

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА В КАПИЛЛЯРНОМ ПОДВОДНОМ РАЗРЯДЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Институт химии растворов РАН,
ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия*

Введение

Подводные электрические разряды вызывают пристальное внимание многих исследователей как новые эффективные методы очистки растворов и обработки материалов. Подводные разряды можно разделить на две большие группы исходя из метода их генерации. Это разряды (корона, стример и т.д.), создаваемые короткими импульсами высокого напряжения (от наносекунд до 1 микросекунды) с токами до кА, и разряды постоянного и переменного тока, генерируемые в газопаровом пузыре [1]. Все подводные разряды служат эффективными источниками радикалов и активных частиц OH , O_2^* , H , O , HO_2 , перекиси водорода, озона, УФ излучения, а также в ряде случаев ударных волн [2, 3]. Существенным преимуществом данных систем является также возможность совмещения плазменного воздействия на обрабатываемые объекты с возможностями традиционных высокоселективных химических процессов в растворах. В ряде работ оценена эффективность разрушения органических соединений, таких как фенол, красители и спирты, в подводных разрядах [4–6]. В работах [6, 7] показано, что реакции разрушения органических соединений инициируются в основном гидроксил радикалами, озоном и перекисью водорода. Группой авторов было доказано, что интенсивность подводных разрядов в процессах очистки воды прямо связана с эффективностью образования перекиси водорода и OH радикалов под воздействием плазмы. К сожалению, они ограничились только исследованиями генерации активных частиц в определенных системах без сопоставления эффективности различных типов подводных разрядов [1–7].

В данной статье исследуются процессы генерации перекиси водорода в капиллярном разряде переменного тока. Механизм генерации разряда описан в работах [8, 9] и по физической природе 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 доведены 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 статье исследована кинетика накопления H_2O_2 в ходе горения разряда при изменении геометрии токопроводящего канала и напряжения горения. Вместе с тем произведено сопоставление разных подводных разрядов по эффективности образования перекиси водорода.

Методика эксперимента

Принципиальная схема установки для генерации капиллярного разряда представлена на рис.1. Разряд генерируется в узком канале (капилляре), соединяющем два сосуда с электролитом, при прикладывании повышенного напряжения разной полярности к плазменно-растворной ячейке. Внутренний диаметр капилляра составлял 0,5 мм, его длина варьировала от 1 до 7 мм. Использовались электроды из меди и латуни. Они располагались на расстоянии 3 см от зоны разряда. Последовательно включенный в схему резистор 50 Ом служил для измерения тока, протекающего в разряде. Эксперименты проводились в растворе $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с проводимостью $100 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$. Величина прикладываемого напряжения варьировала от 0,25 до 6,2 kV_{RMS} . Напряжение и ток разряда записывались одновременно с помощью пробника напряжения и тока на цифровой осциллокоп Tektronix TDS2000. Спектр разряда в области 200–900 нм был измерен Ocean Optic Spectrometer S2000 с линейной CCD матрицей при времени интегрирования спектра $2 \cdot 10^5$ мс. Охлаждение плазменно-растворной ячейки

использовалось для предотвращения разрушения перекиси водорода при повышенных температурах. Концентрация H_2O_2 определялась спектрофотометрически по реакции с метаванадатом аммония [10]. Метод основан на реакции метаванадата аммония с H_2O_2 в кислой среде по уравнению:



Получаемое соединение имеет максимум адсорбции в области 450 нм. Тогда концентрацию перекиси можно оценить по следующему выражению:

$$C_{H_2O_2} = \frac{-\log_{10} \left(\frac{I^{sample}}{I^{test}} \right) \cdot V_2}{283 \cdot V_1}, \text{ моль/л}, \quad (2)$$

где V_1 и V_2 – объемы аликвоты, взятой для анализа, и общий объем раствора после разбавления соответственно.

