

ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА, ЗБАГАЧЕННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 621.181.662

© Мандрикевич В.Н., Франчук С.С., 2010

В.Н. Мандрикевич, С.С. Франчук

СВЧ–ПЛАЗМОТРОН НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

V.N. Mandrikevich, S.S. Franchuk

MICROWAVE PLASMOTRONE ON THE BASIS OF CYLINDRICAL RESONATOR

Рассмотрены вопросы поджога и поддержки стабильного горения безэлектродной СВЧ плазмы, проанализированы конструкции фокусирующих систем СВЧ плазмотронов, рассмотрены вопросы фокусировки плазмы в плазмотроне. Выбраны основные параметры фокусирующей системы на основе цилиндрического резонатора с волной типа E_{011} , которые являются основополагающими для разработки СВЧ плазмотрона, обеспечивающего резку скальных пород большой крепости, а также, сжигание низкосортных углей при растопке пылеугольных котлов.

Ключевые слова: *плазмотрон, фокусирующая система, цилиндрический резонатор, СВЧ генератор, критическая длина волны*

Газовый разряд в сверхвысокочастотном электрическом поле широко используется в различных областях техники. Интерес к газовому разряду на сверхвысоких частотах связан также с возможностью получения новых данных о взаимодействии электронов с атомами и ионами. Поэтому неудивительно, что проблеме зажигания заряда в СВЧ поле посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ.

К способам разрушения пород нагревом относится термоструйный способ, который, как правило, применяется для добычи блоков каменных пород, содержащих кварц, так как они наиболее быстро разрушаются в условиях высокотемпературных напряжений. В настоящее время этот способ применяется на ряде гранитных карьеров. При термоструйном способе блоки камня определенного размера вырезаются непосредственно из массива терморезаками. Сущность этого способа заключается в том, что на поверхность массива направляется высокотемпературная газовая струя (2000–2300°C), извергаемая из сопла терморезака со сверхзвуковой скоростью, которая и прорезает при этом щель по контуру блока. Терморезаки – это реактивные горелки, работающие на кислородно-керосиновой смеси, с водяным охлаждением, служат для глубинных разрушений твердых горных пород. При этом, однако, терморезаки расходуют значительное количество керосина, кислорода и воды.

При растопке пылеугольных котлов и для стабилизации процессов их горения используют отходы переработки нефти – мазут либо природный газ, стоимость которых достаточно высока. Поэтому целесообразно

использовать в качестве растопочного топлива угольную пыль, которая по сравнению с природными нефтепродуктами воспламеняется при более высокой температуре. Высокую ударную температуру (до 12000 К), как для резки горных пород, так и для поджога котлов, способны развивать плазмотроны [1, 2].

Воздействие плазмы на угольную пыль приводит к тому, что частицы угля дробятся на более мелкие части, происходит их интенсивная газификация, горение протекает более устойчиво. Это важно при сжигании низкосортных углей и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной, необходимой для достижения растопочных параметров котла, работе плазмотрона.

Оценочная электрическая мощность плазмотрона не превышает 2,5% от тепловой мощности пылеугольной горелки [3] и составляет 0,3–0,5% от тепловой мощности котла [4]. Однако, применяемые электродуговые плазмотроны обладают существенными недостатками – износом электродов и необходимостью их охлаждения.

Перспективно использование в таких горелках СВЧ-плазмотронов, поскольку они не требуют использования специальных угольных и медных электродов, а также потому, что в них возможно создание критической концентрации электронов $\approx 7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ [5], это способствует раннему воспламенению холодной углевоздушной смеси и, при относительно малых временах, взаимодействию угольных частиц с плазменным факелом, что составляет величину порядка $5 \times 10^{-2} \text{ с}$.

