

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 68 с., 11 рис., 15 табл., 20 источников, 1 прил.

Ключевые слова: СВЧ, плазмотрон, природный газ, конверсия, углерод, водород.

Объектом исследования является глубокая переработка углеводородного газа в плазме СВЧ – разряда.

Цель работы – исследование потенциальных возможностей СВЧ плазмотронов для конверсии природного газа.

В результате исследования выполнены расчеты волноведущей системы плазмотрона экспериментально определены параметры согласования, произведена оценка затухания электромагнитной энергии в прямоугольном волноводе, выполненном из меди, алюминия, нержавеющей стали. На основании полученных данных осуществлен выбор конструкционного материала для изготовления плазмотрона.

Область применения: газодобывающая отрасль. Метод может применяться как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Экономическая эффективность / значимость работы предложенный метод отличается от других методов невысокой стоимостью установки, простой реализацией, следовательно, метод обладает высокой экономической эффективностью.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Word 2010.

Перечень стандартов,
используемых при оформлении пояснительных записок и чертежей

1. ГОСТ 12.1.005 88 «Общие санитарно гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Общие санитарно гигиенические требования к показателям микроклимата и допустимому содержанию вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

2. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. Допустимые уровни электромагнитного поля на рабочих местах персонала, осуществляющего работы с источниками электромагнитного поля, и требования к проведению контроля.

3. ГОСТ 12.1.019 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. Общие требования по предотвращению опасного и вредного воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитного поля.

Определения

Сверхвысокочастотный разряд: это один из видов электрического разряда в газе, возбуждаемый быстропеременным электрическим полем в диапазоне частот $f = 10^9 \div 10^{11}$ Гц.

Волновод: Направляющий канал, в котором может распространяться электромагнитная волна.

Плазма: частично или полностью ионизированный газ.

Плазмотрон: техническое устройство, в котором создается плазма.

Обозначение и сокращение

ВЧ – высокие частоты

СВЧ – сверхвысокие частоты

ВЧИ – Высокочастотный индукционный плазмотрон

ВЧЕ – Высокочастотный емкостной плазматрон

КСВН – коэффициент стоячий волны

Оглавление

Введение	15
1 Плазмотрон как средство конверсии природного газа	16
1.1 Методы конверсии природного газ	16
2 Плазмотроны	17
2.1 Типы плазмотронов	17
2.1.1 Дуговой плазмотрон	18
2.1.2 Высокочастотные плазмотроны.	20
2.1.2.1 Высокочастотный факельный плазмотрон	20
2.1.2.2 Высокочастотные индукционные плазмотрон.	22
2.1.2.3 Высокочастотные ёмкостные плазмотроны	23
2.1.3 Сверхвысокочастотный плазматрон.	25
3 Волноводный СВЧ плазмотрон для конверсии природного газа в водород и углерод	27
3.1 Выбор параметров СВЧ плазмотрона	28
3.2 Плазмотрон с пассивным инициированием СВЧ-разряда	30
3.3 Плазмотрон с активным инициированием СВЧ-разряда	31
4 Экспериментальные результаты по измерению параметров согласования волноведущей системы плазмотрона	33
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	37
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	37
5.2 Анализ конкурентных технических решений	37
5.3 Технология QuaD	39
5.3 SWOT – анализ	40
5.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	41

	5.5 Планирование научно-исследовательских работ	43
	5.5.1 Структура работ в рамках научного исследования	43
	5.5.2 Определение трудоёмкости выполнения работ	44
	5.5.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	47
	5.5.4 Расчет материальных затрат НТИ	48
	5.5.5 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	49
	5.5.6 Основная заработная плата исполнителей темы	50
	5.5.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	51
	5.5.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	51
	5.5.9 Накладные расходы	52
	5.5.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	53
	5.6 Определение ресурсной ,финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	54
	6 Социальная ответственность	57
	6.1 Производственная безопасность	57
	6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	57
	6.1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	62
	6.2 Экологическая безопасность.	63
	6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	63
	6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	64
	Заключение	65

Список публикаций	66
Список используемых источников	67
Приложение А - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата для Ia категории работы	69

CD – диск.

Введение

Россия является самой богатой страной в мире по запасу природных ресурсов. Важнейшей проблемой на сегодняшний день является их рациональное использования. Одним из направлений решений данной проблемы является глубокая переработка углеводородных газов (природного и попутного нефтяного газов). Перспективным способом переработки природного газа является его конверсия в такие ценные продукты как водород и углерод на основе использования плазмохимических процессов.

В связи с вступившим в действие постановление правительства РФ, от 01.01.2012 устанавливающее требование об утилизации 95% добываемого попутного нефтяного газа, ограничивающее объем его сжигания в факелах на месторождениях и повышающее платежи за сверхлимитное сжигание газа.

В представленной работе для глубокой переработки углеводородного газа на углерод и водород был выбран плазмохимический метод на основе СВЧ – разряда. Данный метод определялся тем, что плазма имеет высокую степень чистоты, простота получения плазмы с малыми удельными энергозатратами и т.д.

Преимущества предлагаемой технологии открывает новые возможности для переработки различного углеводородного сырья в ценные продукты с высоким экономическим эффектом.

Целью данной выпускной квалифицированной работы является исследование потенциальных возможностей СВЧ плазмотронов для конверсии природного газа.

Объектом исследования выпускной работы – глубокая переработка углеводородного газа с использованием плазмы.

Предмет исследования – волноводный СВЧ плазмотрон.

