

характером движения струи, возникающим при больших значениях амплитуды разрядного тока.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-08-01484-а, 06-02-16741 а).

#### Л и т е р а т у р а

1. Горбунов С. П., Красов В. И., Паперный В. Л., Коробкин Ю. В., Романов И. В.// Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 22. С. 87—94.

2. Горбунов С. П., Красов В. И., Паперный В. Л., Коробкин Ю. В., Романов И. В.// Прикладная физика. 2006. № 6. С. 72—76.

3. Кринберг И. А.// Там же. 2004. № 6. С. 67—71.

4. Anders A., Yushkov G. Y.// J. Appl. Phys. 2002. V. 91. № 8. P. 4824—4832.

5. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Y. et al.// IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. № 10.

6. Кринберг И. А.// Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 6. С. 89—94.

7. Алферов Д. Ф., Коробова Н. И., Сибиряк И. О.// Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 3. С. 399—410.

Статья поступила в редакцию 20 августа 2007 г.

## Peculiarities of expanding into vacuum ambient of a high-current cathode plasma jet

V. I. Krasov, I. A. Krinberg, V. L. Paperny  
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Yu. V. Korobkin, I. V. Romanov  
Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

*Acceleration of ions of cathode plasma jet of the low voltage vacuum spark are studied both experimentally and theoretically. It is shown that enhancement of amplitude of the discharge current  $I_d$  results in the corresponding increases in ion flow  $I_c$  that was emitted from the discharge gap and passed through a drift tube. The relation describing the parameters is as follows,  $I_c \propto (I_d)^3$ . A simple MHD model of a current-carrying plasma jet expanding into the vacuum ambient is presented. The model takes into account the plasma constriction with the self current magnetic field of the jet current. The results of calculations well describe the observed dependence of the ion velocity on the discharge current at range of the current, less than 10 kA. It was found that when the current exceeding of 10 kA, the parameters enhancement was terminated and its scattering in different shots increases abruptly.*

УДК 662.027.662:537.525.1

## Влияние геометрии разрядного промежутка подводного диафрагменного разряда переменного тока на его физические и химические свойства

А. Ю. Никифоров, А. И. Максимов

Институт химии растворов Российской академии наук, г. Иваново, Россия

*Исследован процесс генерации активных частиц в подводном разряде с различной геометрией токопроводящего канала. Найдено, что эффективность образования  $H_2O_2$  зависит как от прикладываемой к разряду мощности, так и от длины токопроводящего канала. Максимальная скорость генерации  $H_2O_2$  составляет  $3,6 \cdot 10^{-3}$  ммоль/л·с. Кинетика образования ОН-радикалов исследована путем регистрации эмиссионного спектра в области 280—400 нм. Показано, что эффективность генерации радикалов ОН уменьшается с ростом длины капилляра.*

Подводные электрические разряды как новые эффективные методы очистки растворов и обработки материалов привлекают внимание многих групп исследователей. Все подводные разряды

являются эффективными источниками радикалов и активных частиц ОН,  $O_2^*$ , Н, О,  $HO_2$ , перекиси водорода, озона, УФ-излучения, а также в ряде случаев ударных волн [1—3]. Существенным пре-

имуществом данных систем также является возможность совмещения плазменного воздействия на обрабатываемые объекты с возможностями традиционных высокоселективных химических процессов в растворах. В ряде работ [4—6] оценена эффективность разрушения органических соединений, таких как фенол, красители и спирты в подводных разрядах. Авторами работ [6, 7] показано, что в основном реакции разрушения органических соединений инициируются гидроксил-радикалами, озоном и перекисью водорода. Рядом авторов было показано, что эффективность подводных разрядов в процессах очистки воды прямо связана с эффективностью образования перекиси водорода и ОН-радикалов под воздействием плазмы. К сожалению, авторы ограничиваются только исследованием генерации активных частиц в определенных системах, без сопоставления эффективности различных типов подводных разрядов [1—7].

Данная работа посвящена исследованию процессов генерации перекиси водорода в специальном виде диафрагменного разряда — капиллярном разряде переменного тока. Механизм генерации разряда описан в работах [8, 9] и по физической природе процесс аналогичен возникновению диафрагменного разряда в объеме электролита. Преимущество разрядов переменного тока — простота генерации. Они не требуют сложного оборудования для инициирования и поддержания разряда, могут быть легко масштабированы до промышленных масштабов за счет увеличения числа рабочих секций и тока горения разряда. Ранее нами было показано, что капиллярный разряд может использоваться для обработки хлопкового волокна [9].

