

УДК 533.9  
EDN: POPRIB

PACS:52.80.-s



## Исследование состава газа холодной плазменной струи, генерируемой СВЧ-разрядом атмосферного давления

С. Н. Антипов, М. Х. Гаджиев, М. В. Ильичев, А. С. Тюфтяев,  
А. В. Чистолинов, Д. И. Юсупов

*Проведен анализ с использованием метода хроматографии состава газа в холодной плазменной струе, представляющей собой потоковое послесвечение тлеющего СВЧ-разряда атмосферного давления. Плазменная струя формировалась при взаимодействии плазмы разряда с атмосферным воздухом за выходным отверстием 6-ти электродной плазменной горелки, электрическая мощность к которой подводится от волноводного СВЧ (2,45 ГГц)-плазмотрона. Анализ газовых проб струи показал, что при протекании плазмообразующего аргона через СВЧ-разряд за областью разряда происходит образование водорода и метана, а концентрация оксида углерода увеличивается в 5–6 раз. Исследование активных форм кислорода в холодной плазменной струе проводилось с помощью жидкостной хроматографии водного раствора изопропилового спирта после обработки его плазменной струей. Получено, что в результате плазменной обработки происходило частичное окисление изопропилового спирта до ацетона, что позволяет рассматривать его в качестве индикатора активных форм кислорода (гидроксильных радикалов, атомарного кислорода и озона) в холодной плазменной струе.*

*Ключевые слова:* СВЧ-разряд, СВЧ-плазмотрон, холодная плазменная струя, хроматография.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-5-12

### 1. Введение

Неравновесная плазма представляет собой плазму, в которой энергия электрического поля, передаваемая сначала электронам слабо

ионизируемой плазмы, затем передается нейтральным частицам, которые стимулируют определенные атомно-молекулярные превращения [1]. Образуется целый спектр радикалов и возбужденных частиц с высокой реакционной способностью. Основной особенностью генерации неравновесной плазмы является то, что электрическая энергия используется в основном для производства энергетичных электронов без существенного нагрева газовой среды. Воздействие неравновесной плазмы на поверхность имеет комплексный характер и включает следующие основные факторы: УФ-излучение, химически активные частицы, энергия заряженных частиц. Механизмы, по которым в неравновесных условиях осуществляются химические реакции, отличаются большим разнообразием. Выбирая соответствующие параметры обработки, можно проводить

Антипов Сергей Николаевич, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: antipov@ihed.ras.ru

Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Ильичев Максим Валерьевич, н.с., к.т.н.

Тюфтяев Александр Семенович, гл.н.с., д.т.н.

Чистолинов Андрей Владимирович, н.с.

Юсупов Дамир Ильдусович, с.н.с., к.т.н.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 3.07.2023

После доработки 12.12.2023

Принята к публикации 9.01.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9.

© Антипов С. Н., Гаджиев М. Х., Ильичев М. В.,  
Тюфтяев А. С., Чистолинов А. В., Юсупов Д. И., 2024

такие технологические процессы, как плазменная очистка, плазменная активация поверхности, плазменное осаждение и плазменное травление.

В течение долгого времени для плазменной обработки поверхностей использовались тлеющие разряды пониженного давления (например, емкостные ВЧ-разряды) [2–8]. Однако, данный тип плазмы связан с низкой плотностью атомов в газовой фазе и, следовательно, с низким уровнем столкновений между электронами и тяжелыми частицами. В последнее время неравновесные плазменные процессы все больше исследуются в СВЧ-разрядах и плазменных струях на их основе [9–13]. Особый интерес представляют холодные плазменные струи на основе СВЧ-разряда атмосферного давления, обусловленный тем, что в них происходит образование возбужденных частиц и радикалов с высокой реакционной способностью, а сами струи не оказывают деструктивного воздействия на материал в процессе плазменной обработки [14–20]. Самостоятельные СВЧ-разряды, возбуждаемые в молекулярных газах, приводят к эффективной диссоциации молекул и наработке активных частиц, таких как кислород- и азотсодержащие частицы. Сочетание низких температур газа вкупе с высокой реакционной способностью частиц плазмы делает неравновесную СВЧ-плазму технологически выгодным и эффективным инструментом, например, в прикладных задачах по плазменной модификации поверхности различных материалов.

