

УДК 533.9
EDN: VAIXRC

PACS: 52.50.Dg

Экспериментальный комплекс для СВЧ-плазменной модификации дисперсных материалов при атмосферном давлении© В. Н. Тихонов¹, С. Н. Антипов^{2,*}, И. А. Иванов¹, А. В. Тихонов¹, М. Х. Гаджиев²,
М. В. Ильичев², А. С. Тюфтяев²¹ «Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Калужская обл., г. Обнинск, 249035 Россия² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: antipov@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2025; после доработки 16.07.2025; принята к публикации 20.10.2025

Шифр научной специальности: 1.3.2.

Представлена экспериментальная установка, созданная на базе СВЧ-плазмотрона волноводного типа, для исследования плазменной модификации дисперсных материалов (сыпучих порошков) в безэлектродном СВЧ-разряде атмосферного давления в газовом потоке. Разработаны устройства (модули установки) для формирования вихревого потока плазмообразующего газа и управляемой инжекции дисперсных частиц в СВЧ-разряд. Проведены предварительные эксперименты по обработке микрочастиц SiO₂, MgO и политетрафторэтилена (ПТФЭ) в СВЧ-разряде в потоке аргона. Анализ частиц проводился методом сканирующей электронной микроскопии. На примере оксидов было показано, что СВЧ-плазменное воздействие может приводить к агрегации частиц и их сфероидизации. Созданный экспериментальный комплекс с использованием разнообразных рабочих газов предоставляет универсальные возможности для задач плазменной модификации дисперсных частиц в широком диапазоне размеров и материалов.

Ключевые слова: СВЧ-плазмотрон; СВЧ-разряд атмосферного давления; плазменная модификация; дисперсные материалы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-106-112

1. Введение

Современные технологические достижения в области функциональных материалов, нанотехнологий и порошковой металлургии ставят перед исследователями задачу разработки высокоэффективных и универсальных методов модификации свойств дисперсных материалов. В связи с этим особый интерес вызывает использование плазменных технологий, обеспечивающих широкий диапазон термодинамических и химических условий для воздействия на микрочастицы.

Плазменная модификация сыпучих порошков позволяет изменять их физико-

химические свойства, включая морфологию, фазовый состав, структуру кристаллической решетки, а также формировать функциональные оболочки на поверхности частиц. Это открывает путь к созданию новых материалов с заданными характеристиками, востребованных в различных отраслях науки и техники – от катализаторов до композитов. Так, например, плазменная модификация порошков открывает новые возможности её применения для получения новых дисперсных композиционных материалов (ДКМ), в которых твердые микрочастицы используются в качестве наполнителя для придания материалу новых свойств. Модифицируя с помощью плазмы

свойства наполнителей можно регулировать химическую стойкость, теплостойкость, тепло- и электропроводность, и другие характеристики ДКМ. Одной из наиболее перспективных направлений в этой области является применение микроволновой (СВЧ) плазмы, отличающейся высокой плотностью энергии, неравновесным характером и возможностью эффективного управления параметрами разряда [1–10]. Помимо физического воздействия (нагрев, испарение и др.), микроволновая плазма обеспечивает активную химическую среду за счёт наличия возбужденных атомов и радикалов, что делает возможным изменение структуры поверхности, а также нанесение различных (оксидных или нитридных) покрытий. Отметим, что при всем многообразии генерируемых в плазме активных частиц их действие на материалы ограничивается очень небольшим поверхностным слоем, толщина которого, как правило, меньше 1 мкм. Таким образом, все эффекты плазменной обработки материалов определяются набором физико-химических процессов, инициируемых активными частицами плазмы в тонком поверхностном слое. Однако, при обработке материалов в виде микропорошков, модифицированный слой может составлять значительную долю всего объема микрочастицы.

На современном этапе развития данной области одной из ключевых задач остается создание экспериментальных комплексов, обеспечивающих надежный и воспроизводимый режим плазменной обработки частиц с различными размерами и химическим составом. Безэлектродные СВЧ-разряды, работающие при атмосферном давлении, обладают рядом преимуществ: простота реализации, стабильность и отсутствие электродов, что устраняет источник эрозии и загрязнений. Они позволяют локализовать область плазмообразования и направленно воздействовать на дисперсные материалы. Кроме того, возможность использования различных газов (инертные газы, азот, воздух и др.) позволяет гибко настраивать состав плазменной среды в зависимости от требуемого технологического результата. Тем не менее, практическая реализация эффективной обработки дисперсных частиц газоразрядной плазмой требует решения ряда технических задач, включая формирование газового потока и контролирующую

инжекцию частиц. Для повышения эффективности модификации важно обеспечить равномерное распределение частиц в объеме разряда и минимизировать агрегацию или оседание. Вихревой газовый поток в сочетании с инъекционными системами может служить решением этой задачи, позволяя одновременно транспортировать и диспергировать частицы в зоне максимальной концентрации активных плазменных компонентов.