1 Плазмотрон как средство конверсии природного газа

1.1 Методы конверсии природного газа

Каталитическая конверсия природного газа в настоящее время стало основным методом получения водорода и синтез газа для ведущих отраслей народного хозяйства. Наиболее крупными потребителями водорода и его смесей с окисью углерода или азотом являются нефтеперерабатывающая (гидрогенизационные процессы), химическая и нефтехимическая (процессы гидрирования, синтез метанола, бутанола, высших спиртов, аммиака, карбамида, искусственных топлив, пластмасс, синтетических волокон и т.д.), пищевая, энергетическая, металлургическая и другие отрасли промышленности. Промышленными методами получения водорода и его смесей конверсией природного газа являются процессы паровой, паровоздушной и парокислородной с последующей конверсией окиси углерода.[1]

На современном этапе развития науки и техники для производства собственно водорода (технического) считается более перспективным и прогрессивным процесс паровой конверсии под давлением, осуществляемый при высоких температурах (1200-1300 °C) и высоких давлениях 40-100 МПа в реакторах, заполненных никелевым катализатором. В нефтехимии и азотной промышленности наибольшее распространение получил двухступенчатый авто термический каталитический процесс конверсии природного газа смесью водяного пара и кислорода или обогащенного кислородом воздуха при давлении порядка 40-60 МПа, осуществляемый в первой стадии в трубчатых печах и до конверсий в реакторах шахтного типа. Одним из лучших катализаторов считается никелевый с различными примесями

Высокотемпературную конверсию осуществляют при отсутствии катализатора при температурах 1350...1450 °C и давлениях до 30–35 кгс/см² или 3–3,5 МН./м², при этом происходит почти полное окисление метана и

других углеводородов кислородом до CO и H₂. Преимущество этого метода – отсутствие катализатора и несложное аппаратное оформление, недостаток – повышенный расход кислорода.[1]

Наряду с этими способами переработки углеводородных газов перспективным является их конверсия в водород и углерод в плазме СВЧ – разряда, которая создается плазматроном.

2 Плазматроны

Плазматрон - это техническое устройство, в котором создается плотная плазма, с помощью электрических разрядов в газах и дающая плазменный поток, используемый для глубокой переработки природных газов.

Принцип работы плазматрона: поток холодного газа постоянно подается в газоразрядную камеру, где зажигается разряд; газ нагревается, ионизируется в плазму. Мощность плазматрона различна: от десятков ватт до десятков мегаватт, и давления газа - от единиц мм рт. ст. до сотен атмосфер.

Плазматроны получили широкое применение в следующих отраслях:

- 1) Плазмометаллургия
- 2) Плазмохимия
- 3) Плазменное нанесение различных покрытий
- 4) Производство мелкодисперсных порошков
- 5) Плазменная резка различных материалов
- 6) Производство новых материалов
- 7) Поджиг угольных и мазутных горелок и стабилизация пламени
- 8) Плазменная очистка поверхностей от различных загрязнений
- 9) Получение теплоизоляционных материалов на основе базальта (базальтовая вата и др.)

2.1 Типы плазмотронов

Существует несколько типов плазмотронов, среди них:

1. Дуговые плазмотроны.
2. Высокочастотные плазмотроны.
3. Сверхвысокочастотные плазмотроны.

2.1.1 Дуговой плазматрон.

Дуговой плазматрон [2] – используется для анализа растворов. Ведутся работы по применению его к анализу порошков. Электроды дуговых плазмотронов - единственная их расходуемая часть. Электроды могут быть выполнены из меди и медных сплавов, вольфрама, циркония, графита и других материалов в зависимости от конструкции плазмотрона, его назначения и пр.

Дуговой плазматрон постоянного тока состоит из следующих основных узлов: одного (катода) или двух (катода и анода) электродов, разрядной камеры и узла подачи плазмообразующего вещества. Разрядная камера может быть совмещена с электродами в так называемых плазмотронах с полым катодом. Реже используются дуговые плазмотроны, работающие на переменном напряжении. При частоте этого напряжения $\approx 10^5$ Гц.

Существуют дуговые плазмотроны с осевым и коаксиальным расположением электродов, с тороидальными электродами, с двусторонним истечением плазмы, с расходуемыми электродами и т.д. Отверстие разрядной камеры, через которое истекает плазма, называется соплом плазмотрона. Различают две группы дуговых плазмотронов – для создания внешней плазменной дуги и плазменной струи. В плазмотронах 1-й группы дуговой разряд горит между катодом плазмотрона и обрабатываемым телом, служащим анодом. Эти плазмотроны могут иметь как один катод, так и второй электрод вспомогательный анод, маломощный разряд на который с катода

(кратковременный или постоянно горящий) «поджигает» основную дугу. В плазматронах 2-й группы плазма, создаваемая в разряде между катодом и анодом, истекает из разрядной камеры в виде узкой длинной струи.

Основные схемы дуговых плазматронов приведены на рисунке 1.

