

УДК 533.9

**СВЧ ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ КОНВЕРСИИ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

В.В. Буянтуев, В.П. Шиян

Томский политехнический университет

E-mail: vlad.buyantuev@gmail.com

Шиян Владимир Петрович,
канд. физ.-мат. наук, доцент
кафедры физических методов
и приборов Института нераз-

рушающего контроля ТПУ.
E-mail: schijan@tpu.ruОбласть научных интересов:
СВЧ - техника и технология.

Буянтуев Владислав Вячеславович, студент Института
неразрушающего контроля
ТПУ.

E-mail:

vlad.buyantuev@gmail.com

Область научных интересов:
СВЧ - техника.

Разработан СВЧ плазмотрон волноводного типа на основе волноводно-коаксиального перехода. В качестве плазмообразующей среды использован азот. Разработан и экспериментально проведен инициатор СВЧ разряда на основе разупорядоченной укладки из вольфрамовых спиралек, размещенной на торце внутреннего проводника коаксиальной линии. При атмосферном давлении и мощности СВЧ генератора 1,5 кВт получен устойчивый плазменный факел. Разработанный плазмотрон ориентирован на применение в установке для конверсии природного газа.

Ключевые слова:

Природный газ, СВЧ плазмотрон, СВЧ-разряд, плазма, волноводно-коаксиальный переход.

Введение

Важнейшей проблемой эффективного использования природных ресурсов является их глубокая переработка.

На данный момент традиционными методами переработки природного газа являются каталитический и высокотемпературный способ конверсии (переработки) [1]. Каталитическую конверсию проводят с водяным паром в трубчатых печах с внешним обогревом (паровая конверсия), а также с парокислородной смесью в аппаратах шахтного типа при небольшом ($1,5\text{--}2\text{ кгс/см}^2$ или $0,15\text{--}0,2\text{ Мн/м}^2$) и повышенном ($20\text{--}30\text{ кгс/см}^2$ или $2\text{--}3\text{ Мн/м}^2$) давлении с применением катализаторов. Наилучшим катализатором считается никелевый с различными добавками.

Высокотемпературную конверсию осуществляют при отсутствии катализатора при температурах $1350\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$ и давлениях до $30\text{--}35\text{ кгс/см}^2$ или $3\text{--}3,5\text{ Мн/м}^2$, при этом происходит почти полное окисление метана и других углеводородов кислородом до CO и H_2 . Преимущество этого метода – отсутствие катализатора и несложное аппаратное оформление, недостаток – повышенный расход кислорода.

Одним из направлений конверсии природного газа является использование плазмы СВЧ разряда. Плазма – частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Не всякую систему заряженных частиц можно назвать плазмой. Плазма обычно разделяется на идеальную и неидеальную, низкотемпературную и высокотемпературную, равновесную и неравновесную, при этом довольно часто холодная плазма бывает неравновесной, а горячая равновесной.

Плазму делят на низкотемпературную (температура меньше миллиона К) и высокотемпературную (температура миллион К и выше). Такое деление обусловлено важностью высокотемпературной плазмы в проблеме осуществления управляемого термоядерного синтеза. Разные вещества переходят в состояние плазмы при разной температуре, что объясняется строением внешних электронных оболочек атомов вещества: чем легче атом отдает электрон, тем ниже температура перехода в плазменное состояние. В неравновесной плазме электронная температура существенно превышает температуру ионов. Это происходит из-за различия в массах иона и электрона, которое затрудняет процесс обмена энергией. Такая ситуация встречается в газо-

вых разрядах, когда ионы имеют температуру около сотен, а электроны около десятков тысяч К.

В равновесной плазме обе температуры равны. Поскольку для осуществления процесса ионизации необходимы температуры, сравнимые с потенциалом ионизации, равновесная плазма обычно является горячей (с температурой больше нескольких тысяч К).