В настоящей работе представлена экспериментальная установка, реализующая подход к плазменной модификации дисперсных материалов при атмосферном давлении с использованием СВЧ-плазмотрона волноводного типа и устройств подачи плазмообразующего газа с обрабатываемым порошком. Предложены технические решения, направленные на формирование устойчивого вихревого потока плазмообразующего газа и управление режимами дозирования частиц в область СВЧ-разряда для обеспечения эффективной плазменной обработки. Особое внимание уделено универсальности комплекса, позволяющего обрабатывать широкий спектр порошковых материалов различной природы.

2. СВЧ-плазмотрон и устройства подачи газа и порошков в СВЧ-разряд

Экспериментальный комплекс был создан на базе разработанного ранее магнетронного СВЧ-плазмотрона волноводного типа, установленного на стенде для исследования безэлектродного СВЧ-разряда атмосферного давления [11–14]. СВЧ-плазмотрон конструктивно состоит из двух блоков – собственно СВЧ-генератора и блока высоковольтного питания, неразъемно соединенных высоковольтным кабельным жгутом длиной 2 м, помещенным в защитный гофрированный металлорукав.

Технические характеристики СВЧ-плазмотрона:

- напряжение питания магнетрона – 4,45 кВ,
- анодный ток – 0,4–0,9 А,
- напряжение накала – 3,15 В,
- накальный ток – 11 А,
- регулировка выходной мощности – от 1,5 до 2,5 кВт, 3 уровня,
- охлаждение блока питания – воздушное,

- охлаждение блока СВЧ – водяное, 0,9 л/мин, не менее,
- защита трансформаторов от перегрева – термореле на сердечниках,
- габариты блока питания (ДШВ) – 500×220×400 мм,
- габариты блока СВЧ (ДШВ) – 370×170×270 мм,
- масса блока питания – 27 кг, не более,
- масса блока СВЧ – 6 кг, не более.

В состав экспериментального комплекса входят также:

- СВЧ-циркулятор с рабочей мощностью до 5 кВт,
- согласованные волноводные водяные нагрузки,
- широкий набор элементов волноводного тракта.

Для целей плазменной модификации сыпучих порошков в СВЧ-плазме атмосферного давления в газовом потоке было разработано и изготовлено устройство инъекции дисперсных частиц в область СВЧ-разряда. При необходимости введения порошков в разряд следует учитывать ряд особенностей СВЧ-раз-

ряда при атмосферном давлении. Для поддержания устойчивости разряда и изолирования его от стенок разрядной камеры используются, как правило, различные схемы «подкрутки» газовой струи. Однако в этом случае, при введении в поток газа твердых частиц, происходит их центробежный выброс из центральной области на стенку камеры. Эффективность воздействия на поверхность частиц при этом невелика. На рис. 1 представлена схема газоформователя, которая позволяет построить конструкцию СВЧ-плазмотрона, в котором тангенциальная составляющая скорости газового потока может быть сколь угодно малой – за счет поворота изогнутых на выходе трубок подачи рабочего газа либо использования трубок подачи рабочего газа либо использования трубок без искривления. Устойчивость разряда при этом достигается за счет скачка скорости и завихрения потока за кромкой конуса, как неудобообтекаемого тела. Было изготовлено и опробовано в работе, с возможностью ввода в плазму дисперсных порошков, несколько вариантов газоформователей со стеклянными и керамическими пустотелыми, а также тефлоновыми и комбинированными конусами.