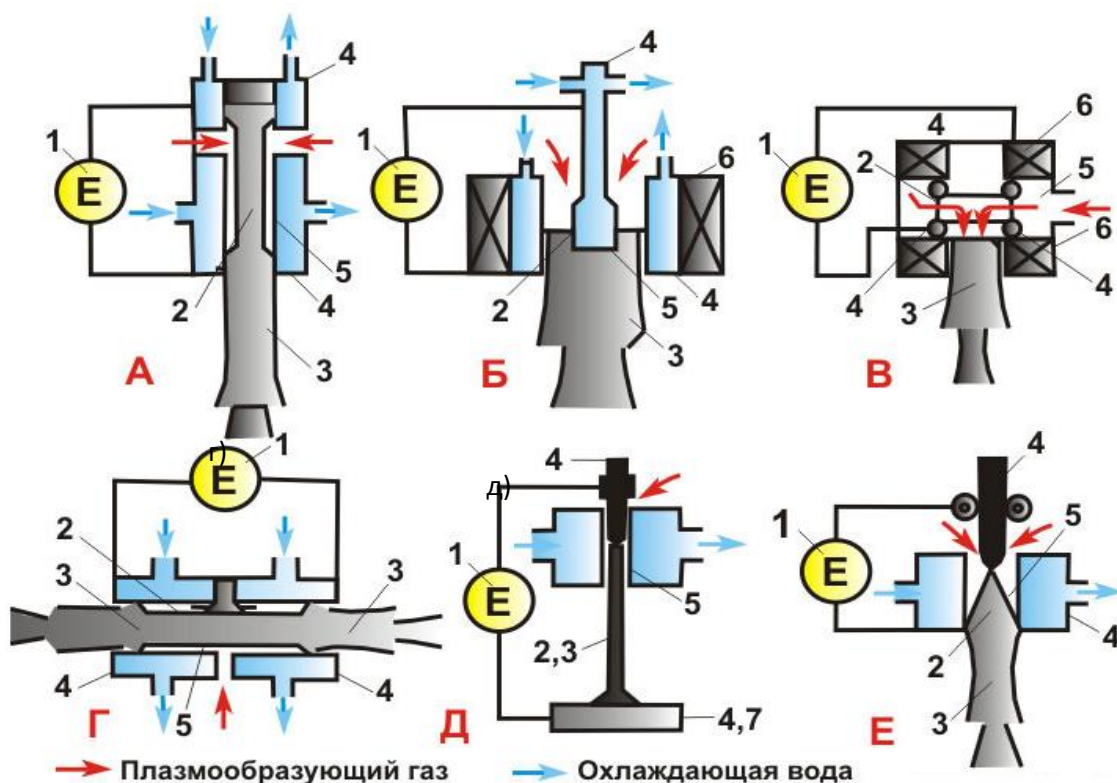


Рисунок 1 - Основные схемы дуговых плазматронов

А - осевой; Б - коаксиальный; В - с тороидальными электродами; Г - двустороннего истечения; Д - с внешней плазменной дугой; Е - с расходуемыми электродами (эрозионный); 1 - источник электропитания; 2 - разряд; 3 - плазменная струя; 4 - электрод; 5 - разрядная камера; 6 - соленоид; 7 - обрабатываемое тело.

Выходной электрод такого плазматрона (анод при прямой полярности) имеет трубчатую форму и изготавливается из меди, имеющей высокую теплопроводность. Если оба электрода имеют трубчатую форму, то они обычно выполнены из меди. Легирование меди серебром приводит к уменьшению

потерь металла за счет окисления; это особенно эффективно при работе в кислороде или кислородсодержащих средах. Легирование меди цирконием или хромом увеличивает ее твердость и устойчивость к окислению. Для некоторых приложений применяют деионизованную воду. Расход охлаждающей воды - 40 - г 1000 л / мин в зависимости от параметров плазмотрона.

К недостаткам дуговых плазмотронов следует отнести: невозможность получения чистой плазмы, свободной от примесей. Постоянное разрушение электродов дугового плазмотрона и загрязнение продуктами их эрозии плазмы не позволяет использовать эти аппараты в тех плазмохимических процессах, к которым предъявляют высокие требования по чистоте получаемых продуктов.

2.1.2 Высокочастотные плазмотроны.

Высокочастотные плазмотроны отличаются конструкцией от дуговых плазматронов. В отличие от дуговых, ВЧ плазмотрон является без электродным и имеет ёмкостную и индуктивную связь с источником мощности[3].

Высокочастотные плазмотроны подразделяются на факельные, ёмкостные и индукционные плазмотроны, что позволяет получить спектрально чистую плазму. Данный тип плазмотрона может работать с любыми газами – инертными, агрессивными, и их смесями в любых соотношениях.

Такие плазматроны работают при высоких частотах (9МГц) и низких давлениях. Они используются в плазмохимических лабораториях, для обработки дисперсных материалов. [4]

2.1.2.1 Высокочастотный факельный плазмотрон

Высокочастотный факельный плазмотрон, содержащий цилиндрический экранирующий кожух с коаксиально расположенным в нем электродом, реактор, пристыкованный к кожуху со стороны рабочего торца электрода,

расположенный в кожухе на нерабочем торце электрода завихритель с патрубком ввода газового потока и узел поджига разряда, отличающийся тем, что, с целью расширения технологических возможностей плазмотрона, электрод выполнен из двух коаксиальных труб длиной не менее одного калибра, соединенных между собой со стороны рабочего торца диффузором с углом $30-60^{\circ}$, а с другой стороны - упомянутым завихрителем, внутренний диаметр которого равен внутреннему диаметру внутренней трубы электрода, причем поджигающий узел расположен между трубами электрода. В высокочастотном факельном плазмотроне при давлении, близком к атмосферному, факельный разряд имеет форму пламени свечи. Наиболее легко факельный разряд возникает на электродах с большой кривизной поверхности (на остриях и т. д.) при частотах электрического поля порядка 10 МГц и выше.

Факельный высокочастотный плазмотрон рисунок 2.

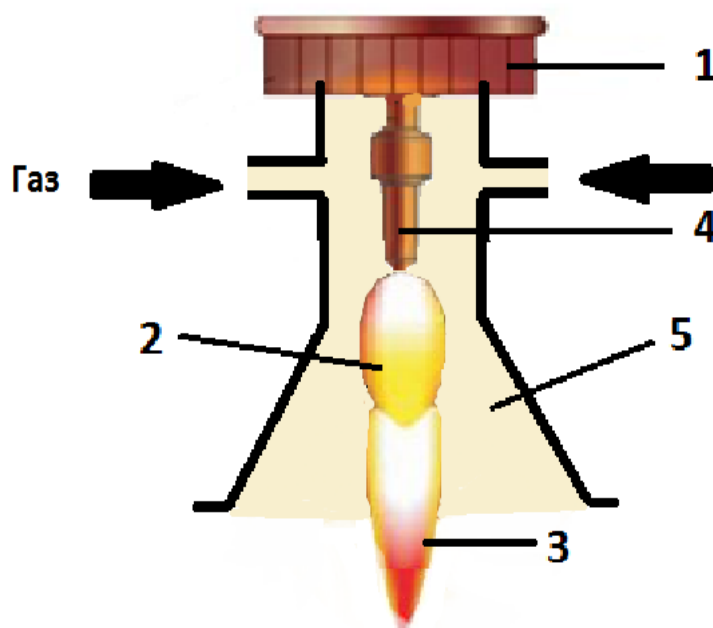


Рисунок 2 - Факельный высокочастотный плазмотрон

1 – источник электропитания; 2 – разряд; 3 – плазменная струя; 4 – электроды; 5 – разрядная камера;

2.1.2.2 Высокочастотные индукционные (ВЧИ) плазмотрон.