Как известно, в переменном электрическом поле заряженные частицы совершают колебательное движе-

ние, амплитуда которого уменьшается с ростом частоты поля. В диапазоне сверхвысоких частот амплитуда колебаний электронов намного меньше размеров разрядного объема (резонатора, волновода и т.п.). При этом основная масса электронного облака, при осцилляциях в СВЧ поле, не достигает стенок разрядного объема. Тяжелые положительные (а также отрицательные) ионы тем более не могут достичь границ разрядного объема, так как амплитуда смещения ионов в СВЧ поле в тысячи раз меньше соответствующей амплитуды для электронов. Следовательно, в СВЧ разряде носителями заряда являются лишь электроны, а тяжелые ионы в зажигании разряда практически не участвуют. Малость амплитуды смещения электронов в СВЧ поле приводит, во-первых, к тому, что процессы на стенках разрядного объема практически не играют роли, во-вторых, смещение электронов в поле не может вызывать появления пространственного заряда в значительных объемах (в отличие от разрядов в постоянном или высокочастотном электрических полях) [6].

Условием возникновения самостоятельного разряда является равенство числа рождающихся и уходящих из разрядного объема электронов при отсутствии наружного источника ионизации:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} \Big|_0, \quad (1)$$

где n_e – плотность электронов, t – время.

В случае зажигания СВЧ разряда, когда процессы на стенках разрядной камеры заметной роли не играют, единственным процессом образования электронов является ионизация атомов газа электронным ударом. Выход свободных электронов с разрядного объема может быть обусловлен диффузией электронов к стенкам разрядной камеры и прилипанием электронов к молекулам электроотрицательного газа, а при одновременном наличии СВЧ и постоянного электрических полей, электроны уходят из разрядного объема также за счет направленного их движения к стенкам резонатора.

В простейшем случае, когда в пробое газа доминирующую роль играют ионизация молекул газа электронным ударом и диффузия электронов к стенкам резонатора, критерий СВЧ пробоя газа имеет вид:

$$\frac{\tau_i}{D_e} \Big| \frac{1}{\Theta^2}. \quad (2)$$

Здесь ν_i – частота ионизации молекул газа электронным ударом; D_e – коэффициент диффузии электронов; Λ – диффузионная длина, которая зависит от геометрических размеров разрядной камеры. Например, для цилиндрического резонатора с радиусом R и высотой L диффузионная длина определяется следующим выражением:

$$\frac{1}{\Theta^2} \Big| \left(\frac{2.4}{\pi R} \right)^2 + 2 \left(\frac{\pi}{\pi L} \right)^2. \quad (3)$$

Предполагалось, что диффузия электронов является изотропной, т.е. коэффициенты диффузии элект-

тронов вдоль и поперек направления электрического поля равны. Однако в более поздних работах [7] было экспериментально и теоретически показано, что в общем случае коэффициент диффузии электронов вдоль направления электрического поля D_L не равен коэффициенту диффузии электронов поперек поля D_e , т.е. существует анизотропия диффузии электронов.

Рассмотрим СВЧ плазматрон на основе разомкнутой коаксиальной линии. На рис. 1 показан СВЧ плазматрон на основе разомкнутой коаксиальной линии, он питается от СВЧ генератора мощностью 5 кВт с промышленной частотой 2450 МГц.

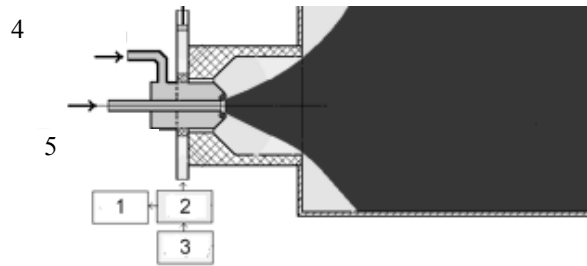


Рис. 1. СВЧ плазматрон на основе разомкнутой коаксиальной линии: 1 – нагрузка; 2 – Y-циркулятор; 3 – СВЧ генератор; 4 – воздух; 5 – воздушно-угольная смесь

Плазма зажигается в воздушном промежутке, образованном электродами конца коаксиальной линии, куда подается воздушно-угольная смесь.