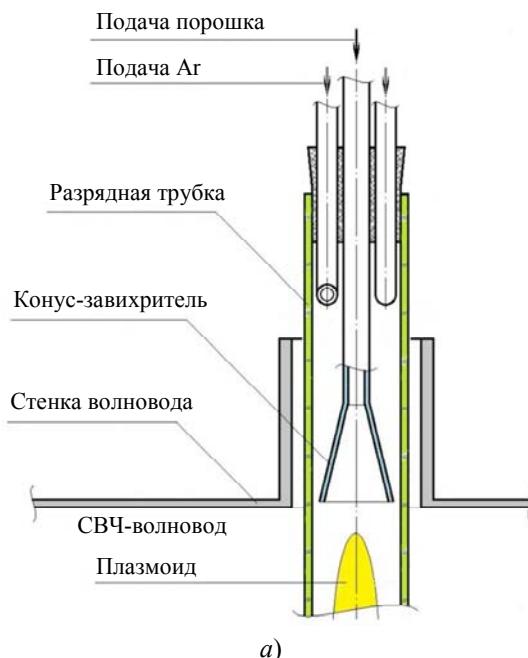


Рис. 1. Схема газоформователя с неудобообтекаемым телом – конусом-завихрителем (а) и его опытный образец в эксперименте с подачей порошка (б)

Следующим этапом разработки устройства для инъекции в плазму микропорошков было создание микродозатора. Был разработан и изготовлен пирамидальный приемный нако-

пительный бункер, оснащенный регулируемым пневматическим вибратором (рис. 2а). Подающий однозаходный винтовой шнек приводится в движение электродвигателем,

скорость вращения которого может варьироваться с помощью преобразователя частоты питающего напряжения.

Предотвращение нежелательного выхода подаваемого газа через винтовой шнек питателя достигалось за счет достаточной толщины слоя порошка в приемном накопительном бункере.



а)



б)

Рис. 2. Микродозатор сыпучих материалов (а) и фотография эксперимента по плазменной обработке частиц в микроволновом разряде в потоке газа (б). На вставке показан винтовой шнек в нижней части бункера (вид сверху)

3. SEM-анализ микрочастиц обработанных порошков

Анализ морфологии и элементного состава обработанных порошков проводился методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). В наших исследованиях использовался сканирующий (растровый) электронный микроскоп производства компании JEOL с ускоряющим напряжением от 0,5 до 20 кВ. Электронно-оптическая система микроскопа позволяет получать изображения с максимальным увеличением $\times 100000$. Пространственное разрешение при энергии электронного пучка 20 кВ в режиме высокого вакуума составляло 4 нм. Микроскоп оснащен высокоэффективным детектором вторичных

электронов и компактным, недорогим энергодисперсионным спектрометром, позволяющим проводить спектральное картирование, анализ элементного состава в отдельных точках. Кроме того, микроскоп укомплектован устройством для нанесения покрытий методом напыления для предварительной подготовки непроводящих образцов к SEM сканированию.

Результаты электронного микроскопирования частиц порошка MgO при увеличении $\times 10000$ представлены на рис. 3. Как видно, частицы до плазменной обработки в основном имеют вид «хлопьев» сильно асимметричной оскольчатой (чешуйчатой или игольчатой) формы толщиной менее 1 мкм и длиной несколько мкм. После обработки в порошке по-

являются более крупные и симметричные частицы округлой формы размером около 10 мкм и больше. Таким образом, можно говорить о том, что в результате СВЧ-плазменной обработки частиц MgO происходит их агломерация, вследствие спекания, и последующая сфероидизация.

Для порошка SiO₂ после плазменной обработки изменился его гранулометрический состав. Контрольный порошок (до обработки) состоял из грубо сферических частиц с крупной фракцией 10–50 мкм, «обсыпанных» на порядок более мелкими частицами. В результате плазменной обработки данная фракция стала преобладающей. Было отмечено, что частицы приобрели более симметричную и гладкую (округлую) форму, а степень «обсыпки» уменьшилась. В этом случае так же можно говорить о сфероидизации частиц в плазме

СВЧ-разряда, по-видимому, вследствие оплавления их поверхности.

Что касается частиц ПТФЭ, проведённый анализ не выявил существенных изменений их морфологии в результате воздействия СВЧ-разряда при применявшихся режимах обработки. Это, вероятно, обусловлено высокой химической инертностью ПТФЭ, его низкой поверхностной энергией и термической стойкостью, препятствующими эффективному взаимодействию с активными компонентами плазмы при заданных параметрах разряда. Данный результат указывает на необходимость оптимизации режимов обработки (например, за счёт повышения СВЧ-мощности, увеличения времени обработки или использования реакционноспособных газов) для достижения заметного плазменного воздействия на ПТФЭ.