Данный тип плазматрона имеет большую популярность за счет простоты получения объемного потока плазмы. Возможность использования любого газа в качестве плазмообразующей среды. [5]

Высокочастотные индукционные (ВЧИ) плазмотроны являются наиболее распространенными из без электродных плазмотронов. Принцип действия их основан на возбуждении разряда специальным индуктором в виде многовитковой катушки, выполненной из медной водоохлаждаемой трубки. Внутри индуктора вставлена разрядная камера выполненный из металлической камеры, размещенной в кварцевой трубе, в которой возбуждается разряд нагреваемы вихревыми токами.

Наиболее критическими при выборе материала разрядной камеры для высокочастотного индукционного плазмотрона являются четыре параметра, точнее их совокупность: коэффициент термического расширения, максимальная рабочая температура, удельное электросопротивление и электрическая прочность. Материал разрядной камеры должен быть прозрачным для ВЧ-электромагнитного поля, обычно это кварц. Кварц является уникальным материалом с точки зрения коэффициента термического расширения, хотя все его остальные параметры заметно уступают нитридной керамике. По этому параметру к кварцу ближе всего керамические материалы из AlN и $Sis N_4$, хотя другие их электрофизические и термические свойства гораздо выше.

Недостатком данного ВЧИ-плазмотрона является незначительный ресурс кварцевого стекла из-за его металлизации, наличие емкостных разрядов, инициирующих электрические пробой между индуктором и металлической камерой. Кроме этого, из-за разного коэффициента температурных расширений тугоплавкий диэлектрик отслаивается с поверхности металлических трубок.

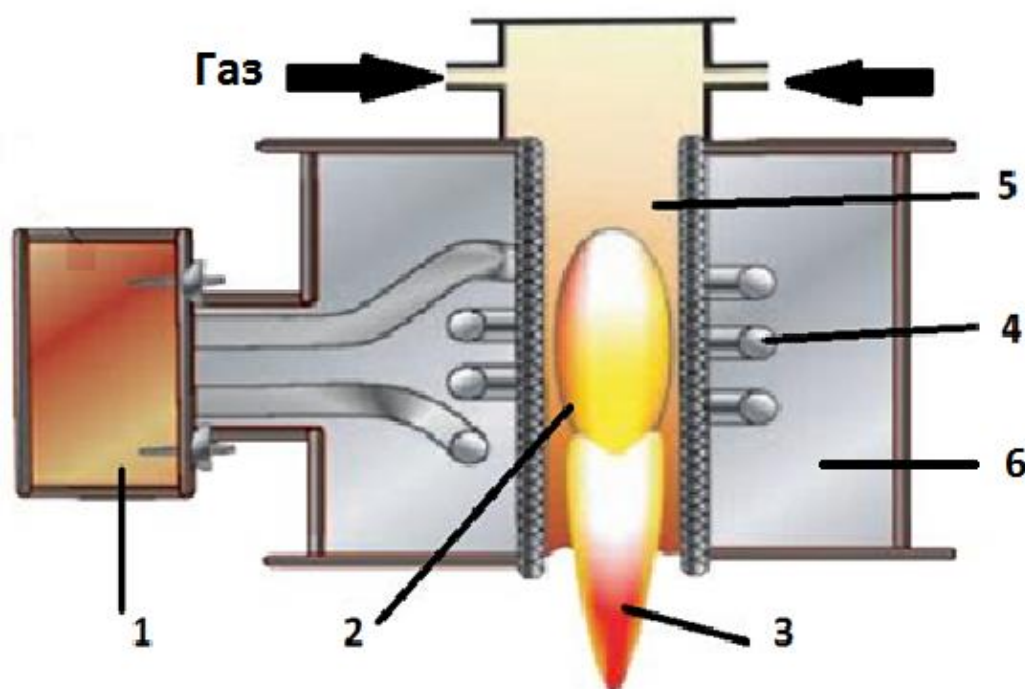


Рисунок 3 - Высокочастотный индукционный плазматрон.

1 – источник электропитания; 2 – разряд; 3 – плазменная струя;
4 – индуктор; 5 – разрядная камера; 6 – волновод;

2.1.2.3 Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) плазматроны

Данный вид плазматрона не получил своего широкого распространения как ВЧИ, однако представляют интерес так, как отсутствует расход электродов. Это связано с тем, что возможно работа с агрессивными газами и создания разряда при высоких напряжениях и небольшом токе. Возможность получение термически неравновесной плазмы при высоких частотах.[6]

Для поддержания емкостного разряда требуется небольшая минимальная мощность (порядка нескольких ватт), при этом в зоне разряда создается высокая напряженность электрического поля. Условия передачи энергии в разряд улучшаются при повышении частоты и увеличении площади электродов. Мощность ВЧЕ-плазматрона можно наращивать за счет

увеличения диаметра разрядной камеры, расстояния между электродами и напряжения на электродах.

В ВЧЕ-плазмотронах для создания плазмы используют емкостной разряд, возникающий в результате воздействия высокочастотного электрического поля. Электрическое поле создается между электродами, подсоединенными к источнику электропитания 1 (Рисунок 4). Электроды 4, находящийся под высоким напряжением, располагается в разрядной камере 5. Плазмообразующий газ подается в разрядную камеру 5. Внутри разрядной камеры образуется разряд 2. Плазменная струя 3 выходит из нижней части разрядной камеры.