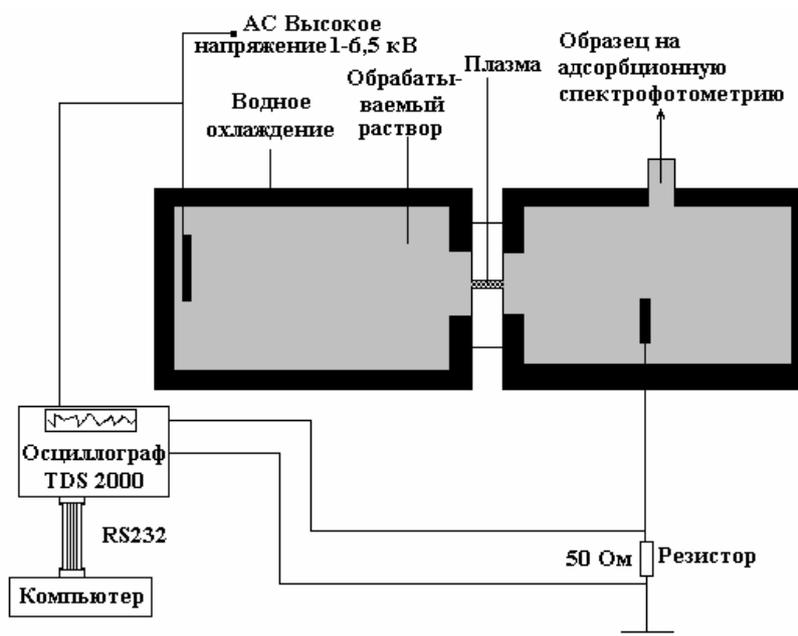


Рис. 1. Схема установки для генерации капиллярного разряда переменного тока

Результаты и обсуждение

Исследовался способ образования H_2O_2 в разряде с различной длиной капилляра, в котором генерируется плазма. 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 [8, 9]. Разная длина отверстия в керамической диафрагме (от 1 до 7 мм) приводит к изменению гидродинамики образования и роста пузыря и соответственно свойств разряда, генерируемого в его объеме. При этом изменяются прежде всего вольт-амперные характеристики разряда и вкладываемая в него мощность. На рис. 2 представлена усредненная вольт-амперная характеристика разряда (128 усреднений) при одинаковой проводимости раствора для разных капилляров.

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 (участок роста тока, рис. 3). На кривых для 5 и 7 мм область резкого роста тока лежит выше 6,5 кВ и в экспериментах не была достигнута. Вольт-амперная характеристика разряда для 1 мм капилляра соответствует «классическому» диафрагменному разряду [1, 8]. Максимальное измеренное значение усреднен-

ной плотности тока через капилляр $j^{cp} = \frac{4I_{RMS}^{cp}}{\pi d^2}$ составляет $44,46 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$. Увеличение длины отверстия до 5 мм изменяет соотношение r/l (радиус/длина отверстия), и усредненная плотность тока через капилляр уменьшается до $5,28 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$. Данный тип разряда, известный как капиллярный, был описан в [8, 9]. Эмиссионный спектр разряда в области 200–900 нм представлен на рис. 3. Пик излучения в УФ-области (280–340 нм) соответствует излучению ОН радикалов [11]. 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_α (656,3 нм), H_β (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 .