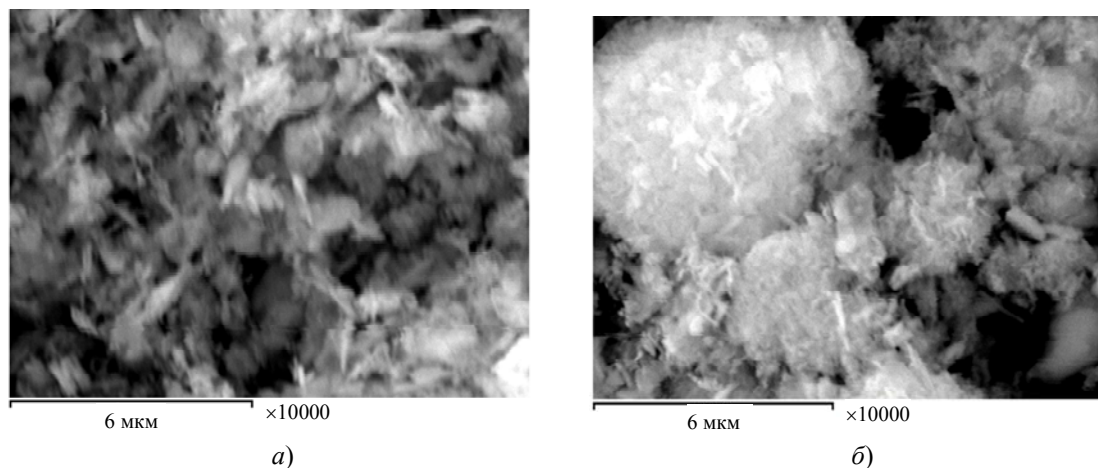


Рис. 3. SEM-фотографии частиц MgO при увеличении $\times 10000$ до (а) и после (б) СВЧ-плазменной обработки

4. Заключение

Описанная в настоящей работе экспериментальная установка для исследования СВЧ-плазменной модификации дисперсных материалов была создана на базе действующего стенда с разработанным ранее СВЧ-плазмотроном волноводного типа, дополненного специально разработанными модулями для подачи рабочего газа и дисперсных частиц в безэлектродный СВЧ-разряд атмосферного давления – вихревым газоформирователем, микродозатором, винтовым шнеком и смесителем порошков с рабочим газом.

Была проведена плазменная обработка микронных частиц трех материалов: оксиды

SiO₂, MgO и частицы ПТФЭ. Из анализа морфологии частиц методом сканирующей электронной микроскопии для оксидов было получено, что в результате плазменной обработки происходит агломерация частиц (в большей степени выраженная для MgO) и их сфероидизация вследствие оплавления. Несмотря на то, что обработка частиц ПТФЭ не дала существенного эффекта, подбор оптимальных для его достижения режимов обработки (СВЧ-мощность, длительность обработки и др.) и плазмообразующих газов является целью дальнейших исследований.

Созданный экспериментальный комплекс обладает высокой универсальностью и представляет собой востребованный инстру-

мент для разработки СВЧ-плазменных методов получения новых дисперсных, в том числе композиционных, материалов со специальными функциональными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reza M., Setiawan K. M., Steky F. V., Nugroho F. G., Agusta M. K., Indarto A., Suendo V. / *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 694. P. 134134.
2. Ma Z., Ouyang B., Zuo X. / *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2024. Vol. 38. № 24. P. 4507–4525.
3. Szabó D. V., Schlabach S. / *Inorganics*. 2014. Vol. 2. № 3. P. 468–507.
4. Szabo D. V., Vollath D., Arnold W. / *Ceramic Transactions (USA)*. 2000. Vol. 111. P. 217–224.
5. Wojnarowicz J., Chudoba T., Lojkowski W. / *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. № 6. P. 1086.
6. Hossain F. et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 202. P. 114650.
7. Van Laar J. H. et al. / *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016. Vol. 116. № 10. P. 941–946.
8. Диденко А. Н., Прокопенко А. В., Смирнов К. Д. / *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2012. № 3. С. 144–150.
9. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. *Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов*. – М.: Наука, 2004.
10. Hunke H., Soin N., Shah T. H. et al. / *Materials*. 2015. Vol. 8. № 5. P. 2258.
11. Tikhonov V. N., Aleshin S. N., Ivanov I. A. et al. / *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 927. № 1. P. 012067.
12. Тихонов В. Н., Иванов И. А., Тихонов А. В. / *Прикладная физика*. 2018. № 4. С. 123.
13. Ivanov I. A., Tikhonov V. N., Tikhonov A. V. / *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1393. № 1. P. 012042.
14. Tikhonov V. N., Gorbatov S. A., Ivanov I. A. et al. / *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2064. № 1. P. 012131.