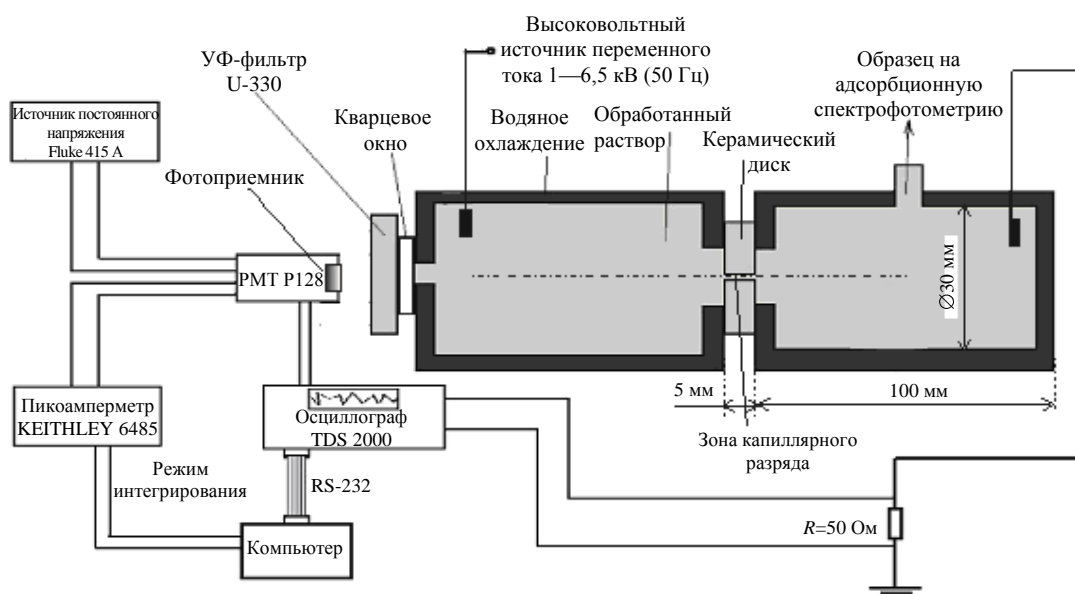
В представленной работе исследована кинетика накопления  $H_2O_2$  и ОН-радикалов в ходе горения

разряда при изменении геометрии токопроводящего канала и напряжения горения; проведено сопоставление разных подводных разрядов по эффективности образования перекиси водорода.

### Методика экспериментов

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Разряд генерируется в узком капилляре, соединяющем две части ячейки, заполненной электролитом. Капилляр представляет собой просверленное в центре керамического диска отверстие диаметром 0,5 мм, длиной от 1 до 7 мм. Электроды сделаны из меди или латуни, стекло Ругех использовано как материал стенок плазменно-растворной ячейки. Эксперименты проводили в растворе  $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$  с проводимостью  $\sigma = 100$  мкСм/см. Прикладываемое напряжение изменялось в пределе 0,5—6,2 кВ<sub>RMS</sub> (50 Гц). Спектр разряда (200—900 нм) регистрировался на Ocean Optic Spectrometer S2000 (решетка 600 штрихов/мм). Для того чтобы избежать термического разрушения пероксида водорода при температурах выше 70 °С [10] использовалось водяное охлаждение ячейки. Это позволяет сохранять температуру раствора в системе в области 43—50 °С в течение 2 ч работы во всех режимах горения разряда. Концентрация  $H_2O_2$  определялась спектрофотометрически по реакции с метаванадатом аммония [11]. Кинетика генерации ОН-радикалов в газовой фазе измерялась путем записи интенсивности излучения гидроксил-радикалов (280—400 нм) с ФЭУ Р-128 и УФ-фильтром U-330, смонтированными на одной горизонтальной оптической оси с зоной разряда (см. рис. 1). Аналогичный метод для регистрации ОН-радикалов был использован в работах [12, 13] для диафрагменного разряда.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки



## Результаты и обсуждение

При прикладывании высокого напряжения к узкому каналу, заполненному электролитом, происходит интенсивный Джоулев нагрев раствора внутри канала. Перегрев электролита приводит к образованию газопарового пузыря, его росту и пробоем с образованием разряда. Механизм поддержания разряда описан в работах [8, 9]. Изменение длины отверстия в керамической диафрагме от 1 до 7 мм приводит к изменению гидродинамики образования и росту пузыря и, соответственно, изменению свойств разряда, генерируемого в объеме образованного пузыря. При этом изменяются прежде всего вольт-амперные характеристики разряда. На рис. 2 представлена усредненная вольт-амперная характеристика разряда при одинаковой проводимости раствора для разных капилляров.