Разработке и исследованию источников неравновесной СВЧ-плазмы в последние годы уделено повышенное внимание [21–28]. При этом исследования параметров холодных плазменных струй остаются весьма немногочисленными. Между тем, решающее значение для целенаправленного воздействия имеет знание условий технологического процесса. Параметры плазмы должны соответствовать обрабатываемому материалу для достижения желаемого результата. В связи с этим большую важность приобретает как разработка новых, так и развитие существующих способов диагностики холодных плазменных струй.

В настоящей работе исследована возможность применения хроматографического метода для анализа состава газа холодной

плазменной струи, генерируемой на основе СВЧ-разряда атмосферного давления в воздушной среде. Особое внимание уделено исследованию наработки активных форм кислорода (АФК). Для этого с помощью метода жидкостного хроматографии рассмотрена возможность оценки количества АФК в области плазмы при анализе окисления изопропилового спирта до ацетона в водном растворе в результате обработки раствора холодной плазменной струей.

## 2. СВЧ-плазматрон для генерации холодных плазменных струй

Разработанный и изготовленный ранее опытный образец многоцелевого СВЧ-плазматрон на базе типового 1 кВт магнетрона с частотой 2,45 ГГц позволяет генерировать холодные плазменные струи атмосферного давления с помощью внешней плазменной горелки с широким выходным отверстием площадью  $\approx 5 \text{ см}^2$  [24, 25].

СВЧ-плазматрон включает в себя следующие компоненты:

- высоковольтный трехфазный блок питания;
- блок СВЧ, включающий магнетрон с водяным охлаждением;
- волноводный тракт (разборный трехсекционный, с двумя комплектами фланцев с прокладками);
- коаксиальный кабель 50 Ом длиной 2 м с двумя N-разъемами;
- плазменная горелка с шестью электродами в общей камере.

Волноводный тракт прямоугольного сечения WR-340 нагружен на оконечную резонансную водяную нагрузку. Ответвитель индукционного типа представляет собой петлю связи, размещенную на узкой стенке волновода. Конструкция ответвителя позволяет изменять величину связи путем поворота плоскости петли, которая нагружена на коаксиальный разъем N-типа. При максимальной величине связи (плоскость петли перпендикулярна широким стенкам волновода) ответвителем с учетом потерь отводится порядка 15 % мощности СВЧ-генератора. Плазменная горелка

представляет собой полезную нагрузку и присоединяется к ответвителю с помощью кабельной сборки.

Конструктивно горелка представляет собой цилиндрическую разрядную камеру, содержащую 6 стержневых электродов, размещенных параллельно друг другу с образованием равностороннего шестиугольника в поперечном сечении (рис. 1). СВЧ-разряд возбуждается при протекании плазмообразующего газа через горелку, при этом разрядные каналы формируются между стержневыми электродами и внутренней стенкой разрядной камеры (6 каналов) вблизи выходного отверстия. Диаметр выходного отверстия камеры равен 2,5 см. Холодная плазменная струя представ-

ляет собой потоковое послесвечение СВЧ-разряда в атмосферном воздухе за выходным отверстием горелки. Для формирования плазменной струи использовалось цилиндрическое кварцевое сопло длиной 2 см с внутренним диаметром 3 см. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон ВЧ высокой чистоты (99,998 %), расход которого варьировался в диапазоне от единиц до несколько десятков литров в минуту. Сопло присоединялось к горелке негерметично. Основное предназначение сопла – снизить газодинамическое возмущающее влияние наружной атмосферы на поток аргона в области разрядных каналов. Протекание аргона происходит во всем сечении выходного отверстия камеры.



а)



б)

*Рис. 1. Плазменная горелка (вид со стороны выходного отверстия) и отбор газовых проб из потока аргона: в горелке без разряда (а) и из потока аргона непосредственно над разрядным каналом (б)*

### 3. Методики и результаты хроматографического анализа

В экспериментах использовался хроматографический газовый комплекс «Хромос ГХ-1000». Ввод проб осуществлялся вручную с помощью пробоотборника.