PACS: 52.80.-s

Experimental setup for microwave plasma modification of dispersed materials at atmospheric pressure

V. N. Tikhonov¹, S. N. Antipov^{2,*}, I. A. Ivanov¹, A. V. Tikhonov¹, M. Kh. Gadzhiev², M. V. Il'ichev² and A. S. Tyuftyaev²

¹ *Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kaluga Region, Obninsk, 249035 Russia*

² *Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

* E-mail: antipov@ihed.ras.ru

Received 25.06.2025; revised 16.07.2025; accepted 20.10.2025

The article presents an experimental setup based on a waveguide-type microwave plasmatron has been developed for investigating plasma-assisted modification of dispersed materials (powders) in an electrodeless microwave discharge at atmospheric pressure in a gas flow. Devices (installation modules) have been developed for the formation of a vortex gas flow and controlled injection of dispersed particles into a microwave discharge. Preliminary experiments have been conducted on the treatment micron-sized SiO₂, MgO, and polytetrafluoroethylene (PTFE) particles in a microwave discharge in an argon flow. Particle analysis has been performed using scanning electron microscopy (SEM). In the case of oxide materials, it has been shown that microwave plasma treatment can lead to particle agglomeration and spheroidization. The experimental complex developed, combined with the use of various working gases, provides a versatile platform for plasma modification of dispersed particles across a wide range of sizes and material compositions.

Keywords: microwave plasmatron; atmospheric pressure microwave discharge; plasma modification; disperse materials.

REFERENCES

1. Reza M., Setiawan K. M., Steky F. V., Nugroho F. G., Agusta M. K., Indarto A. and Suendo V., *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **694**, 134134 (2024).
2. Ma Z., Ouyang B. and Zuo X., *Journal of Adhesion Science and Technology* **38** (24), 4507–4525 (2024).
3. Szabó D. V. and Schlabach S., *Inorganics* **2** (3), 468–507 (2014).
4. Szabo D. V., Vollath D. and Arnold W., *Ceramic Transactions (USA)* **111**, 217–224 (2000).
5. Wojnarowicz J., Chudoba T. and Lojkowski W., *Nanomaterials* **10** (6), 1086 (2020).
6. Hossain F. et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **202**, 114650 (2024).
7. Van Laar J. H. et al., *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **116** (10), 941–946 (2016).
8. Didenko A. N., Prokopenko A. V. and Smirnov K. D., *Izvestiya RAN. Energetika*, № 3, 144–150 (2012) [in Russian].
9. Kutepov A. M., Zakharov A. G. and Maksimov A. I. *Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymer materials*. Moscow, Nauka, 2004 [in Russian].
10. Hunke H., Soïn N., Shah T. H. et al., *Materials* **8** (5), 2258 (2015).
11. Tikhonov V. N., Aleshin S. N., Ivanov I. A. et al., *Journal of Physics: Conference Series* **927** (1), 012067 (2017).
12. Tikhonov V. N., Ivanov I. A. and Tikhonov A. V., *Applied Physics*, № 4, 123 (2018) [in Russian].
13. Ivanov I. A., Tikhonov V. N. and Tikhonov A. V., *Journal of Physics: Conference Series* **1393** (1), 012042 (2019).
14. Tikhonov V. N., Gorbatov S. A., Ivanov I. A. et al., *Journal of Physics: Conference Series* **2064** (1), 012131 (2021).

Об авторах

Тихонов Виктор Николаевич, научный сотрудник, «Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (249035, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 1, корп. 1). E-mail: v.n.tikhonov@yandex.ru SPIN-код: 2888-3451, AuthorID: 27078

Антипов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр. 2). E-mail: antipov@ihed.ras.ru SPIN-код: 6324-4441, AuthorID: 40329

Иванов Игорь Анатольевич, научный сотрудник, «Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (249035, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 1, корп. 1). SPIN-код: 6969-7420, AuthorID: 783821

Тихонов Александр Викторович, младший научный сотрудник, «Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (249035, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 1, корп. 1). E-mail: ti_@list.ru SPIN-код: 4479-1819, AuthorID: 989747

Гаджиев Махач Хайрудинович, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр. 2). E-mail: makhach@mail.ru SPIN-код: 2169-8355, AuthorID: 605045

Ильичев Максим Валерьевич, к.т.н., научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр. 2). E-mail: imvpl@mail.ru AuthorID: 185149

Тюфтяев Александр Семенович, д.т.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская 13 стр. 2). E-mail: astpl@mail.ru SPIN-код: 5341-2934, AuthorID: 40635