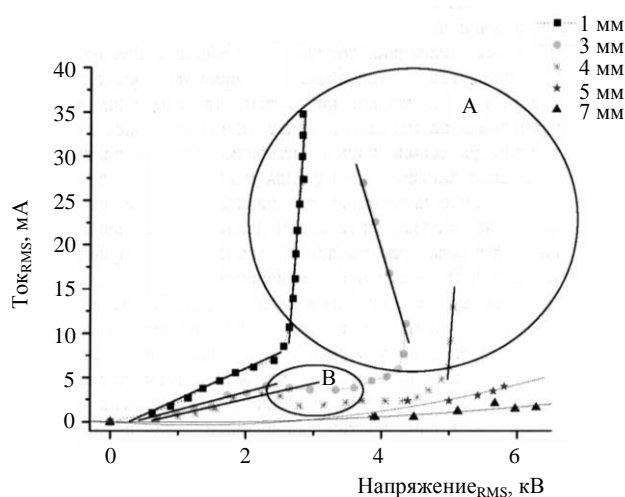


Рис. 2. Времяусредненные вольт-амперные характеристики капиллярного разряда

При малых напряжениях ток, протекающий через разряд, определяется только проводимостью раствора (начальный участок кривых для 1, 3, 4 мм). Далее на кривых для капилляров длиной 3 и 4 мм наблюдается перегиб, соответствующий процессу образования пузыря. На кривой для 1 мм капилляра перегиб практически отсутствует, поскольку в образуемом пузыре немедленно происходит пробой. Повышение напряжения приводит к образованию разряда и резкому росту тока (см. участок роста тока на рис. 2). На кривых для 5 и 7 мм область резкого роста тока лежит выше 6,5 кВ и не была достигнута в экспериментах. Вольт-амперная характеристика разряда для 1-мм капилляра соответствует "классическому" диафрагменному разряду [1, 8]. Максимальное значение усредненной

плотности тока через капилляр  $j_{\text{mid}}^{\text{mid}} = \frac{4I_{\text{RMS}}^{\text{mid}}}{pd^2}$ , из-

меренное нами, составляет  $44,5 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$ . Увеличение длины отверстия до 5 мм изменяет соотношение  $r/l$

(радиус/длина отверстия), и усредненная плотность тока через капилляр уменьшается до  $5,3 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$ . Кривая для 3-мм капилляра имеет отрицательный наклон в области образования плазмы (область А). Объяснение этого основано на влиянии длины капилляра на гидродинамику роста пузыря. Вероятно, что в 3-мм капилляре образуемый газопаровой пузырек не разрушается в каждом полупериоде тока, если ток разряда не превышает 10 мА. В результате напряжение пробоя жидкости, содержащей маленькие пузыри, будет ниже, чем просто жидкой фазы, и мы наблюдаем отрицательный наклон В/А кривой (см. участок В на рис. 2). С другой стороны, в 1-мм капилляре размер пузыря слишком мал и он разрушается в каждом полупериоде, а в капиллярах более 3 мм значительное влияние на гидродинамику роста пузыря оказывает формируемая в разряде ударная волна. Однако проверка этого предположения требует детального исследования эволюции образуемого в межэлектродном пространстве пузыря, что выходит за рамки данной работы.

## Спектральные характеристики

Эмиссионный спектр разряда, представленный на рис. 3, в области 200—900 нм показывает пик излучения в УФ-области (280—340 нм), что соответствует излучению ОН-радикалов [14]. Спектр излучения плазмы в этой области представлен переходами гидроксил-радикала  $A^2\Sigma^+(v=1) \rightarrow X^2\Pi(v=0)$  на 282 нм и переходом  $A^2\Sigma^+(v=0) \rightarrow X^2\Pi(v=0)$  — на 309 нм. Пики в видимой области были нами идентифицированы как  $H_\alpha$  (656,3 нм),  $H_\beta$  (486,1 нм) и  $Na^I$  (589,6, 589 нм). Пик в ИК-области соответствует эмиссионной линии атомарного кислорода  $O^I$ , переход  $3p^5P^0 \rightarrow 3s^5S^0$  (771,0 нм). Таким образом, видно, что в разряде образуется целый ряд первичных активных частиц, которые могут непосредственно реагировать с различными органическими соединениями или вступать во вторичные реакции с образованием продуктов, таких как  $H_2O_2$ .

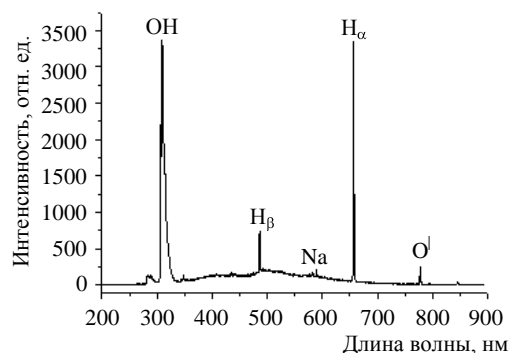
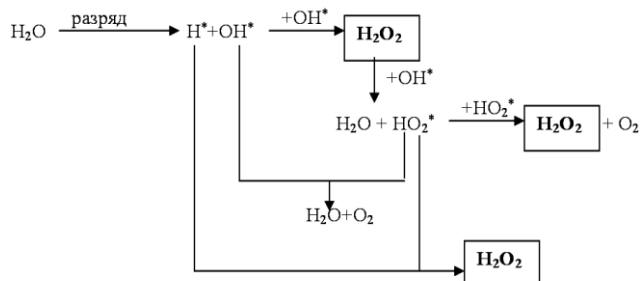