Анализ проб происходил с помощью:

- пламенно-ионизационного детектора ПИД, предназначенного для определения большинства органических соединений, являющегося почти идеальным детектором для анализа микропримесей углеводородов и большинства других органических соединений;

- детектора по теплопроводности ДТП, предназначенного для анализа соединений, теплопроводность которых отличается от теплопроводности газа-носителя.

В качестве газа-носителя использовался ВЧ-аргон. Для горения пламени ПИД-детектора использовался водород и воздух.

Для процедуры отбора газовых проб плазменная горелка устанавливалась вертикально выходным отверстием вверх, т. е. поток газа был направлен снизу вверх. Использовался пробоотборник «ELCHROM», который представляет собой комбинацию специального цельностеклянного шприца объемом 20 мл с поршнем индивидуальной притирки и прецизионного трехходового крана. Отбор газовой пробы из участка газового потока происходил через полую медицинскую иглу. Перед каждым отбором пробы шприц промывался ВЧ-аргоном через газовый кран в хроматографе. Затем на наполненный аргоном закрытый шприц устанавливалась игла и он крепился на держателе в положении для отбора пробы из заданной точки в горелке (см. рис. 1). После того как в горелку подавался плазмообразующий газ и зажигался разряд, открывался вентиль шприца и газ из шприца выдавливался. Далее происходил отбор газовой пробы.

Были проведены отбор и исследования следующих проб (таблица 1):

1. аргон из баллона, используемый в качестве плазмообразующего газа;

2. в потоке аргона в горелке из области до протекания через разряд (под разрядным каналом) при горении разряда и в отсутствии разряда (см. рис. 1а);

3. в потоке аргона в горелке из области непосредственно над разрядным каналом при горении разряда/без разряда (см. рис. 1б);

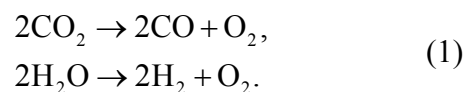
4. в плазменной струе из центра выходного отверстия сопла горелки (2 см над разрядными каналами) с разрядом/без разряда;

5. атмосферный воздух.

В результате анализа полученных хроматограмм было определено содержание в процентном соотношении в исследуемых газовых пробах следующих продуктов: азота, кислорода, водорода, метана, оксида и диоксида углерода (табл. 1). Измерения для каждой точки проводились дважды и затем усреднялись. Разброс данных укладывался в погрешность хроматографического метода ( $\pm 5\%$ ).

Проведенный анализ газовых проб, показал, что в результате прохождения плазмообразующего аргона через СВЧ-разряд за областью разряда происходит образование

водорода и метана, а концентрация оксида углерода увеличивается в 5–6 раз. Данный эффект, по-видимому, связан с попаданием атмосферного воздуха, содержащего водяной пар, в область разряда при подсосывании воздуха в горелку вследствие пониженного давления в газовой струе. Образование оксида углерода, водорода и кислорода происходят в процессах диссоциации (разложения)  $\text{CO}_2$  и процессах прямого разложения водяного пара в неравновесной плазме через колебательно-возбуждённые состояния реагентов по схемам:



Кроме того, поскольку стержневые электроды изготовлены из нержавеющей стали, в состав которой может входить до 0,2% углерода, мы полагаем, что в результате эрозии поверхности стержневых электродов под действием плазмы, в зону разряда может попадать углерод. В этом случае окисление углерода прежде всего должно приводить к образованию оксида углерода. По-видимому, именно этим объясняется относительно большое количество  $\text{CO}$  в потоке аргона в области непосредственно над разрядным каналом.

Таблица 1

*Исследованные газовые пробы (содержание продукта при горящем разряде указано в ячейках во второй строчке)*

Номер	$\text{CO}_2$ , %	$\text{CO}$ , %	$\text{CH}_4$ , %	$\text{N}_2$ , %	$\text{O}_2$ , %	$\text{H}_2$ , %
1	$8,5 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-5}$	0	0,077	0,021	0
2	$9,9 \times 10^{-4}$ $1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$ $3 \times 10^{-4}$	0 0	0,17 0,26	0,04 0,065	0 0
3	$9,9 \times 10^{-4}$ $6,8 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$ $1,6 \times 10^{-3}$	0 $1,3 \times 10^{-5}$	0,24 0,28	0,058 0,069	0 $2 \times 10^{-3}$
4	$1,2 \times 10^{-3}$ $1,1 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-4}$ $6 \times 10^{-4}$	0 $1,7 \times 10^{-5}$	0,42 0,29	0,11 0,071	0 $1,3 \times 10^{-3}$
5	0,057	0,042	$1,3 \times 10^{-4}$	78,7	20,7	$9 \times 10^{-4}$