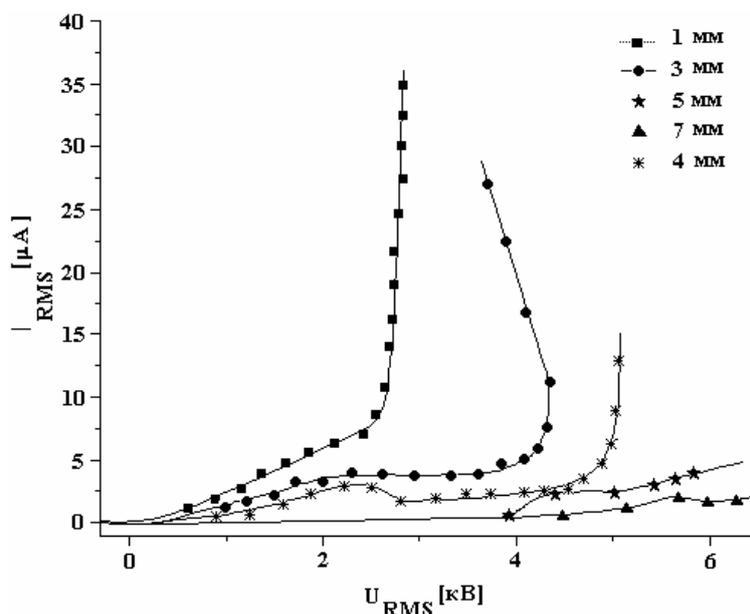


Рис. 2. Усредненная вольт-амперная характеристика разряда, балласт – 42 кОм, проводимость – $100 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$

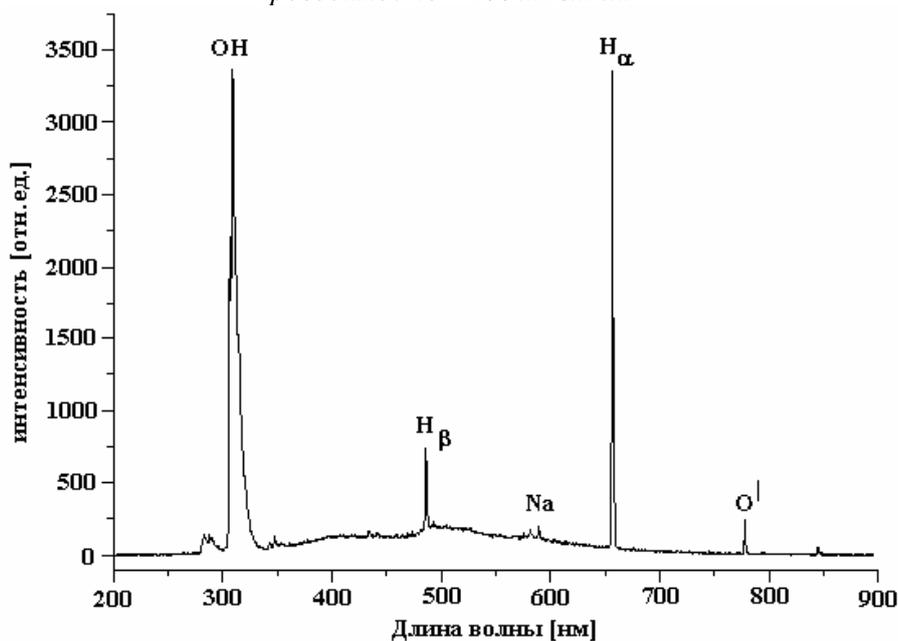


Рис. 3. Спектр капиллярного разряда. Капилляр – 1 мм, мощность – 91,26 Вт, проводимость раствора – $100 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$

В [3, 12] предложен ряд реакций, протекающих в подводных электрических разрядах. Схема наиболее вероятных процессов, протекающих в плазменно-растворных системах, приведена в табл. 1.

Видно, что перекись водорода образуется под действием разряда преимущественно с участием гидроксил радикалов. Концентрации промежуточных соединений (OH^\bullet , HO_2^\bullet и др.) очень малы. Соответственно их роль в генерации H_2O_2 будет крайне невелика. Основным показателем образования перекиси является реакция R9 димеризации OH^\bullet радикалов, а обратные ей процессы R14 и R15 – взаимодействия перекиси с OH^\bullet радикалом и H^\bullet .