Использование такого плазматрона существенно повышает интенсивности плазменного воспламенения и горения по сравнению с традиционными промышленными горелками. Однако горение СВЧ плазмы между электродами вызывает проблемы, которые характерны для электродуговых плазматронов, а также известным отрицательным эффектом смещения точки горения вдоль волновода к СВЧ генератору.

Эту проблему можно решить зажиганием свободно парящего плазмоида в ограниченном пространстве путем фокусировки СВЧ энергии до уровня напряженности поля, близкого к пробойному (для воздуха 30 кВ/см). Для этого нужна система зеркальных, линзовых либо других антенн, размерами не менее 10 длин волн и высокая пиковая мощность СВЧ генератора – 10 МВт (рис. 2), что трудно реализуется.

Другим способом зажигания и поддержания стабильного горения безэлектродной плазмы является возбуждение электромагнитного поля СВЧ высокой напряженности в объемном резонаторе генератором разумной мощности. Высокая напряженность электрического поля в этом случае создается за счет явления резонанса волн в замкнутом объеме металлического резонатора. В [8] представлено устройство, предназначенное для получения высокотемпературной плазмы в резонаторе с таким типом колебаний, при котором плазменный разряд зажигался и поддерживался в центре резонатора. Вывод плазмы наружу из такого резонатора является технически сложным. В [9] описан плазменный двигатель для

силовых установок космических кораблей. В нем использован объемный цилиндрический резонатор с размерами, позволяющими возбуждать в нем СВЧ колебания типа E_{011} .

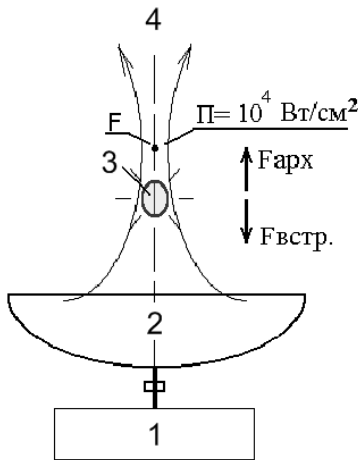


Рис. 2. Свободно парящий СВЧ плазмод, который создается в фокусе зеркальной антенны: 1 – СВЧ генератор; 2 – зеркальная антенна; 3 – плазмод; 4 – СВЧ энергия

Радиус цилиндра резонатора r получаем из условия [10]:

$$\zeta_{кр} \} \zeta_0, \quad (4)$$

где $\zeta_{кр} \mid \frac{2\phi r}{\theta_{01}}$ – критическая длина волны волновода, на котором построен резонатор, параметр $\chi_{01} = 2,405$ – корень функции Бесселя $J_0(kr) = 0$.

Длина резонатора определяется следующим выражением:

$$L \mid \frac{\phi}{k_z} \mid \frac{\zeta_B}{2}, \quad (5)$$

где λ_B – длина волны в резонаторе, которая определяется:

$$\zeta_B \mid \frac{\zeta_0}{\sqrt{14 \left(\frac{\zeta_0}{\zeta_{кр}} \right)^2}}, \quad (6)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны (длина волны, больше которой прекращается распространение волны данного типа). Критическая длина волны, типа E_{01} , определяется:

$$\zeta_{кр01} \mid 2,61\Delta r. \quad (7)$$

Взаимосвязь между геометрическими размерами резонатора, а также его объемом, оценим с помощью следующего выражения:

$$\frac{V_0}{\zeta_0^3} \mid \frac{\phi r^2}{2\zeta_0^2 \Delta \sqrt{14 \left(\frac{\zeta_0}{\zeta_{кр}} \right)^2}}. \quad (8)$$

При увеличении радиуса цилиндра длина резонатора уменьшается. Объем резонатора имеет минимум, равный:

$$\frac{V_0}{\zeta_0^3} \mid 0,6008 \quad (9)$$

при $r/\lambda_0 = 0,468$, этому соответствует $L/\lambda_0 = 0,864$.