Рис. 3. Спектр капиллярного разряда

### Кинетика образования пероксида водорода

Пероксид водорода образуется в разрядах по целому ряду реакций с участием первичных активных частиц и их промежуточных продуктов [3, 15]. Упрощенная схема может быть записана как



Авторами статьи были получены кинетические кривые накопления  $\text{H}_2\text{O}_2$  для всех типов капилляров и различной энергии, вкладываемой в разряд. Было найдено, что кривые выходят на стационарное положение на времени около 100—120 мин. Увеличение мощности, вкладываемой в разряд от 11,2 до 18,9 Вт (для 5-мм капилляра) приводит к росту стационарной концентрации перекиси от 0,17 до 5,32 ммоль/л. Рост эффективности генерации  $\text{H}_2\text{O}_2$  при увеличении мощности, вкладываемой в разряд, является немонотонным. Так, изменение мощности от 11,2 до 18 Вт (5-мм капилляр) приводит к росту стационарной концентрации пероксида водорода до 1,35 ммоль/л. Дальнейшее увеличение вкладываемой мощности на 0,9 Вт приводит к резкому возрастанию стационарной концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  практически в два раза.

Кинетические кривые накопления  $\text{H}_2\text{O}_2$  для различных капилляров при фиксированном напряжении 4,7 кВ представлены на рис. 4. Наибольшая стационарная концентрация 16,2 ммоль/л достигается в самом коротком капилляре длиной 1 мм при мощности 107 Вт. Анализ данных рис. 4 показывает, что при малом времени обработки (до 18 мин) накопление  $\text{H}_2\text{O}_2$  происходит более

эффективно в капиллярном разряде (при длине 4 или 5 мм), чем в диафрагменном (при длине капилляра 1 или 3 мм).

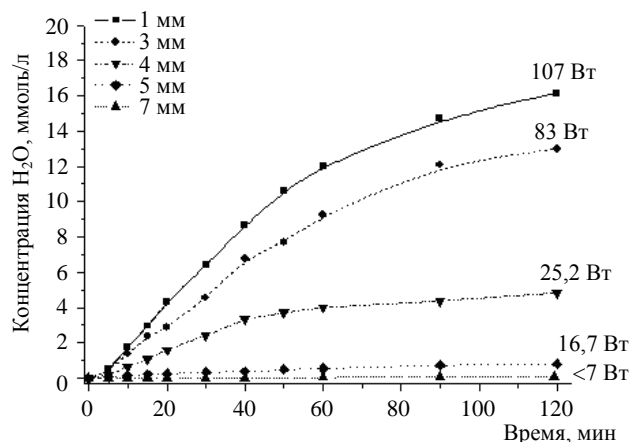


Рис. 4. Кинетика образования  $\text{H}_2\text{O}_2$  в разряде с различной длиной капилляра

С практической точки зрения представляет интерес сравнение разных типов разрядов по эффективности генерации перекиси водорода. К сожалению, разные авторы используют различные критерии эффективности образования активных частиц. В табл. 1 представлены данные ряда работ об эффективности образования  $\text{H}_2\text{O}_2$  в импульсном, диафрагменном, коронном и тлеющем разрядах. Эффективность образования  $\text{H}_2\text{O}_2$  нами оценивалась из скорости образования перекиси водорода в начальный момент времени аналогично [16—18]:

$$h_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}_2}}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} \cdot (t_2 - t_1) \cdot Mr_{\text{H}_2\text{O}_2} \cdot 1000W}{\int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)},$$

где  $t_2 - t_1 = 3600$  с.

Сравнение плазменно-растворных систем по эффективности образования перекиси водорода

Таблица 1

Тип разряда	U, кВ	I, характеристики импульсов	$\chi$ , проводимость, мкСм·см <sup>-1</sup>	P, Вт	$h_{\text{H}_2\text{O}_2}$ , $\frac{\text{г}}{\text{кВт}_{\text{RMS}} \cdot \text{ч}}$	Выход молекул электрон	Литература
Тлеющий	1,55	60 мА	Водопроводная вода	90	4	—	[22]
Импульсный	40	0,5 мкс, 0,3 Дж	То же	30	0,843	—	[16]
	25	5 мкс, 2 Дж	"	200	0,905	—	
Импульсный	46	380 мДж	7	22,8	3,64	—	[15]
Скользкая дуга	12	100 мА	5,4 и 40	250	0,0652	—	[17]
				500	Факельный режим		
					0,544		
					Нормальный режим		