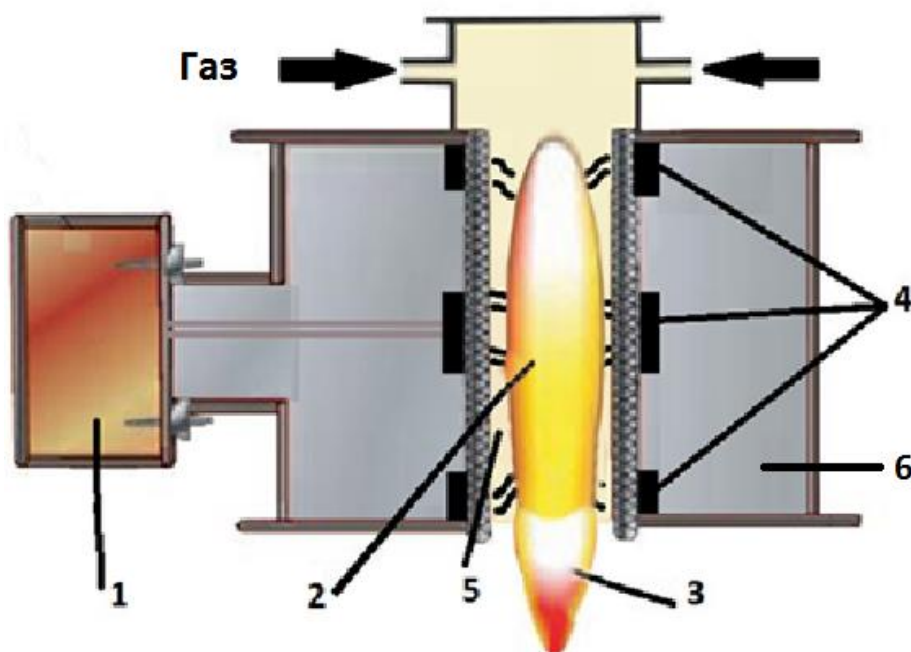


Рисунок 4 - Высокочастотный емкостной плазмотрон

1 – источник электропитания; 2 – разряд; 3 – плазменная струя;
4 – электроды; 5 – разрядная камера; 6 – волновод

Недостатки высокочастотных плазмотронов следующие: при проведении химических реакций требуется высокая температура и особо чистое реакционное пространство. Также при работе ВЧ плазмотронов происходит сгорание большого количества кислорода.

В целом ВЧ-плазмотроны отличаются от электродугowych меньшей мощностью и более низким к.п.д. (30-60%). В связи с этим они пока не нашли применения в крупнотоннажном производстве. Достоинствами их является чистота плазмы, высокая стабильность параметров разряда, возможность использования плазмообразующего газа любой природы, большой ресурс работы.

Очень близкими ВЧ-плазмотронам по принципу получения плазмы и устройству являются сверхвысокочастотные (СВЧ) плазмотроны.

2.1.3 Сверхвысокочастотный плазматрон.

СВЧ плазматрон (рисунок 5) используется для получения высокотемпературной плотной плазмы, которую нельзя получить с помощью вышеперечисленных плазмотронов.

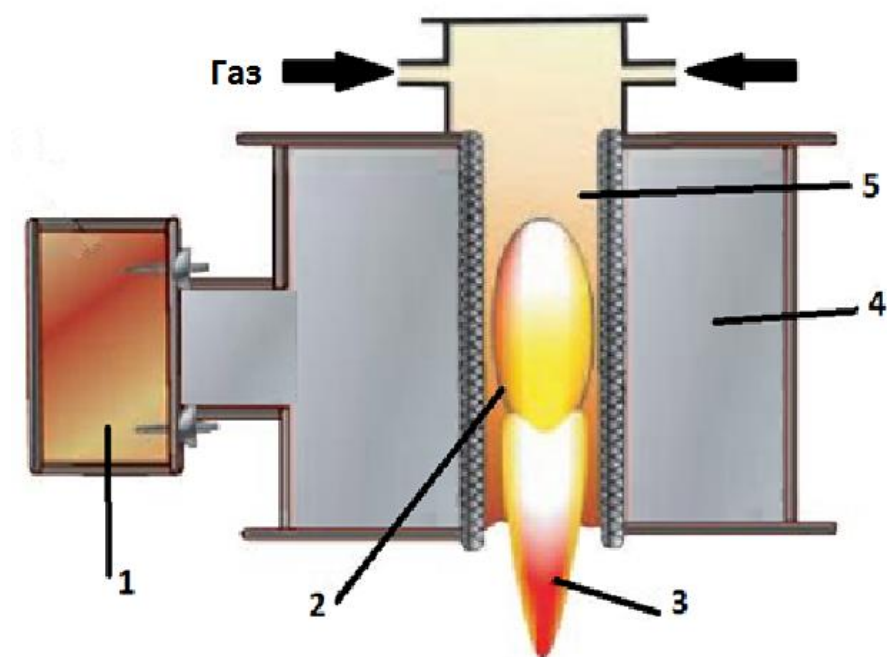


Рисунок 5 - СВЧ плазматрон

1 – источник СВЧ энергии ; 2 – разряд; 3 – плазменная струя;
4 – волновод; 5 – разрядная камера.

Плазма СВЧ-разряда может использоваться в таких процессах, как получение водорода, оксидов и нитридов высокочастотных материалов, глубокая переработка природных газов и т.д. [7].

Особенность СВЧ-плазмы в том, что она имеет высокую чистоту, и позволяет создать ряд энергосберегающих технологий.

Источником плазмы в СВЧ плазмотроне является СВЧ – разряд.

Сверхвысокочастотный разряд – это один из видов электрического разряда в газе, возбуждаемый быстропеременным электрическим полем в диапазоне частот $f = 10^9 \div 10^{11}$ Гц. Такие разряды возбуждаются в волноводах с помощью стоячей или бегущей электромагнитной волны.

Основными достоинствами СВЧ-разрядов являются:

- простота получения плазмы с высоким удельным энерговкладом (>1 Вт/см³),
- простота получения плазмы с малыми удельными энерговкладами ($<<1$ Вт/см³),
- широкая область рабочих давлений (от 10⁻⁵ мм рт. ст до давлений, превышающих атмосферное давление),
- простота управления внутренней структурой разряда путем изменения электродинамических характеристик устройства ввода СВЧ энергии в плазму,
- возможность обработки больших поверхностей сканированием области плазменного образования, имеющего малые размеры,
- возможность создания плазмы в безэлектродных и электродных системах (в последнем случае отсутствует загрязнение объема и образцов продуктами эрозии электродов),
- возможность создания плазмы в малых и больших объемах, включая свободное пространство (атмосфера Земли),
- возможность создания как квазиравновесной, так и существенно неравновесной плазмы,

- возможность совместного воздействия плазмы и электромагнитного поля на объекты в плазме для увеличения эффективности процесса,
- разработанные семейства разнообразных эффективных СВЧ генераторов плазмы позволяют выбрать конструкцию для любых применений.

