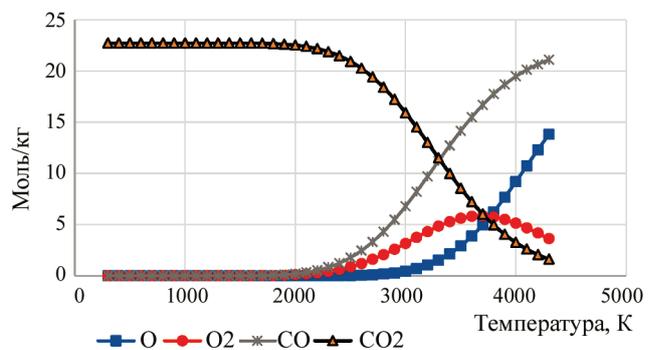


Рис. 12. Состав смеси в камере плазматрона в зависимости от температуры при работе плазматрона на углекислом газе

на чистом углекислом газе. В качестве специфики работы на  $\text{CO}_2$  необходимо отметить, что углекислый газ как рабочее тело обладает примерно вдвое большей энергоемкостью, чем воздух. Поэтому при работе на  $\text{CO}_2$  при одинаковой дуговой мощности температура в камере плазмотрона будет как минимум на 1000 К меньше, чем при работе на воздухе. Но и при пониженных температурах в смеси отсутствует углерод в конденсированной фазе, что представляется благоприятным фактором для работы плазмотрона.

### Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования с использованием плазмотрона «Звезда» мегаваттного класса мощности предложен метод газификации водоугольных суспензий. Особенностью процесса является ввод водоугольной суспензии непосредственно в камеру плазмотрона, дуговые каналы которого работают на газе. Камера при этом выполняет роль плазмохимического реактора. Снижение температуры в камере и увеличение электропроводности газа при вводе водоугольной суспензии положительно сказывается на стабильности и надежности работы плазмотрона. Большим преимуществом использования плазмотронов типа «Звезда» является возможность достижения большой производительности процесса газификации и обеспечение возможности работы в широком диапазоне давлений и температур. Проведенные параметрические расчеты равновесного состава продуктов газификации позволили выявить ряд результатов, характеризующих энергетическую эффективность и экологическую безопасность процесса газификации водоугольной суспензии. Оказалось, что в случае работы плазмотрона на воздухе конверсия углеродсодержащих веществ в нем позволяет практически полностью убрать из выхлопа такую вредную составляющую как окись азота. Оптимизация содержания углерода в водоугольной суспензии позволяет получить такие режимы газификации, при которых на выходе практически полностью отсутствует углерод в конденсированной фазе и сведено к минимуму содержание углекислого газа. Энергетическая эффективность процесса газификации, которая характеризуется отношением химической калорийности выходного синтез-газа к энергии, вложенной в дуговые разряды плазмотрона, для рассмотренных режимов газифи-

кации превышает 1.7. Калорийность выходной смеси для случая работы плазмотрона на воздухе составляет порядка 7 МДж/кг, но она может быть повышена до величины более 12 МДж/кг при использовании в качестве рабочего тела плазмотрона углекислого газа. Использование углекислого газа представляет самостоятельный интерес как для возможного увеличения ресурса работы плазмотрона, так и с точки зрения утилизации (улавливания и рециркуляции)  $\text{CO}_2$  в различных промышленных технологиях. Поэтому данное направление представляется весьма перспективным для дальнейших экспериментальных работ по поиску и внедрению инновационных промышленных технологий с использованием мощных плазмотронов. Очевидно, что текущие мировые тренды на снижение доли угля в качестве топлива для выработки тепла и электричества накладывают серьезные ограничения на вновь разрабатываемые в этом направлении технологии. Предлагаемое использование мощных плазменных генераторов позволяет не только оптимизировать режимы работы энергетических котлов мощностью от единиц до сотен мегаватт, но и использовать водоугольные суспензии, полученные из различных отходов в качестве дополнительного топлива. В частности, разрабатываемое решение может быть использовано для утилизации угольных отходов, прежде всего фильтр-кека, а также нефтяных сланцев и отходов другого происхождения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Морозов А.Г.** О результатах практического использования водоугольного топлива в Ирландии // Экологический вестник России. 2018. № 3. С. 23–26.
2. **Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Серапт Ф.А.** Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания // Доклады АН ВШ РФ. 2015. №1(26). С. 85–93. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-85-93
3. **Серба Е.О.** Создание и исследование электродугового трехфазного пароводяного плазмотрона переменного тока: дисс... канд. техн. наук. 01.04.13. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 2013. 138 с.
4. **Радько С.И.** Разработка и исследование технологического оборудования для переработки техногенных отходов с использованием пароводяного плазмотрона: дисс... канд. техн. наук. 05.09.10. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 2014. 124 с.
5. **Даниленко А.А.** Экспериментальные и теоретические исследования процессов плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов: дисс... канд. техн. наук. 01.04.14. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 2012. 204 с.

6. Svirchuk Y.S., Golikov A.N. Three-phase Zvezda-type plasmotrons // IEEE Transaction on Plasma Science. December 2016. V. 44. N 12. P. 3042–3047.
7. Голиков А.Н., Зайкин Н.С., Свирчук Ю.С. Патент РФ на изобретение «Трехфазный электродуговой плазмотрон и способ его запуска» № 2577332 от 20.03.2016 г. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели». № 8.
8. Голиков А.Н., Кочетков Ю.М., Свирчук Ю.С., Федотов В.Б. Электродуговые плазмотроны Центра Келдыша // Двигатель. 2005. № 1(37). С. 50.
9. Свирчук Ю.С., Голиков А.Н., Журавлев П.Д., Федотов В.Б. Промышленные трехфазные электродуговые плазмотроны типа «Звезда». Конверсия в машиностроении. 2002. № 5. С. 71–74
10. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
11. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий // Труды XIV Межд. конф. по хим. термодинамике. СПб., 2002.