Окончание табл. 1

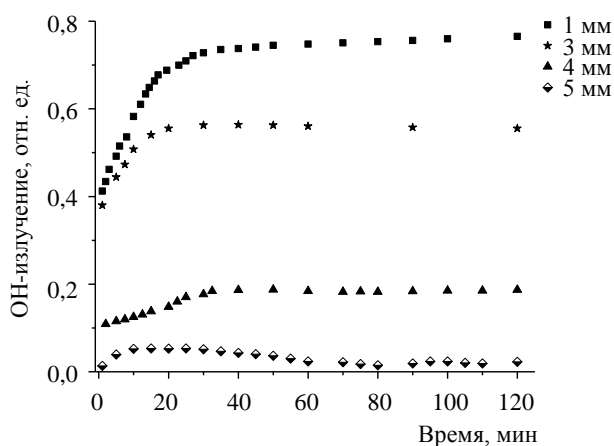
Тип разряда	$U$ , кВ	$I$ , характеристики импульсов	$\chi$ , проводимость, мкСм·см <sup>-1</sup>	$P$ , Вт	$h_{\text{H}_2\text{O}_2}, \frac{\text{г}}{\text{кВт}_{\text{RMS}} \cdot \text{ч}}$	Выход молекул/электрон	Литература
Импульсная корона	40	0,5—1 мкс	$\approx 1$ Дистиллированная вода	140	0,137	—	[18]
Импульсная корона	25—40	—	—	—	—	2,33—4,3	[23]
Тлеющий	0,5—0,8	0,02—0,2 А	10—40	10—160	—	0,5—0,8	[24]
Контактный тлеющий	0,42—0,52	4—15 мА	$\approx 10$	1,6—3,6	—	0,66—1,01	[25]
Тлеющий	3	10 мА	100	30	5,44	0,9—2	[26]
Диафрагменный, DC	2,8	163 мА	500	456	0,74	—	[27]
Данная работа	3,01	27,4 мА*	100	76,7	4,1	0,98	
Данная работа	5,42	3 мА*	100	18,3	7,8	3,48	

Из представленных данных видно, что капиллярный разряд является эффективным с точки зрения получения перекиси водорода. Энергетическая эффективность получения  $\text{H}_2\text{O}_2$  равна 7,8 г/(кВт·ч), а выход 3,48 молекул/электрон. Разряд удобен с технологической точки зрения для обработки растворов, сточных вод и модифицирования полимерных материалов.

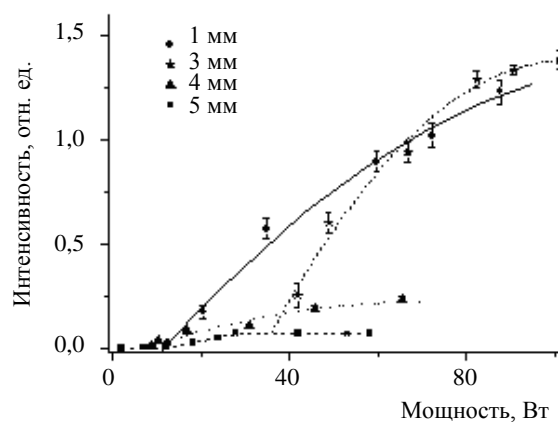
#### Кинетика образования гидроксил-радикалов

Генерация ОН-радикалов исследовалась по регистрации интенсивности излучения плазмы в области 280—400 нм, соответствующей излучению гидроксил-радикалов (см. рис. 3). Спектр излучения плазмы в этой области представлен переходами  $A^2\Sigma^+(v=1) \rightarrow X^2\Pi(v=0)$  с максимумом при 282 нм и  $A^2\Sigma^+(v=0) \rightarrow X^2\Pi(v=0)$  при 309 нм.

Как показано в работах [13, 15] регистрация излучения плазмы в области 280—400 нм позволяет исследовать качественные кинетические закономерности образования ОН-радикалов в подводном разряде. Следует отметить, что измеряемые зависимости справедливы для процесса образования ОН-радикалов в газопаровом пузыре. Кинетика образования радикалов ОН в растворе может существенно отличаться от кинетики в газовой фазе. Временное изменение интегральной интенсивности излучения ОН-радикалов для различных капилляров при постоянной мощности 53 Вт показано на рис. 5, а, а зависимость интенсивности излучения от мощности — на рис. 5, б. Данные рис. 5, б получены после 60 мин обработки, когда излучение радикалов выходит на стационарный ход.