Преимущество сверхвысоких частот перед высокими в основном связано с более высоким коэффициентом поглощения их в плазме. В этой связи эффективная передача энергии электромагнитного поля в плазму происходит уже при температуре около 4000 К. Кроме того, использование СВЧ-плазмотронов позволяет получать сильно неравновесную плазму при давлениях, близких к атмосферному. Конструктивное исполнение СВЧ-плазмотронов определяется способом подведения энергии электромагнитного поля к области разряда. Так, в волноводном СВЧ-плазмотроне энергия от источника питания передается к разрядной камере посредством волноводной системы, которая также выполняет роль индуктора. В качестве питающих их генераторов применяются магнетроны.

3 Волноводный СВЧ плазмотрон для конверсии природного газа в водород и углерод

Анализ рассмотренных типов плазмотронов показал, что наибольшими потенциальными возможностями для конверсии природного газа обладают СВЧ плазмотроны. Плазмохимическая конверсия метана с использованием плазмы СВЧ –разряда характеризуется минимальными (0,9-1эВ/молек) энергозатратами при степени конверсии до 90%[20]. Энергозатраты на разложение метана, например в скользящем дуговом разряде составляет 14,3эВ/молек.[19] Нами предлагаются для исследования два варианта СВЧ плазмотронов волноводного типа с пассивным и активным инициированием СВЧ – разряда.

3.1 Выбор параметров волноводного СВЧ плазмотрона

Для данного типа СВЧ плазмотрона были проведены расчеты его основных параметров, выбран конструкционный материал, проведены холодные измерения параметров согласования волноведущей системы.

Выбор рабочей частоты плазмотрона.

В качестве рабочей частоты выбираем частоту, $f = 2450$ МГц .

Данной частоте соответствует рабочая длина волны λ , рассчитанная по формуле:

$$\lambda = c/f = 3 \cdot 10^{10} / 2,45 \cdot 10^9 = 12,24 \text{ см} \quad (1)$$

Выбор типа волновода

В соответствии с рабочей частотой $f = 2450$ МГц и длиной волны 12,24 см, в качестве рабочего типа волновода выбираем прямоугольный волновод с поперечным сечением $90 \times 45 \text{ мм}^2$. [8]

Выбор материала волновода.

В качестве конструкционных материалов были рассмотрены 3 материала: медь, алюминий и нержавеющая сталь. Расчет затухания СВЧ энергии в волноводе выполненном из нержавеющей стали .

Расчет проводим по формуле, приведенной в работе [8]

$$H_{10} = \frac{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_{СТ} \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \delta_{СТ} \cdot \mu}}}{b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} * \left(1 + 2 \frac{b}{a} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2\right) \quad (2)$$

где ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума;

λ – рабочая длина волны, см;

$\lambda_{кр}=2a$ – критическая длина волны, см.

$\mu_{ст}$ – магнитная проницаемость стенки волновода,

$\sigma_{ст}$ – удельная проводимость стенки волновода, 1/ Ом * м;

ϵ и μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды заполняющей волновод.

Отсюда получаем:

$$(\alpha)_{H_{10}} = \frac{\sqrt{\frac{15.386 * 10^6 * 5 * 10^{-3} * 8.84 * 10^3 * 0.154}{2 * 7.69 * 10^6 * 12.56 * 10^{-7}}}}{45 * \sqrt{1 - \left(\frac{12.24}{2 * 90}\right)^2}} * \left[1 + 2 \frac{45}{90} \left(\frac{12.24}{2 * 90}\right)^2\right] = 0.118 \left[\frac{\partial B}{M}\right]$$

Таким образом, затухание СВЧ энергии в волноводе из нержавеющей стали, работающем на основном типе волны H_{10} составило 0.118 дБ/м.

Рассчитанное по формуле (2) затухание СВЧ энергии в медном и алюминиевом волноводах составило соответственно 0,018 дБ/м. и 0.034 дБ/м

При выборе материала волновода важным параметром является температура плавления, для алюминия она составляет 660 0С, для меди 1085°С для нержавеющей стали 1800°С. Температура плазмы составляет 4000 К , следовательно волновод из алюминия не безопасно использовать, так как в результате работы плазматрона он может выйти из строя из-за большей температуры.

Для изготовления СВЧ плазматрона в качестве конструкционного материала была выбрана нержавеющая сталь марки 20Х23Н18 жаропрочная высоколегированная, так как по стоимости, она дешевле, чем медь.

3.2 Плазматрон с пассивным иницированием СВЧ-разряда

Схема плазмотрона представлена на рисунке 6.

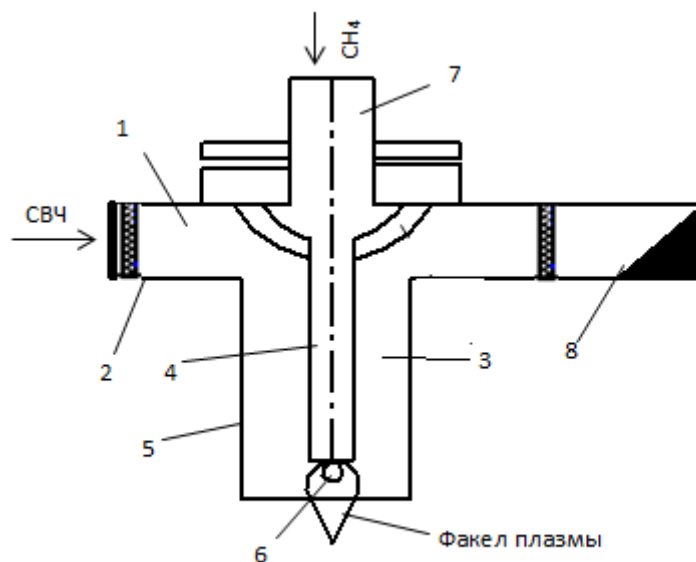


Рисунок 6 - Схема плазмотрона с пассивным иницированием

Данный плазматрон представляет собой волноводно-коаксиальный переход 1, состоящий из прямоугольного волновода 2 и коаксиальной линии 3 с полым внутренним проводником 4 и внешним проводником 5, образующим разрядную камеру. Данный волноводно-коаксиальный переход является переходом «пуговичного» типа.