## The possibility of using powerful AC plasmotrons Zvezda for gasification of water-coal suspensions

V.V. Koshlakov<sup>1</sup>, S.G. Rebrov<sup>1</sup>, A.N. Golikov<sup>1</sup>,  
I.A. Fedorov<sup>1</sup>, A.G. Morozov<sup>2</sup>, A.V. Ilyusha<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SSC FSUE "Keldysh Center," Moscow, 125438, Russia

<sup>2</sup> Ltd Amaltea-Service, Moscow, 119180, Russia

<sup>3</sup> Ltd Technopodzemenergo, Lyubertsy, Moscow region 140002, Russia  
e-mail: andgolikov@mail.ru; info@vodougol.ru; ooo\_tpeavi@inbox.ru

Experiments were carried out that demonstrated the possibility of effective gasification of the water-coal suspension when it is directly supplied to the chamber of a powerful AC plasmatron Zvezda the arc channels of which operate on gas. The chamber acts as a plasma-chemical reactor. A great advantage of the use of Zvezda-type plasmotrons is the possibility of achieving the high rates of the gasification process and the possibility of operating in a wide range of pressures and temperatures. The parametric calculations of the equilibrium composition of gasification products revealed a number of results characterizing the energy efficiency and environmental safety of the water-coal suspension gasification process. It turned out that in the case of air operation of plasmatron, conversion of carbon-containing substances in it allows almost complete removal of such harmful component as nitrogen oxide from exhaust. Optimization of carbon content in water-coal suspension allows to obtain such gasification modes in which there is practically no carbon in condensed phase at the outlet and carbon dioxide content is minimized. The energy efficiency of the gasification process, which is characterized by the ratio of the chemical caloric content of the output synthesis gas to the energy invested in the arc discharges of the plasmatron, for the considered gasification modes exceeds 1.7. The calorie content of the output mixture for the air operation of the plasmatron is of the order of 7 MJ/kg, but it can be increased to a value greater than 12 MJ/kg when carbon dioxide is used as the working medium of the plasmatron.

**Keywords:** three-phase plasmatron, water-coal suspension, gasification, equilibrium composition, energy efficiency.

## REFERENCES

1. Morozov A.G. O rezul'tatakh prakticheskogo ispol'zovaniya vodougol'nogo topliva v Irlandii [On the results of practical use of water-coal fuel in Ireland]. *Ekologicheskij vestnik Rossii – Enviromental bulletin of Russia*, 2018, no. 3, pp. 23–26. In Russ.
2. Ovchinnikov Yu.V., Boyko E.E., Serant F.A. Problemy szhiganiya vodougol'nykh topliv i predlozheniya po razrabotke tekhnologii szhiganiya [The problem of burning coal-water fuel and proposale for the development combustion technology]. *Doklady AN VSH RF – Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*, 2015, no. 1(26), pp. 85–93. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-85-93
3. Serba E.O. Sozdanie i issledovanie ehlektrodugovogo trekhfaznogo parovodyanogo plazmotrona peremennogo toka. Diss. cand. tech. nauk [Creation and study of electric arc three-phase AC steam-water plasmatron. Cand. eng. sci. dis]. St. Petersburg, 2013. 138 p.
4. Radko S.I. Razrabotka i issledovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya pererabotki tekhnogennykh otkhodov s ispol'zovaniem parovodyanogo plazmotrona. Diss. cand.

- tech. nauk [Development and research of technological equipment for processing of man-made wastes using steam-water plasmatron. Cand. eng. sci. dis.]. Novosibirsk, 2014. 124 p.
5. **Danilenko A.A.** *Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya protsessov plazmennoj gazifikatsii uglerod-soderzhashhikh tekhnogennykh otkhodov*. Diss. cand. tech. nauk [Experimental and theoretical studies of plasma gasification processes of carbon-containing man-made wastes. Cand. eng. sci. dis.]. Novosibirsk, 2012. 204 p.
  6. **Svirchuk Y.S., Golikov A.N.** Three-phase Zvezda-type plasmatrons. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 12, pp. 3042–3047. DOI: 10.1109/TPS.2016.2571746
  7. **Golikov A.N., Zaykin N.S., Svirchuk Yu.S.** *Three-phase arc plasmatron and way of its start*. Patent RF No. 2577332, 2016.
  8. **Голиков А.Н., Кочетков Ю.М., Свирчук Ю.С., Федотов В.Б.** Электродуговые плазматроны Центра Келдыша // *Двигатель*. 2005. № 1(37). С. 50.
  9. **Свирчук Ю.С., Голиков А.Н., Журавлев П.Д., Федотов В.Б.** Промышленные трехфазные электродуговые плазматроны типа «Звезда». *Конверсия в машиностроении*. 2002. № 5. С. 71–74.
  10. **Koroteev A.S., Mironov V.M., Svirchuk Yu.S.** *Plazmotrony: konstruksii, kharakteristiki, raschet* [Plasmatrons: designs, characteristics, calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 296 p. In Russ.
  11. **Trusov B.G.** Programmnyaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesij [TERRA software system for phase modeling and chemical equilibrium]. *Proc. of the XIV International Convention on Chemical and Thermodynamics*, SPb, 2002. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор Бублик Н.П., e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 15.09.2020. Подписано в печать 25.09.2020.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена». Заказ № 56

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»