Следует отметить, что специфика элементарных атомно-молекулярных процессов в условиях неравновесной плазмы заключается в том, что величины поступательной и вращательной энергий значительно уступают колебательной энергии молекул. Для большинства неэлектроотрицательных молекул ( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.) скорость колебательного

возбуждения электронным ударом достаточно высока, и основная доля разрядного энерговысвобождения при температуре электронов  $T_e \sim 1$  эВ локализуется именно на колебательных степенях свободы основных электронных состояний. Отмеченный механизм колебательного возбуждения молекул электронным ударом характеризуется важным преимуществом –

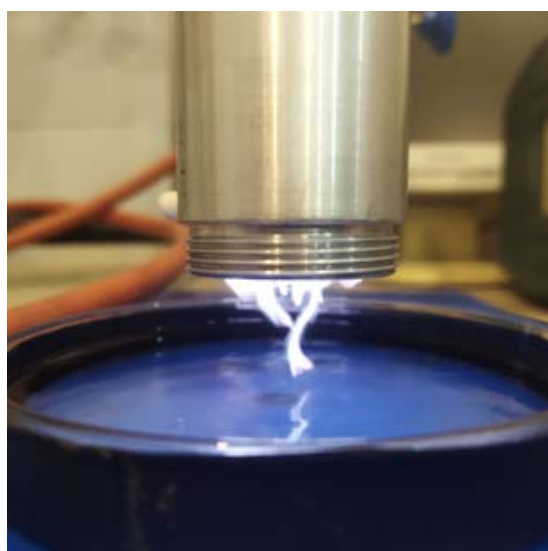
именно этот механизм может стимулировать химические превращения с наибольшей по сравнению с другими каналами реакций энергоэффективностью. Другими словами, неравновесный плазмохимический процесс, стимулируемый колебательным возбуждением молекул электронным ударом, может обеспечивать максимальную энергетическую эффективность в неравновесном СВЧ-разряде атмосферного давления.

Для исследования наработки активных форм кислорода (АФК) в холодной плазменной струе проводилась обработка плазменной струей поверхности водного раствора изопропилового спирта (5 %), находящегося в чашке Петри (рис. 2). Горелка использовалась без кварцевого сопла. Объем обрабатываемой пробы составлял 15 мл, что позволяло получить достаточно тонкий слой раствора на дне чашки.

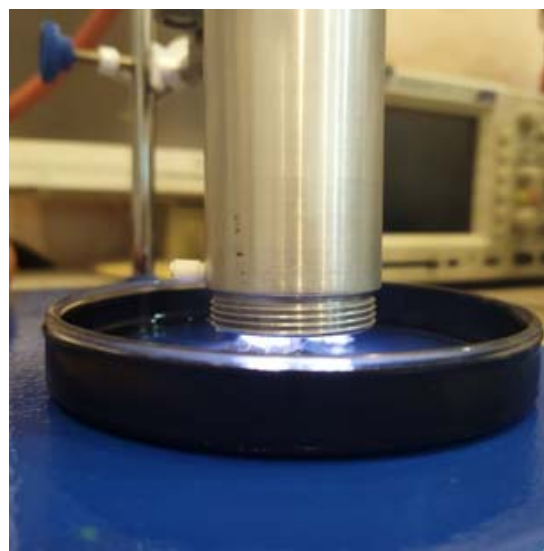
Отметим, что, при взаимодействии плазмы разряда с подсасываемым в горелку атмосферным воздухом, содержащем пары воды, как активный компонент в области разряда образуется озон. Несмотря на то, что время жизни гидроксильных радикалов крайне мало (около  $10^{-9}$  с), в результате взаимодействия с озоном они не гибнут, превра-

щаясь из одного вида в другой [29], а уносятся газовым потоком. Таким образом, озонгидроксильная смесь может транспортироваться за пределы плазменной горелки.