Таблица 1. Основные реакции, протекающие в подводных разрядах, и их константы скоростей (k)

	Реакция	k , $\text{M}\cdot\text{c}^{-1}$
R1	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^\bullet + \text{H}^\bullet$	$9,25 \cdot 10^{-10}$
R2	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^\bullet + e_{aq}^-$	$2,35 \cdot 10^{-9}$
R3	$\text{H}^\bullet + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^\bullet$	$1,0 \cdot 10^{10}$
R4	$\text{H}^\bullet + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^\bullet$	$1,0 \cdot 10^{10}$
R5	$e_{aq}^- + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{OH}^-$	$3,0 \cdot 10^{10}$
R6	$e_{aq}^- + \text{H}^\bullet + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}_2$	$2,5 \cdot 10^{10}$
R7	$e_{aq}^- + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}^\bullet + \text{OH}^-$	$1,2 \cdot 10^{10}$
R8	$\text{H}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$2,4 \cdot 10^{10}$
R9	$2\text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$4,0 \cdot 10^9$
R10	$2\text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^6$
R11	$\text{H}^\bullet + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{10}$
R12	$2\text{H}^\bullet \rightarrow \text{H}_2$	$1,0 \cdot 10^{10}$
R13	$\text{HO}_2^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{10}$
R14	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$3,0 \cdot 10^{10}$
R15	$\text{OH}^\bullet + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2^\bullet$	$5,0 \cdot 10^7$

Спектрофотометрическим методом были получены кинетические кривые генерации H_2O_2 для всех типов капилляров и различной энергии, вкладываемой в разряд. Пример кинетических кривых для капилляра длиной 5 мм представлен на рис. 4. Мощность, вкладываемая в разряд, оценивалась следующим уравнением:

$$P = \frac{1}{T} \int_T^{T+t_0} I_m V_m \cdot \cos(\omega t + Q_v) \cos(\omega t + Q_i) dt = I_{rms} V_{rms} \cos(Q_v - Q_i). \quad (3)$$

Из данных рис. 4 видно, что кривые выходят на стационарное положение при времени около 100–120 мин. Увеличение мощности, вкладываемой в разряд от 11,2 до 18,9 Вт, приводит к росту стационарной концентрации перекиси от 0,17 до 5,32 ммоль/л. Рост эффективности генерации H_2O_2 при увеличении мощности, вкладываемой в разряд, является немонотонным. Видно, что изменение мощности от 11,2 до 18 Вт 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 H_2O_2 практически в 2 раза.

Кинетические кривые генерации перекиси водорода при горении разряда в капиллярах различной длины представлены на рис. 5,а. Все эксперименты проводились при фиксированном входном напряжении повышающего трансформатора. Соответственно мощность, вкладываемая в разряд, для всех опытов будет различна. Для наглядности оценки эффективности генерации H_2O_2 в разряде построены приведенные кинетические кривые, показывающие, что ее количество образуется в разряде на 1 Вт вложенной энергии (рис. 5,б).