а



б

Рис. 5. Интегральное излучение ОН-радикалов:

а — от времени (средняя мощность 53 Вт); б — как функция вкладываемой мощности для различных капилляров

Видно, что кинетические кривые образования гидроксил-радикалов в отличие от кривых для  $H_2O_2$  выходят на стационарное состояние за 30 мин. Сравнение кривых на рис. 5, б показывает, что эффективность генерации радикалов в 1- и 3-мм капиллярах при одной мощности близка. Для разряда в более длинных капиллярах при той же мощности интенсивность излучения радикалов из зоны плазмы намного более слабая. Для примера, интенсивность излучения равна 0,91; 0,84; 0,22 и 0,07 отн. ед. для 1-, 3-, 4- и 5-мм капилляров ( $P = 60$  Вт). Понижение эффективности генерации радикалов в длинных капиллярах может быть объяснено типом генерируемого подводного разряда. Исследование оптического излучения ОН-радикалов от времени с разрешением  $10^{-6}$  с показало, что длительность импульсов излучения из плазмы сильно зависит от геометрии диафрагмы. В 1-мм капилляре длительность периода излучения составляет до 6,8 мс, в 3-мм капилляре регистрируются как импульсы длительностью до 12 мс, так и короткие импульсы до 0,58 мс, в 5-мм капилляре разряд горит в режиме импульсов плазмы длительностью от 0,9 до 0,1 мс. Для 7-мм капилляра прикладываемого напряжения недостаточно для пробоя газового пузыря в каждом полупериоде тока, и генерация ОН-радикалов происходит только в течение коротких (0,1 мс) импульсов 1—2 раза в секунду. Как результат интегральная интенсивность излучения для такого капилляра будет очень мала.

**Сопоставление возможностей плазменного и плазменно-растворного модифицирования материалов в жидкой фазе**

В настоящее время одним из основных методов отбели и делигнификации природных материалов является перекисный метод. Реакционноспособные формы реагентов, участвующих в процессах жидкостной отбели, приведены в работе [19]. С технологической точки зрения плазменная акти-

вация сводится к генерации под действием разряда активных частиц, близких по природе к представленным в табл. 2 в достаточных концентрациях. В качестве примера плазмы, не скомбинированной с раствором, мы рассмотрим плазму тлеющего разряда атмосферного давления, стабилизированного быстрым потоком газа. Схема возбуждения такого разряда приведена в работе [20]. Согласно приведенным в работе данным ток разряда составлял 50 мА при полном падении напряжения около 30 кВ. Линейная скорость потока воздуха составляла 123 см/с. Это соответствует объемному расходу газа  $\sim 100$  см<sup>3</sup>/с при времени контакта газа с плазмой 0,04 с. Максимальная концентрация ионов в зоне плазмы составляет  $1,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, а максимальная концентрация нейтральных активных частиц (озон) —  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Это дает потоки ионов и нейтральных частиц  $1,5 \cdot 10^{13}$  и  $2 \cdot 10^{18}$  с<sup>-1</sup>, что составляет, соответственно,  $\sim 0,25 \cdot 10^{-10}$  и  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  моль/с. При рассеиваемой в разряде мощности около 1500 Вт затраты на генерацию озона как одной из основных активных частиц составляют около  $2 \cdot 10^{-9}$  моль/Дж. Выход других активных частиц существенно меньше. В целом набор активных частиц в условиях разряда во влажном воздухе, в зоне плазмы, близок по составу к набору частиц, образующихся в процессах делигнификации и отбели целлюлозы.

Для плазменно-растворных систем учтем, что водные растворы, выступающие в роли электродов газового разряда, подвергаются бомбардировке положительными и отрицательными ионами, инжектируемыми из зоны плазмы. Набор первичных активных частиц, возникающих под действием ионной бомбардировки, приведен в первом столбце табл. 2, далее даны результаты превращений этих частиц в кислой и щелочной средах.

Указанный набор реакций первичных активных частиц создает среду, в которой могут протекать все процессы, сопровождающие делигнификацию целлюлозосодержащих материалов.

Таблица 2

**Первичные активные частицы, образуемые под действием разряда, и реакции их превращений**

Сольватированные электроны	Атомы Н	Радикалы ОН и О <sup>-</sup>
$e_{aq} + e_{aq} + 2H_2O \rightarrow H_2 + OH^-$	$H + H \rightarrow H_2$	$OH + OH \rightarrow H_2O_2$
$e_{aq} + O_2 \rightarrow O_2^-$ , $e_{aq} + H_{aq}^+ \rightarrow H$	$H + OH \rightarrow H_2O$	$O^- + O_2 \rightarrow O_3^-$
$e_{aq} + H \rightarrow H^-$ , $H^- + H_2O \rightarrow H_2 + OH^-$	$H + OH_{aq}^- \rightarrow e_{aq} + H_2O$	$OH + H \rightarrow H_2O$
$e_{aq} + H_2O \rightarrow H + OH_{aq}^-$	$H + O_2 \rightarrow HO_2$	$OH + OH_{aq}^- \leftrightarrow O^- + H_2O$
$H_2O_2 + e_{aq} \rightarrow OH + OH_{aq}^-$		