Помимо температуры, которая имеет фундаментальную важность для самого существования плазмы, вторым наиболее важным свойством плазмы является плотность. Словосочетание плотность плазмы обычно обозначает плотность электронов, то есть число свободных электронов в единице объема (строго говоря, здесь плотностью называют концентрацию – не массу единицы объема, а число частиц в единице объема). В квазинейтральной плазме плотность ионов связана с ней посредством среднего зарядового числа ионов (Z): $n_e = (Z) \cdot n_i$. Следующей важной величиной является плотность нейтральных атомов n_0 . В горячей плазме n_0 мала, но может, тем не менее, быть важной для физики процессов в плазме. При рассмотрении процессов в плотной, неидеальной плазме характерным параметром плотности становится атом r_s , который определяется как отношение среднего межчастичного расстояния к радиусу Бора.

В отличие от традиционных методов конверсии газа использование плазмы СВЧ разряда позволяет перерабатывать углеводородное сырье при атмосферном давлении. Основой предложенной технологии [2] является совмещенные воздействия на природный газ катализатора и плазмы СВЧ разряда.

Основным элементом установки, реализующей данную технологию, является плазмотрон с аксиальной системой иницирования разряда, выполненной в виде газового разрядника.

В настоящей работе рассматривается СВЧ плазмотрон волноводного типа с вольфрамовым инициатором разряда, обеспечивающий стабильный поджиг основного СВЧ разряда.

Экспериментальный СВЧ плазмотрон

Разработанный авторами СВЧ плазмотрон с активной системой иницирования разряда (рис. 1) 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 % при коэффициенте бегущей волны не менее 0,95) и электропрочность [3]. Волновод – 2 снабжен запредельным волноводом круглого сечения – 6, который одновременно служит трубопроводом для подачи плазмообразующего газа и предотвращает выход СВЧ-излучения наружу. В выходном конце волновода – 1 установлен подвижный короткозамыкающий поршень – 7 для подстройки оптимального режима плазмотрона. Волновод – 1 сечением $90 \times 45 \text{ мм}^2$ выполнен из нержавеющей стали. Внутренний проводник – 4 коаксиальной линии – 3 диаметром 16 мм и внешний проводник – 5 с внутренним диаметром 40 мм также выполнены из нержавеющей стали. Для питания плазмотрона использован магнетрон типа М-143-1 с выходной регулируемой мощностью в непрерывном режиме до 1,5 кВт и рабочей частотой $f = (2450 \pm 50) \text{ МГц}$. Защита магнетрона от отраженной волны обеспечивается применением ферритового вентиля ВФВВ2-13, рассчитанного на использование при уровне непрерывной СВЧ мощности до 3 кВт.

Для иницирования СВЧ разряда на торце внутреннего проводника – 4 коаксиальной линии – 3 размещен инициатор (на рисунке не показан) в виде разупорядоченной укладки вольфрамовых спиралек.