Выбор «пуговичного» типа обусловлен тем, что данная конструкция зонда обеспечивает максимальную широкополосность (около 20 %) и электропрочность [3]. Волновод 2 снабжен запредельным волноводом круглого сечения 7, который одновременно служит трубопроводом для подачи плазмообразующего газа и предотвращает выход СВЧ-излучения наружу. В качестве пассивного инициатора основного СВЧ – разряда применяется укладка из вольфрамовых спиралек 6, размещённая на торце внутреннего проводника 4 коаксиальной линии. На выходном конце волновода 1 установлена согласованная нагрузка 8 которая выполнена из композитного

материала на основе порошков графита, карбонильного железа или карбида кремния и служит для поглощения прошедшей СВЧ мощности.

За счет выбора длины электрода 4 в области его торца при подаче СВЧ энергии создается повышенная напряженность электрического поля. Это приводит к возникновению между частицами инициатора электрических микро разрядов создающих начальную концентрацию электронов, достаточную для инициирования СВЧ разряда.

Подаваемый в разрядную камеру природный газ конвертируется в водород и углерод.

3.3 Плазмотрон с активным инициированием СВЧ-разряд

Схема плазмотрона представлена на рисунке 7.

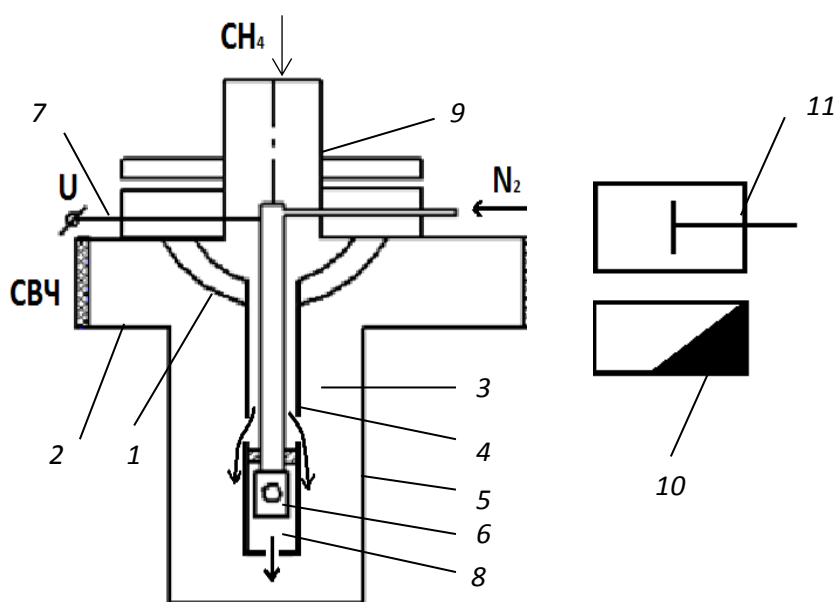


Рисунок 7 - Схема плазмотрона с активным инициированием СВЧ – разряда

Плазмотрон с активным инициированием СВЧ – разряда представляет собой волноводно - коаксиальный переход «пуговичного» типа 1, который

состоит из прямоугольного волновода 2 и коаксиальной линии 3 с внутренним проводником 4, внешним проводником 5, образующим разрядную камеру. Во внутреннем проводнике 4 коаксиальной линии размещена трубка 6 с подключенным к ней проводником 7. На конце внутреннего проводника 4 выполнено сопло 8. Плазмотрон снабжен волноводом круглого сечения 9, который служит для подачи плазмообразующего газа и защитой от СВЧ – излучения. На выходе волновода 2 размещается согласованная нагрузка 10 или короткозамыкающий поршень 11. Волновод 2 сечением $90 \times 45 \text{ мм}^2$ выполнен из нержавеющей стали. Внутренний проводник 4 коаксиальной линии 3 диаметром 16 мм и внешний проводник 5 внутренним диаметром 40 мм также выполнены из нержавеющей стали.

В качестве системы активного инициирования СВЧ – разряда, в данном плазмотроне применен газовый электрический разрядник, образованный внутренним проводником 4 коаксиальной линии и трубкой 6.

На начальном этапе в зону разрядного промежутка по трубке 6 подается азот и от источника высокого напряжения поджигается электрический разряд, создавая начальную концентрацию плазмы, достаточную для инициирования СВЧ-разряда. Затем через внутренний проводник 4 коаксиальной линии 3 подается метан в зону разряда и включается СВЧ-генератор. В зоне сопла 8 на конце проводника 4 резко увеличивается напряженность электрического поля и зажигается СВЧ-разряд в атмосфере природного газа (метана). Процесс идет таким образом, что вспомогательный разряд горит преимущественно в атмосфере азота, а основной СВЧ-разряд в атмосфере природного газа (метана). Применение вспомогательного разряда обеспечивает стабильное горение основного СВЧ-разряда.

Внешний вид волноводного СВЧ плазмотрона с короткозамыкающим поршнем представлен на рисунке 10.



Рисунок 8 – Внешний вид волноводного СВЧ плазмотрона с короткозамыкающим поршнем

4 Экспериментальные результаты по измерению параметров согласования волноведущей системы плазмотрона

Измерения параметров согласования (КСВН) производились с помощью прибора Р 2 – 56 («Панорамный измеритель КСВН»)

Стенд для измерения КСВН приведена на рисунке 9.

Он включает в себя СВЧ генератор переменной частоты, индикатор и волноводный тракт состоящий из двух направленных ответвителей.



Рисунок 9 – Схема измерения КСВН

С помощью стенда были произведены измерения КСВН волноведущей системы плазматрона в диапазоне частот от 2200 до 4400 МГц. при согласованной нагрузке и коротком замыкании поршнем. Частотная зависимость КСВН для случая согласованной нагрузки представлена на рисунке 10. На рабочей частоте 2450 МГц, $КСВН = 1.26$.