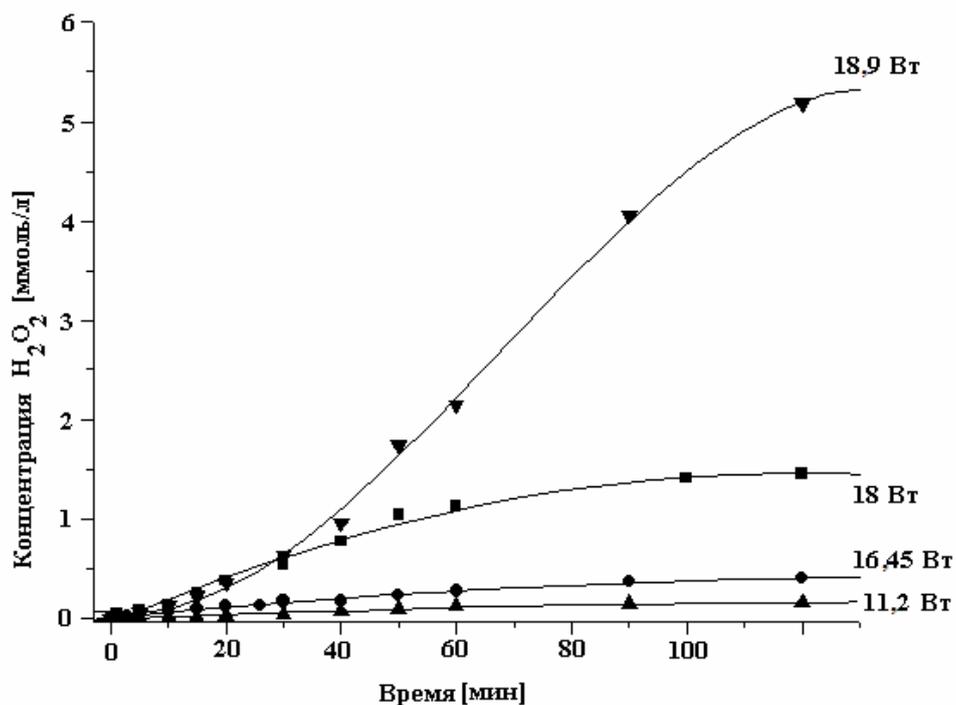
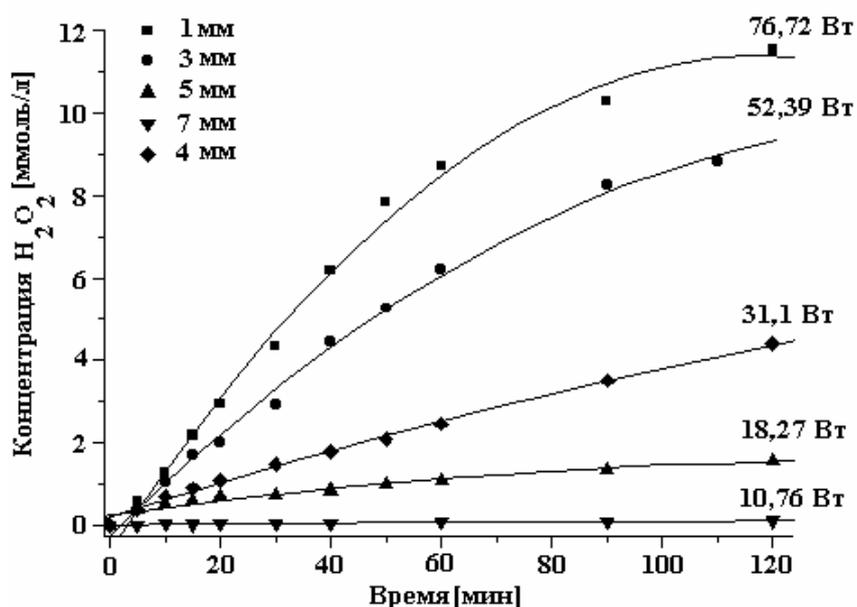


Рис. 4. Кинетическая зависимость генерации H_2O_2 в разряде. Капилляр – 5 мм, проводимость $100 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$

Как и на рис. 4, рост $C_{H_2O_2}$ наблюдается при увеличении вкладываемой в разряд мощности. Наибольшая стационарная концентрация достигается в самом коротком капилляре (длиной 1 мм). Анализ данных (рис. 5,б) показывает, что при малом времени обработки (до 18 мин) накопление H_2O_2 происходит более эффективно в капиллярном разряде (при длине 4 или 5 мм), чем в диафрагменном (при длине капилляра 1 или 3 мм). При большем времени обработки максимальная концентрация пероксида водорода в системе составила $11,5 \text{ ммоль/л}$ после 120 мин обработки для 1 мм капилляра. Следует отметить, что уменьшение толщины диафрагмы не всегда удобно с технологической точки зрения. Наблюдались разрушение диафрагмы и плавление материала в области капилляра при высокой мощности (50–75 Вт) после 90–110 мин горения разряда.