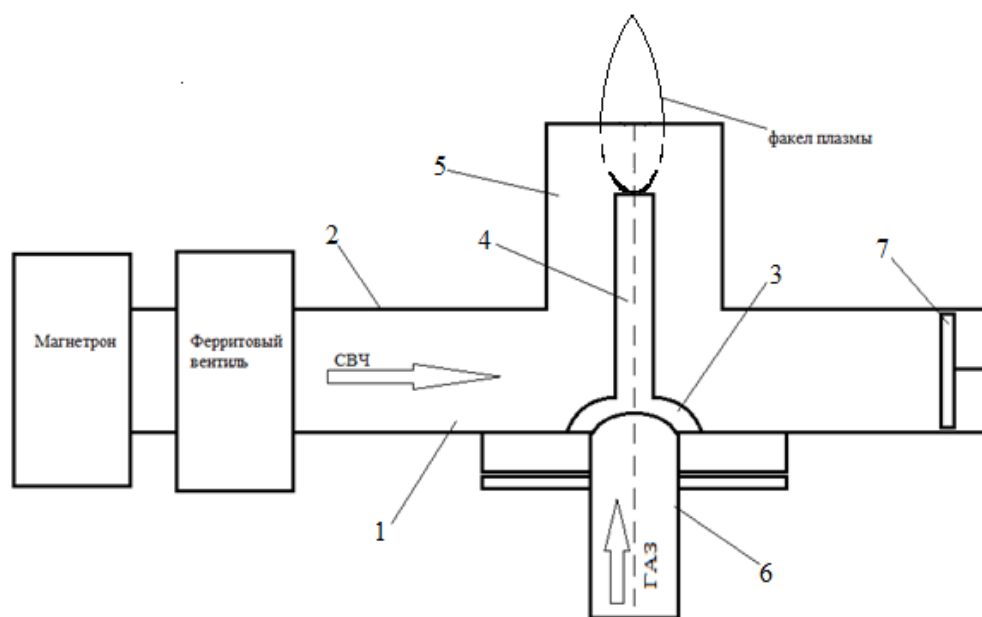


Рис. 1. СВЧ плазмотрон

На начальном этапе исследования СВЧ плазмотрона предварительно были произведены измерения параметров согласования и ослабления его волноведущей системы с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления Р2-56 в диапазоне частот от 2200 до 4400 МГц. Частотные зависимости КСВН и ослабления приведены на рис. 2, а, б соответственно. Как следует из приведенных зависимостей, на рабочей частоте 2450 МГц величина КСВН=1,3, а коэффициент ослабления $\alpha=2$ дБ, что вполне приемлемо для нормальной работы плазмотрона.

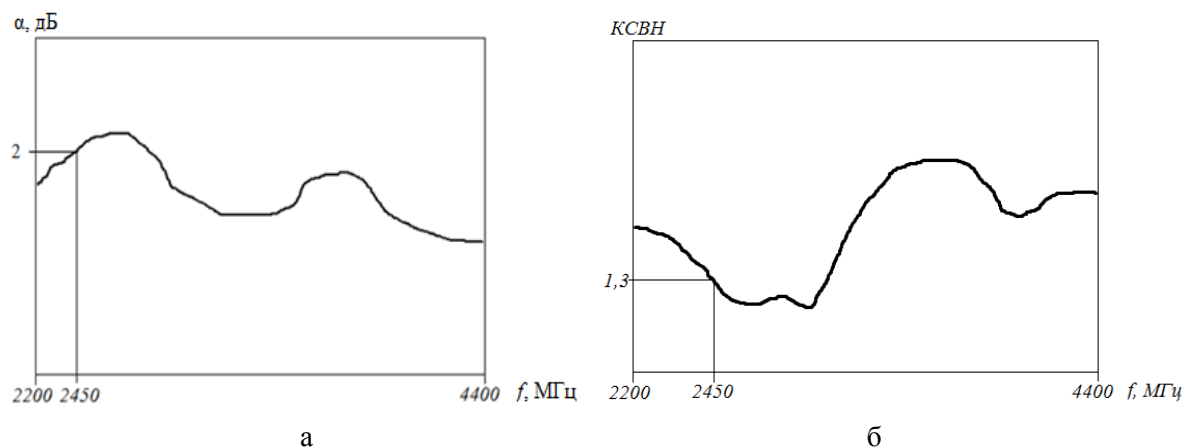


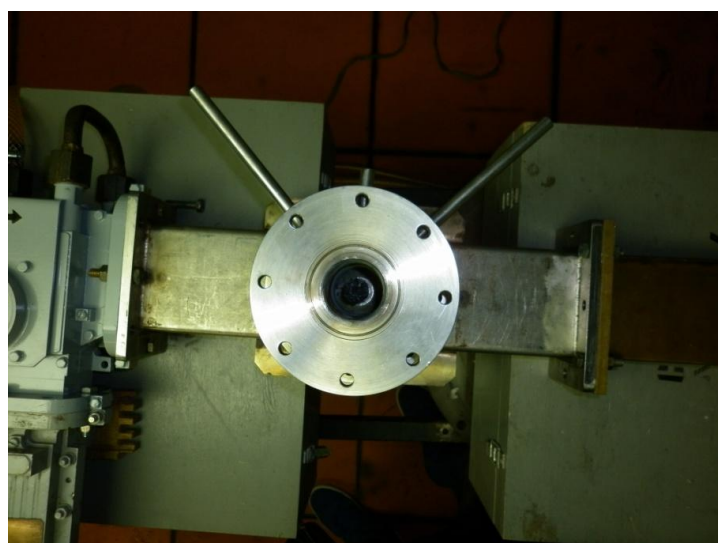
Рис. 2. Частотная зависимость: а) КСВН; б) ослабления

Внешний вид экспериментального СВЧ плазмотрона представлен на рис. 3, а, б.