Резонатор имеет две пучности стоячей волны у центров торцевых стенок (рис. 3).

Расположив в одной пучности возбуждающий элемент СВЧ-генератора, можно получить такую напряженность поля, при которой возможна инициация электрического пробоя воздуха с образованием свободно парящего плазмоида у противоположного торца.

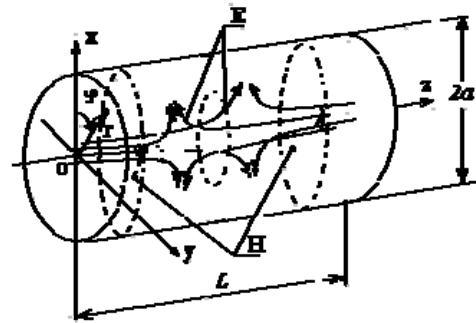


Рис. 3. Структура электрического и магнитного полей типа E_{011} в цилиндрическом резонаторе

Выполнив отверстие в этом месте, плазма под напором плазмообразующего газа (воздуха), расширяющегося под действием тепла, может быть выведена наружу в виде струи. Схема такого СВЧ-плазмотрона приведена на рис.4.

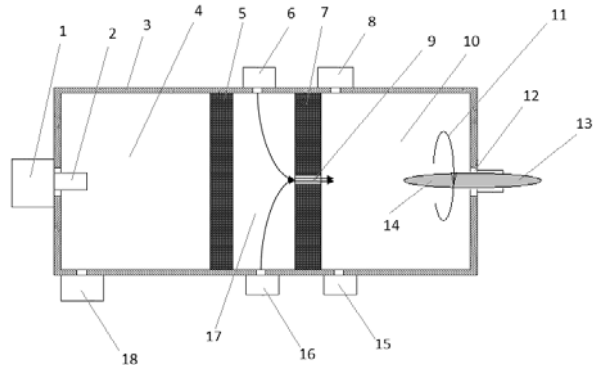


Рис. 4. Схема СВЧ плазмотрона на основе цилиндрического резонатора

В качестве генератора СВЧ 1 выступает магнетрон непрерывного действия металлокерамической конструкции со штыревым выводом энергии 2 (отрезок круглого волновода), предназначенный для рабо-

ты в бытовых печах и промышленных установках для СВЧ нагрева. Стенки резонатора 3 должны быть выполнены из меди, т.к. она имеет низкие потери.

Данная фокусирующая система имеет две диэлектрические перегородки 5 и 7, которые делят резонатор на три камеры. Перегородки 5 и 7 выполнены из газонепроницаемого диэлектрического материала.

Первая камера 4 служит для предотвращения пробою на магнетрон и обеспечения электрической прочности резонатора, и заполнена электроотрицательным газом под избыточным давлением, который закачивается через клапан 18. Вторая камера 17 – термоизолирующая, в нее подается дополнительный газ (через клапаны 6 и 16), обычно воздух, который обеспечивает термоизоляцию 1-й и 3-й камер и эффективное охлаждение перегородок. Также этот газ через отверстие в диэлектрической перегородке 9 поступает в камеру 10, компенсируя разрежение в приосевой области камеры 10, обусловленное вихревым характером движения основного потока, препятствуя затягиванию плазмы из свободно парящего плазменного сгустка в основной поток газа. Как следствие, повышается стабильность СВЧ-разряда, уменьшается нагрев пристеночного газового слоя основного потока и сопла, увеличивается КПД плазматрона. Третья камера 10 служит для образования плазменного сгустка. Для подпитки разряда и вывода плазмы из камеры тангенциально поступает плазмообразующий газ (через клапаны 8 и 15), который закручивается с образованием вихря 11, смещающегося в направлении выводного отверстия. Газовый слой вихревого потока удерживает плазменный сгусток на оси резонатора, препятствуя его контакту со стенками, выдувая его через сопло 12 наружу с образованием плазменной струи 13.