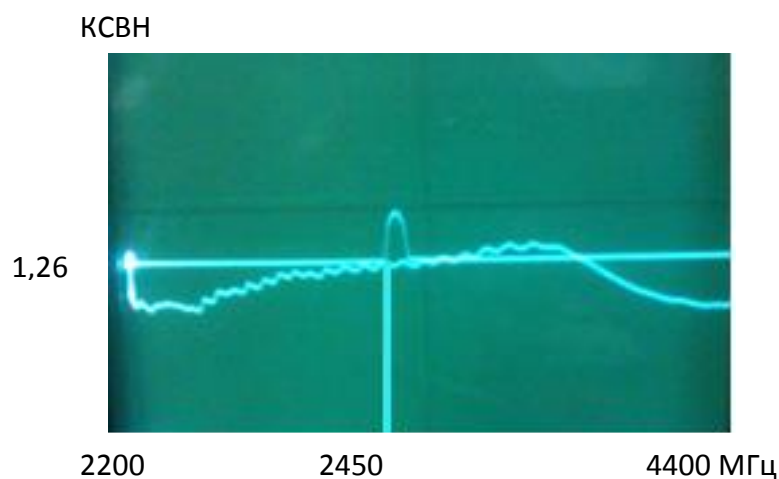


Рисунок 10 - Частотная зависимость КСВН волноведущей системы плазмотрона

Для данного КСВН рассчитываем коэффициент отражения и уровень отраженной мощности :

$$|\Gamma| = \frac{p-1}{p+1} = \frac{1.26-1}{1.26+1} = 0.1 \quad (3)$$

Где $|\Gamma|$ - коэффициент отражения

p - Коэффициент стоячей волны (КСВН)

Найдем значение уровня отраженной мощности:

$$P_{\text{отраж}} = \Gamma^2 * P_{\text{пад}} * 100\% = 0.1^2 * 1 * 100\% = 1\% \quad (4)$$

Так же были произведены измерения КСВН волноведущей системы плазматрона при его нагрузке на короткозамыкающий поршень.

Для случая нагрузки плазматрона на короткозамыкающий поршень на частоте 2450МГц, КСВН = 2.7

Для данного значения КСВН рассчитываем коэффициент отражения и уровень отраженной мощности :

$$|\Gamma| = \frac{p-1}{p+1} = \frac{2.7-1}{2.7+1} = 0.45 \quad (5)$$

Найдем значение уровня отраженной мощности:

$$P_{\text{отраж}} = \Gamma^2 * P_{\text{пад}} * 100\% = 0.45^2 * 1 * 100\% = 21.1\% \quad (6)$$

В результате проведенного эксперимента по измерению степени согласования плазматрона, нагруженного на согласованную нагрузку и на короткозамыкатель к качеству рабочего выбран первый вариант (согласованная нагрузка) характеризующийся минимальным уровнем отраженной мощности. Полученное значение уровня отраженной мощности в 1% от падающей подтверждает хорошее согласование волноведущей системы плазматрона.

Данные «холодные» измерения проводились в отсутствии плазмы СВЧ – разряда. Плазма представляет собой нагрузку хорошо поглощающую энергию СВЧ, поэтому в рабочем режиме (при наличии плазмы СВЧ разряда) уровень отраженной мощности будет существенно ниже.

Рассмотренный плазматрон в качестве основного элемента входит в состав экспериментальной установки для конверсии природного газа (метана) в водород и углерод. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 11

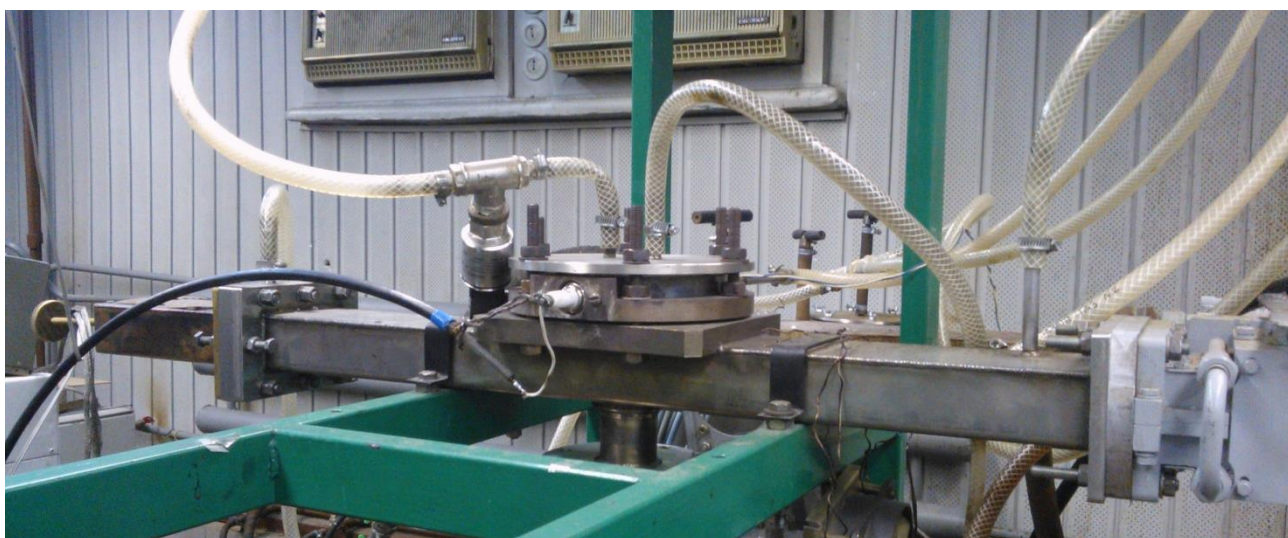


Рисунок 11 - Внешний вид экспериментальной установки

С помощью данного плазматрона была осуществлена конверсия природного газа в углеродный наноматериал и водород с эффективностью до 70% . В состав углеродного наноматериала входят многослойные, однослойные луковичные нанотрубки и аморфный углерод с удельной поверхностью 200-400 м²/гр. В экспериментах мощность СВЧ генератора изменялась в пределах 0.8-2 кВт. Расход газа в пределах 0.05-1 м³/час. Эксперименты проводились при атмосферном давлении. В качестве СВЧ генератора применен магнетрон типа М-168 выходной мощностью до 5 кВт. Рабочая частота магнетрона 2450 МГц ± 50 Гц.