СВЧ плазмотрон работает следующим образом. Через запредельный трубопровод-волновод – 6, полый внутренний проводник – 5 коаксиальной линии – 3 и газопроницаемый инициатор разряда в разрядную камеру подается плазмообразующий газ (азот) с расходом до 20 литров в минуту, а по волноводу – 1 и коаксиальной линии – 3 подается СВЧ энергия от генератора СВЧ.



а



б

Рис. 3. СВЧ плазмотрон

Коаксиальная линия – 3 с укороченным внутренним проводником – 4 переходит в своем продолжении в круглый волновод, являющийся внешним проводником – 5 коаксиальной линии. За счет создания критического режима электромагнитной волны в круглом волноводе при рабочей длине волны генератора $\lambda_0=12,24$ см в зоне торца внутреннего проводника – 4 коаксиальной линии – 3 увеличивается напряженность электрической составляющей поля и зажигается СВЧ разряд атмосферного давления. При длине волны генератора $\lambda_0=12,24$ см длина волны в волноводе равна:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot a}\right)^2}} = \frac{12,24}{\sqrt{1 - \left(\frac{12,24}{2 \cdot 9}\right)^2}} = 16,77 \text{ см},$$

где λ_0 – длина волны магнетрона, a – широкая стенка прямоугольного волновода.

При этом критическая длина волны в круглом волноводе равна

$$\lambda_{кр} = 3,41 \cdot r = 3,41 \cdot 20 = 6,82 \text{ см},$$

где r – радиус круглого волновода. За счет разницы длин волн в круглом и прямоугольном волноводе и создается критический режим электромагнитной волны.

Потоком газа в разрядной камере формируется факел плазмы. При указанном расходе плазмообразующего газа длина участка факела за срезом разрядной камеры составляет примерно 50 мм. Для инициирования и поддержания стабильного СВЧ разряда применён вольфрамовый инициатор. За счёт микроразрядов между частями инициатора создается начальная концентрация плазмы, облегчающая поджиг основного разряда.

Таким образом, разработанный СВЧ плазмотрон и результаты его экспериментальной проверки дают основание считать возможным его использование в плазмохимической установке [4] переработки природного газа.

Заключение

1. Представлен СВЧ плазмотрон, работающий при атмосферном давлении. Мощность используемого магнетрона 1,5 кВт, а его рабочая частота 2450 МГц.
2. Для инициации и поддержания СВЧ разряда используются вольфрамовые спиральки.
3. Длина факела плазмы достигает 50 мм при расходе плазмообразующего газа до 20 литров в минуту, факел обладает достаточной стабильностью.
4. Исследованы электродинамические характеристики волноводно-коаксиального перехода: Коэффициент стоячей волны по напряжению равен 1,3; а ослабление равно 2 дБ, эти значения приемлемы для данного типа плазмотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшулер В.С. Термодинамика процессов получения газов заданного состава из горючих ископаемых. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 256 с.
2. Жерлицин А.Г., Шиян В.П., Косицин В.С., Медведев Ю.В., Галанов С.И., Сидорова О.И. Плазмохимическая конверсия природного газа в СВЧ реакторе // Известия Вузов. Физика. – 2010. – № 10-2. – С. 270–274
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высш. Шк., 1988. – 432 с.: ил.
4. Устройство для получения углерода и водорода из углеводородного газа: пат. 2390493 Российская Федерация. № 2008144433/15; опубл. 27.05.2010.

Поступила 25.06.2013 г.