a

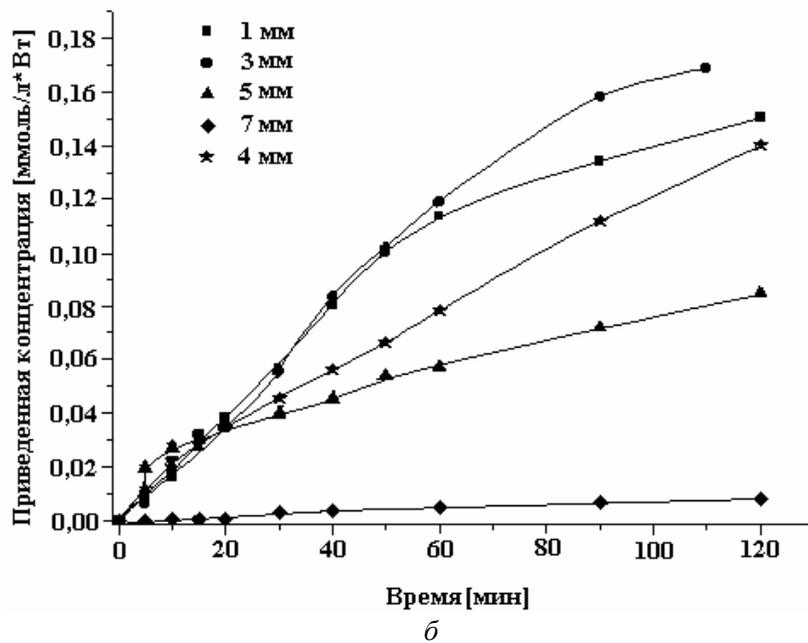


Рис. 5. Кинетические кривые генерации H_2O_2 в разряде для капилляров различной длины при одной ЭДС источника питания (а) и эффективность генерации H_2O_2 , приведенная к энергии, вкладываемой в разряд (б)

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. 2 представлены данные ряда работ об эффективности образования H_2O_2 в импульсном, диафрагменном, коронном и тлеющем разрядах. Эффективность образования H_2O_2 оценивалась из скорости образования перекиси водорода в начальный момент времени по уравнению (4) аналогично [13–16]:

$$h_{H_2O_2} = \frac{\left. \frac{dc_{H_2O_2}}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} \cdot (t_2 - t_1) \cdot Mr(H_2O_2) \cdot 1000W}{\int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt} \quad \text{г/(кВт·ч)}, \quad (4)$$

где $t_2 - t_1 = 3600$ с.

Из представленных данных видно, что:

1. Разряды очень различаются по эффективности генерации пероксида водорода. Так, близкий к физике диафрагменный разряд [21] в 10,5 раза менее эффективен, чем исследованный. По-видимому, причиной этого различия является сильный разогрев раствора вблизи области горения разряда в [21], что приводит к быстрому разрушению пероксида водорода.

2. В случае импульсных разрядов значительно влияют на кинетику образования H_2O_2 процессы разрушения электродов и выделения в раствор ионов Fe^{2+} , катализирующих разрушение пероксида водорода. Также следует иметь в виду, что эффект воздействия импульсных разрядов на обрабатываемый раствор связан с генерацией интенсивного УФ-излучения, ударных волн и ОН радикалов [2–4]. Это в значительной степени определяет эффективность импульсных подводных разрядов.

3. В случае тлеющего разряда разогрев раствора незначителен, а процессами разрушения электрода можно пренебречь [13, 18–20]. Выход пероксида водорода и электрические затраты для таких систем оказываются близкими к полученным. Однако с технологической точки зрения данный тип разряда неудобен из-за необходимости точного контроля дистанции между электродами и раствором и гибелью значительной части активных частиц в газовой фазе за границей раствора.

4. Капиллярный разряд является эффективным в получении перекиси водорода. Энергетическая эффективность получения H_2O_2 равна 7,8 г/(кВт·ч), а выход – 3,48 моль/Ф. Разряд удобен с технологической точки зрения для обработки растворов и сточных вод.