С целью более эффективной обработки поверхности раствора расход плазмообразующего аргона был увеличен до 40 л/мин. Вызванное этим значительное увеличение скорости потока газа привело к частичной трансформации тлеющего разряда в кистевую форму коронного разряда, в которой стримеры от коронирующих стержневых электродов распространяются по потоку газа (рис. 2). Это увеличивало концентрацию плазмы (и, соответственно, активных частиц) в потоковом послесвечении за выходным отверстием горелки. Длина стримерных каналов за пределами горелки составляла около 1–2 см. Эксперименты проводились при двух положениях горелки – на расстояниях 0,5 и 2,5 см от среза разрядной камеры до поверхности раствора. В обоих случаях стримерные каналы касались поверхности раствора. Исследовался один временной режим обработки – последовательность из трех включений плазмотрона по 2 минуты с перерывами примерно в 15 минут. Во время перерывов чашка Петри накрывалась крышкой.



а)



б)

**Рис. 2.** Обработка водного раствора изопропилового спирта в чашке Петри холодной плазменной струей при расположении среза разрядной камеры горелки на расстояниях 2,5 см (а) и 0,5 см (б) до поверхности раствора

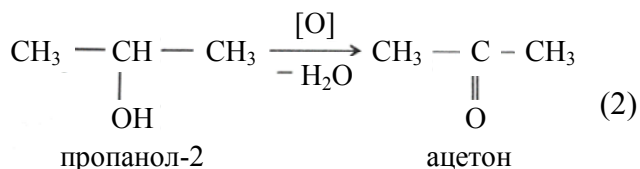
Были проведены две серии плазменной обработки, суммарной длительностью по 6 минут каждая. При этом, в процессе плазменной обработки температура раствора практически не менялась ( $<1$  °C), что исключает фактор температуры среды в протекании химических реакций. После плазменной обработки образцы раствора анализировались на хроматографе с использованием датчика ПИД. На полученных хроматограммах помимо изопропилового спирта в растворе наблюдалось образование ацетона (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание изопропанола и ацетона  
в образцах раствора после  
плазменной обработки**

Расстояние от среза горелки до раствора, см	Изопропанол, %	Ацетон, %
0,5	1,72	$2,4 \times 10^{-3}$
2,5	1,99	$7,4 \times 10^{-4}$

Проведенные исследования показывают, что в процессе плазменной обработки в растворе происходит частичное окисление изопропилового спирта в ацетон активными формами кислорода (гидроксильными радикалами, атомарным кислородом и озоном), образующимися в плазменной струе при взаимодействии аргоновой плазмы разряда с атмосферным воздухом, образующимися в плазменной струе при взаимодействии аргоновой плазмы разряда с атмосферным воздухом:



Следовательно, обнаруживаемый в растворе новый продукт – ацетон, а точнее, его количество, можно рассматривать в качестве индикатора наработки АФК, а, следовательно, и реакционной способности холодных плазменных струй. Данный факт позволяет предложить новый экспериментальный метод, предназначенный для исследования наработки АФК в холодных плазменных струях, осно-

ванный на хроматографическом анализе количества ацетона, образующегося в водном растворе изопропилового спирта в процессе его плазменной обработки.

### 3. Заключение

В работе описана методика хроматографического анализа состава газа в холодной плазменной струе, генерируемой на основе тлеющего СВЧ-разряда атмосферного давления в потоке аргона при взаимодействии с атмосферным воздухом. Проведенный анализ газовых проб, показал, что в неравновесной плазме СВЧ-разряда происходит образование новых газообразных продуктов – водорода и метана, а концентрация СО увеличивается в 5–6 раз. Данный эффект связан с усиленным подмешиванием атмосферного воздуха, содержащего водяной пар, к потоку аргона в области разряда. Кроме того, определённый вклад может вносить углерод, переносимый под действием разряда в газовую фазу с поверхности электрода.