Интегральную эффективность активационных процессов в растворе мы можем оценить как сумму выходов основных первичных активных частиц  $H$ ,  $OH$ ,  $e_{solv}$ . Выходы первичных активных частиц в плазменно-растворных системах удобно измерять в числе этих частиц, образующихся в расчете на один попадающий в раствор ион. Для оценок эффективности учтем, что суммарный выход указанных выше активных частиц составляет около 10 [21]. Это значит, что при токе разряда 50 мА суммарная скорость генерации активных частиц в растворе составит  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  частиц/с ( $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  моль/с). Мы получили почти ту же величину, что и в случае "сухой" плазмы. Однако при токе разряда 50 мА катодное падение потенциала меньше 1 кВ. Это дает выход первичных активных частиц  $5 \cdot 10^{-6}/50 \sim 10^{-7}$  моль/Дж. Таким образом, в случае плазменно-растворной системы эффективность химической активации оказывается более высокой, чем в "сухой" плазме, не менее чем на порядок величины.

### Выводы

Капиллярный разряд является эффективным источником пероксида водорода и  $OH$ -радикалов. Начальная скорость генерации  $H_2O_2$  возрастает с уменьшением длины капилляра, в то время как энергетическая стоимость образования пероксида водорода увеличивается. Найдено, что эффективность образования  $H_2O_2$  зависит как от вкладываемой в разряд мощности, так и от геометрии разрядного промежутка. Максимальная скорость  $H_2O_2$  генерации составляет  $3,6 \cdot 10^{-3}$  ммоль/л·с (напряжение  $3,7$  кВ<sub>RMS</sub>, ток 30 мА, капилляр 1-мм). Энергетическая стоимость получения  $H_2O_2$  равна  $4,1$  г/(кВт·ч) в 1-мм капилляре и  $7,8$  г/(кВт·ч) — в 5-мм капилляре. Эффективность образования  $OH$ -радикалов резко падает с увеличением длины капилляров более чем 4 мм, что объясняется различием режимов горения плазмы. Найдено, что максимальный выход  $H_2O_2$  в капиллярном разряде равен 3,48 молекул на электрон, что выше, чем в традиционном диафрагменном разряде и тлеющем разряде с электролитным катодом. Также была проанализирована принципиальная возможность использования плазменно-растворных систем и быстропроточного высоковольтного разряда в воздухе для интенсификации процессов отбеливания природных полимерных материалов. В случае "сухой" плазмы основной активной частицей, генерируемой в зоне разряда, является озон, а в плазменно-растворных системах — радикалы  $OH$  и пероксид водорода, причем эффективность активации во втором случае более высокая.

### Литература

1. Куменов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. — М.: Наука, 2004. С. 496.
2. Sunka P. // Physics of plasmas. 2001. V. 8. № 5. P. 2587—2594.
3. Malik M. A., Ghaffar A., Malik S. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 82—91.
4. Hayashi D., Hoeben W. F. L. M., Dooms G., van Veldhuizen E. M., Rutgers W. R., Kroesen G. M. W. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 2769—2774.
5. Malik M. A., Ubaid-ur-Rehman I., Ghaffar A., Ahmed K. // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 236—240.
6. Jinzhang G., Liu Y., Yang W. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. P. 533—538.
7. Lukes P., Locke B. R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 4074—4081.
8. De Baerdemaeker F., Monte M., Leys C. // Czechoslovak Journal of Physics Suppl. C. 2004. V. 54. P. 1062.
9. Nikiforov A., Leys C. // Journal of Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-006-9021-7>
10. Shamb U., Setterfield Ch., Wentvors R. Hydrogen peroxide 1958 (MJ Publishing house Foreign Literature in Russian). P. 429.
11. Pupo Nogueira R. F., Oliveira M. C., Paterlini W. C. // Talanta. 2005. V. 66. P. 86—91.
12. Prochazkova J., Stara Z., Krca F.: Proc. Int. Conf. CAPPESA 2005 (Bruges, Belgium). P. 248—251.
13. Stará Z., Krca F. Proceedings of ICPIG XXVII 2005 (Eindhoven) ISBN 90-386-2231-7.
14. Herzberg G. Molecular spectra and molecular structure. I Spectra of Diatomic molecules 1950 (Litton Educational publishing). P. 658.
15. Grymonpré D. R., Sharma A. K., Finney W. C., Locke B. R. // Chemical Engineering Journal. 2001. V. 82. P. 189—207.
16. Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., Bark Yu. B., Zadira Yu. V. et al. // J. Physics D: Applied Physics. 2001. V. 34. P. 993—999.
17. Burlica R., Kirkpatrick M. J., Locke B. R. // J. Electrostatics. 2006. V. 64. P. 35—43.
18. Joshi A. A., Locke B. R., Arge P., Finney W. C. // J. Hazardous Materials. 1995. V. 41. P. 3—30.
19. Демин В. А., Шерешовец В. В., Монаков Ю. Б. // Успехи химии. 1999. Т. 68. № 11. С. 1029.
20. Акишев Ю. С., Дерюгин А. А., Каральник В. Б., Кочетов И. В., Напартович А. П., Трушкин Н. И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571.
21. Бугаенко Л. Т., Кузьмин М. Г., Полак Л. С. Химия высоких энергий. — М.: Химия, 1988. С. 368.
22. Иванников А. А., Лелевкин В. М., Токарев А. В., Юданов В. А. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 2. С. 148—151.
23. Sharma A. K., Locke B. R., Arge P., Finney W. C. // Hazardous waste and hazardous materials. 1993. V. 10. № 2. P. 209—219.
24. Hickling A., Ingram M. J. // Electroanalytical Chemistry 1964. V. 8. P. 65—81.
25. Sengupta S. K., Singh O. P. // J. Electroanalytical Chemistry. 1994. V. 369. № 1/2. P. 113—120.
26. Titova U. V., Sergeeva I. N., Kusmicheva L. A., Maximov A. I. // Materials of III International symposium on theoretical and applied plasma chemistry. 2002. Ivanovo Russia V. 1. P. 103—105.
27. Stara Z., Krca F. // Czechoslovak Journal of Physics Suppl. C. 2004. V. 54. C. 1—6.