После включения СВЧ генератора (магнетрона) напряженность СВЧ-поля в области выводного отверстия достигает значения близкого к пробойному, инициируя безэлектродный СВЧ-разряд, расширяющийся в свободно парящий плазменный сгусток – плазмоид 14.

Выводы. На основе проанализированных конструкций СВЧ плазматронов был выбран плазматрон, основой которого является цилиндрический резонатор с волной типа E_{011} , работающий на промышленной частоте 2450 МГц. Плазма образуется в свободно парящем плазмоиде, который формируется внутри резонатора и выдувается организованным потоком плазмообразующего газа.

Оценены параметры резонатора при заданной промышленной частоте и критической длине волны типа E_{01} . Объем резонатора имеет минимум, равный $V_0/\zeta_0^3 | 0,6008$ при $r/\lambda_0 = 0,468$, что соответствует длине резонатора $L/\lambda_0 = 0,864$.

Список литературы

1. Жуков М.Ф. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., Перегудов В.С. и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 304 с.
2. Иманкулов Э.Р. Плазменный розжиг и стабилизация горения факела донецкого АШ / Иманкулов Э.Р., Мес-

серле В.Е., Закипов З.Е., Сейтимов Т.М., Устименко А.Б. // Теплоэнергетика. – 1990. – №1. – С. 51–53.

3. Канило П.М. СВЧ-плазменная технология сжигания низкосортных углей / П.М. Канило, В.Е. Костюк, А.В. Тымчик и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – т. 7, №2. – С. 72–77.

4. Аскарлова А.С. Плазмохимическая активация горения твердых топлив / Аскарлова А.С., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. // ХВЭ. – 2006. – т. 40, №2. – С. 141–148.

5. Туманов Ю.Н., Туманов Д.Ю. Плазменные технологии в формировании нового облика промышленности в XXI столетии // Новые промышленные технологии. – 2006. – №1. – С. 14–28.

6. Голант В.Е. Газовый разряд на сверхвысоких частотах // УФН. 1958. – т. 65. №1. – С. 39–86.

7. Wagner E.B., Davis F.J., Hurst G.S. // J. Chem. Phys. 1967. – vol. 47. N9. – P. 3138–3147.

8. Изобр. СССР №333890, МПК H05h 1/18, G21b 1/00. Устройство для получения высокотемпературной плазмы / П.Л. Капица; заявл. 22.08.66 (№1347761/26-25); опубл. в Б.И. № 6 08.03.67.

9. Brandenburg J.E., Kline J., Sullivan D. The Microwave Electro-Thermal (MET) Thruster Using Water Vapor Propellant // IEEE transactions on plasma science. – 2005. – vol. 33, N2, April. – P. 776–781.

10. Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. – М.: Гос. изд. Лит-ры по вопр. связи и радио, 1959. – 380 с.

Розглянуто питання підпалу і підтримки стабільного горіння безелектродної НВЧ плазми, проаналізовано конструкції фокусуєчих систем НВЧ плазматронів, розглянуто питання фокусування плазми в плазматроні, а також вибрано основні параметри фокусуєчої системи на основі циліндричного резонатора із хвилею типу E_{011} , які є основоположними для розробки НВЧ плазматрона, що забезпечує різання скельних порід великої міцності, а також спалювання низькосортного вугілля при розтопленні пилувугільних котлів.

Ключові слова: *плазматрон, фокусуєча система, циліндричний резонатор, НВЧ генератор, критична довжина хвилі*

Questions of arson and support of the stable burning of nonelectrode Microwave plasma have been considered, the construction of the focusing system of Microwave plasmatrons has been analyzed, the questions of focusing of plasma in plasmatron have been considered, and also the basic parameters of the focusing system have been chosen on the basis of cylindrical resonator with the wave of E_{011} type, which are fundamental for development of Microwave plasmatron, providing cutting of rocks of great strength, and also burning of low-grade coal in the process of kindling the pulverized-coal boilers.

Keywords: *plasmatron, focusing system, cylindrical resonator, Microwave generator, critical wavelength*

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.В. Ткачовим 08.05.10