Предложен метод диагностики холодных плазменных струй, предназначенный для исследования наработки активных форм кислорода (АФК) в плазме и основанный на хроматографическом анализе количества ацетона, образующегося в водном растворе изопропилового спирта в процессе плазменной обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. / УФН. 1979. Т. 128. № 6. С. 233.
2. Vepřek S., Eckmann C., Elmer J. T. / Plasma chemistry and plasma processing. 1988. Vol. 8. P. 445.
3. Favia P., d'Agostino R. / Surface and coatings Technology. 1998. Vol. 98. № 1–3. P. 1102.
4. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. / Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.
5. Dhayal M., Alexander M. R., Bradley J. W. / Applied surface science. 2006. Vol. 252. № 22. P. 7957.
6. Deslandes Y., Pleizier G., Poiré E. et al. / Plasmas and polymers. 1998. Vol. 3. P. 61.
7. Puač N., Petrović Z. L., Radetić M. et al. / Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2005. Vol. 494. P. 291.

8. Tang S., Lu N., Wang J. K. et al. / The Journal of Physical Chemistry C. 2007. Vol. 111. № 4. P. 1820.
9. Lebedev Y. A. / Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24. № 5. P. 053001.
10. Hunke H., Soin N., Shah T. H. et al. / Materials. 2015. Vol. 8. № 5. P. 2258.
11. Berthelot A., Bogaerts A. / The Journal of Physical Chemistry C. 2017. Vol. 121. № 15. P. 8236.
12. Лебедев Ю. А., Краишевская Г. В., Тамарунов А. В. и др. / Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 1. С. 79.
13. Samadi Bahnamiri O., Manaigo F., Chatterjee A. et al. / Journal of Applied Physics. 2023. Vol. 133. № 11. P. 113303.
14. Al-Shamma'a A. I., Wylie S. R., Lucas J. et al. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30. № 5. P. 1863.
15. Hnilica J., Potočnáková L., Stupavská M. et al. / Applied surface science. 2014. Vol. 288. P. 251.
16. Srivastava N., Chuji W. / Plasma Science and Technology. 2019. Vol. 21. № 11. P. 115401.
17. Zhao J., Nie L. / Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26. № 7. P. 073503.
18. Narimisa M., Krčma F., Onyshchenko Y. et al. / Polymers. 2020. Vol. 12. № 2. P. 354.
19. Tiwari S., Caiola A., Bai X et al. / Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2020. Vol. 40. P. 1.
20. Batur J., Duan Z., Jiang M. et al. / Chem. Mater. 2023. Vol. 35. № 10. P. 3867.
21. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K. D. / Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24. № 6. P. 064001.
22. Tikhonov V. N., Aleshin S. N., Ivanov I. A. et al. / Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 927. № 1. P. 012067.
23. Тихонов В. Н., Иванов И. А., Тихонов А. В. / Прикладная физика. 2018. № 4. С. 123.
24. Ivanov I. A., Tikhonov V. N., Tikhonov A. V. / Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1393. № 1. P. 012042.
25. Chepelev V. M., Chistolinov A. V., Khromov M. A. et al. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1556. № 1. P. 012091.
26. Narimisa M., Krčma F., Onyshchenko Y. et al. / Polymers. 2020. Vol. 12. № 2. P. 354.
27. Tikhonov V. N., Gorbatov S. A., Ivanov I. A. et al. / Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2064. № 1. P. 012131.
28. Zhong N., Fu G., Li J. et al. / Plasma Processes and Polymers. 2022. Vol. 19. № 4. P. 2100159.
29. Арустова Н. А., Пискарев И. М. / Журнал физической химии. 2003. Т. 77. № 5. С. 813.

PACS: 52.80.-s

## Analysis of gas composition of a cold plasma jet generated on the basis of atmospheric pressure microwave discharge

S. N. Antipov, M. Kh. Gadzhiev, M. V. Il'ichev, A. S. Tyuftyaev,  
A. V. Chistolinov and D. I. Yusupov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bd. 2 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia,  
E-mail: antipov@ihed.ras.ru

Received 3.07.2023; revised 12.12.2023; accepted 9.01.2024

*Using chromatography, the analysis of the gas composition in a cold plasma jet, which is a streaming afterglow of a microwave glow discharge at atmospheric pressure, was carried out. The plasma jet was formed by interaction of discharge plasma with atmospheric air behind the outlet of the 6-electrode plasma torch, electrical power to which was supplied from the waveguide microwave (2.45 GHz) plasmatron. An analysis of the gas samples of the jet showed that when plasma-forming argon flows through the microwave discharge, hydrogen and methane are formed behind the discharge region, and the concentration of carbon monoxide increases by 5–6 times. The study of reactive oxygen species in the cold plasma jet was carried out using liquid chromatography of an aqueous solution of isopropyl alcohol after treatment with the plasma jet. It was found that because of plasma treatment, partial oxidation of isopropyl alcohol to acetone occurred. This allows us to consider acetone as an indicator of reactive oxygen species (hydroxyl radicals, atomic oxygen and ozone) in a cold plasma jet.*

*Keywords:* microwave discharge, microwave plasmatron, cold plasma jet, chromatography.