## Influence of the interelectrode gap of the alternative current underwater diaphragm discharge on its physical and chemical properties

A. Yu. Nikiforov, A. I. Maximov

The Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Science, Ivanovo, Russia

*A process of active particles generation under action of the underwater discharge with different geometry of current conducting canal was investigated. It is found that efficiency of  $H_2O_2$  formation depends on input discharge power as well as length of the current conducting capillary. Maximal rate of  $H_2O_2$  generation amounts  $3.6 \cdot 10^{-3}$  mmol/l.s. Kinetic of OH radicals formation is investigated by means of registration of emission spectrum in the region of 280—400 nm. It is revealed that efficiency of radical's generation decreases with increase of capillary length.*

УДК 533.9

## Компактный микроволновый источник плазмы CERA-RI

A. A. Балмашинов, A. B. Калашников

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*Разработан компактный источник плазменного потока, ионный ток в котором достигает 20 мА, при мощности высокочастотного генератора, работающего в непрерывном режиме на частоте 2,47 ГГц, менее 20 Вт и при уровне магнитного поля, не превышающем 60 % от величины, соответствующей ЭЦР. Предполагается возможность его использования в качестве двигателя коррекции орбит легких летательных аппаратов.*

Компактные источники плазменных потоков представляют значительный интерес в связи с возможностью их использования в качестве двигателей коррекции орбит легких летательных аппаратов. Наряду с продолжением работ над источниками, в которых применяется разряд постоянного тока или высокочастотный разряд [1], в настоящее время особое внимание уделяется созданию микроволновых источников, реализация резонансных механизмов формирования плазмы в которых определяет их высокую газовую и энергетическую эффективность. В частности, вопросу оптимизации параметров микроволнового плазменного двигателя посвящена работа [2], в которой представлены результаты исследования влияния геометрии центрального электрода коаксиальной разрядной камеры и пространственной локализации области ЭЦР (2,45 ГГц) на параметры формируемого плазменного потока.

Предлагаемый авторами источник обладает всеми преимуществами, определяемыми резонансным взаимодействием высокочастотного поля с электронной компонентой плазмы, включающими в себя не только энергетическую и газовую эффективность, но и значительный временной ре-

сурсы работы, а также малый массогабаритный параметр. Однако сильно неоднородное магнитное поле в области транспортировки плазмы к системе экстракции заряженных частиц, а также тот факт, что разрядная камера не является резонатором, существенным образом должны влиять как на величину ионного тока, так и на уровень высокочастотного поля, обеспечивающего поджиг разряда. В связи с этим нами предлагается устройство, в котором разрядная камера является коаксиальным резонатором, а профиль магнитного поля обеспечивает не только снижение потерь заряженных частиц в радиальном направлении, но и обеспечивает их транспортировку в продольном, а также локализацию разряда в области системы экстракции частиц плазмы.

Цель работы — демонстрация возможности реализации предлагаемой конструкции источника плазменного потока.

### Описание источника CERA-RI и средств диагностики параметров плазмы

Источник состоит из цилиндрического коаксиального резонатора (диаметр 5 см, длина 2 см, диа-