## REFERENCES

1. Biberman L. M., Vorob'ev V. S. and Yakubov I. T., Soviet Physics Uspekhi **22** (6), 411 (1979).
2. Vepřek S., Eckmann C. and Elmer J. T., Plasma chemistry and plasma processing **8**, 445 (1988).
3. Favia P. and d'Agostino R., Surface and coatings Technology **98** (1–3), 1102 (1998).
4. Kutepov A. M., Zakharov A. G. and Maksimov A. I., Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymer materials, Moscow, Nauka, 2004.
5. Dhayal M., Alexander M. R. and Bradley J. W., Applied surface science **252** (22), 7957 (2006).
6. Deslandes Y., Pleizier G., Poiré E. et al., Plasmas and polymers **3**, 61 (1998).
7. Puač N., Petrović Z. L., Radetić M. et al., Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. **494**, 291 (2005).
8. Tang S., Lu N., Wang J. K. et al., The Journal of Physical Chemistry C **111** (4), 1820 (2007).
9. Lebedev Y. A., Plasma Sources Science and Technology **24** (5), 053001 (2015).
10. Hunke H., Soin N., Shah T. H. et al., Materials **8** (5), 2258 (2015).
11. Berthelot A. and Bogaerts A., The Journal of Physical Chemistry C **121** (15), 8236 (2017).
12. Lebedev Y. A., Krashevskaya G. V., Tatarinov A. V. et al., Plasma Physics Reports **43**, 99 (2017).
13. Samadi Bahnamiri O., Manaigo F., Chatterjee A. et al., Journal of Applied Physics **133** (11), 113303 (2023).
14. Al-Shamma'a A. I., Wylie S. R., Lucas J. et al., IEEE Transactions on plasma Science **30** (5), 1863 (2002).
15. Hnilica J., Potočňáková L., Stupavská M. et al., Applied surface science **288**, 251 (2014).
16. Srivastava N. and Chuji W., Plasma Science and Technology **21** (11), 115401 (2019).
17. Zhao J. and Nie L., Physics of Plasmas **26** (7), 073503 (2019).
18. Narimisa M., Krčma F., Onyshchenko Y. et al., Polymers **12** (2), 354 (2020).
19. Tiwari S., Caiola A., Bai X. et al., Plasma Chemistry and Plasma Processing **40**, 1 (2020).
20. Batur J., Duan Z., Jiang M. et al., Chem. Mater. **35** (10), 3867 (2023).
21. Winter J., Brandenburg R. and Weltmann K. D., Plasma Sources Science and Technology **24** (6), 064001 (2015).
22. Tikhonov V. N., Aleshin S. N., Ivanov I. A. et al., Journal of Physics: Conference Series **927** (1), 012067 (2017).
23. Tikhonov V. N., Ivanov I. A., Tikhonov A. V., Applied physics, № 4, 123 (2018) [in Russian].
24. Ivanov I. A., Tikhonov V. N. and Tikhonov A. V., Journal of Physics: Conference Series **1393** (1), 012042 (2019).
25. Chepelev V. M., Chistolov A. V., Khromov M. A. et al., Journal of Physics: Conference Series **1556** (1), 012091 (2020).
26. Narimisa M., Krčma F., Onyshchenko Y. et al., Polymers **12** (2), 354 (2020).
27. Tikhonov V. N., Gorbatov S. A., Ivanov I. A. et al., Journal of Physics: Conference Series **2064** (1), 012131 (2021).
28. Zhong N., Fu G., Li J. et al., Plasma Processes and Polymers **19** (4), 2100159 (2022).
29. Aristova N. A. and Piskarev I. M., Russian Journal of Physical Chemistry A **77** (5), 723 (2003).