Таблица 2. Сравнение плазменно-растворных систем по эффективности образования перекиси водорода

Тип разряда	U , кВ	I [мА], Характеристики импульсов	Проводимость χ , мкСм·см ⁻¹	P , Вт	$h_{H_2O_2}$, г / кВт·ч	Выход, моль/Фарад	Лит-ра
Тлеющий	1,55	60 мА	Водопроводная вода	90	4	--	[13]
Импульсный	40	0,5 мкс, 0,3 Дж	Водопроводная вода	30	0,843	--	[14]
	25	5 мкс, 2 Дж	Водопроводная вода	200	0,905	--	
Импульсный	46	380 мJ	7	22,8	3,64	--	[12]
Скользкая дуга	12	100 мА	5,4 и 40	250 500	0,0652 <i>Факельный режим</i>	--	[15]
					0,544 <i>Нормальный режим</i>		
Импульсная корона	40	0,5-1 мс	≈1 Дистиллированная вода	140	0,137	--	[16]
Импульсная корона	25–40	--	--	--	--	2,33–4,3	[17]
Тлеющий	0,5–0,8	0,02-0,2 А	10–40	10–160	--	0,5–0,8	[18]
Контактный тлеющий	0,42–0,52	4-15 мА	≈10	1,6–3,6	--	0,66–1,01	[19]
Тлеющий	3	10 мА	100	30	5,44	0,9–2	[20]
Диафрагменный, постоянный ток	2,8	163 мА	500	456	0,74	--	[21]
Капиллярный	3,01	27,4 мА*	100	76,7	4,1	0,98	Наша работа
Капиллярный	5,42	3 мА*	100	18,3	7,8	3,48	Наша работа

RMS – величина с усреднением 128 измерений.

Выводы

Исследована кинетика образования перекиси водорода в капиллярном подводном разряде с различной геометрией токопроводящего капилляра. Эффективность образования перекиси зависит как от мощности, прилагаемой к разряду, так и от геометрии токопроводящей диафрагмы. Показано, что максимальная скорость генерации H_2O_2 составляет 0,11 ммоль/(л·сек) и соответствует условиям генерации разряда: 3,01 кВ, 27,4 мА при длине капилляра 1 мм. Найдено, что при малом времени обработки (до 18 мин) разряд, генерируемый в капилляре длиной 5 мм, более эффективен, чем в коротких. На больших временах обработки эффективность генерации перекиси в капилляре длиной 1 мм уменьшается до 4,1 г/(кВт·ч) по сравнению с 5 мм (эффективность 7,8 г/(кВт·ч)). Сопоставлены разные типы плазменно-растворных систем по эффективности генерации перекиси водорода. Показано, что скорость генерации перекиси в капиллярном разряде выше, чем в традиционном диафрагменном или тлеющем разряде с электролитным катодом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kutepov A.M., Zaharov A.G., Maximov A.I. Vacuumno-plazmennoe i plazmennno-rastvornoe modifizirovanie polimernih materialov, Moscow. Nauka (2004, in russian).

2. Sunka P. Pulse electrical discharges in water and their applications, *Physics of plasmas*. 2001. V.8. N5. P.2587–2594.
3. Malik M.A., Ghaffar A. and Malik S.A. Water purification by electrical discharges. *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. and Kroesen G. M. W. Influence of gaseous atmosphere on corona-induced degradation of aqueous phenol. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. V.33. P. 2769–2774.
5. Malik M. A., Ubaid-ur-Rehman I, Ghaffar A., Ahmed K. Synergistic effect of pulsed corona discharges and ozonation on decolourization of methylene blue in water. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2002. V.11. P. 236–240.
6. Jinzhang G., Liu Y., Yang W., et. all. Oxidative degradation of phenol in aqueous electrolyte induced by plasma from a direct glow discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2003. V.12. P. 533–538.
7. Lukes P. and Locke B. R. Plasmachemical oxidation processes in a hybrid gas–liquid electrical discharge reactor. *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. Surface treatment of cotton yarn by underwater capillary electrical discharge. *Journal of Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-006-9021-7>.
10. Nogueira R. F. P., Oliveira M. C., Paterlini W.C. Simple and fast spectrophotometric determination of H₂O₂ in photo-Fenton reactions using metavanadate. *Talanta.* 2005. V.66. P.86–91.
11. Stará Z., Krčma F. Influence of OH radicals on Organic Dyes in DC Diaphragm Discharge in Water Solutions. *Proceedings of ICPIG XXVII.* 18-226, Eindhoven 2005. ISBN 90-386-2231-7.
12. Grymonpré D. R., Sharma A. K., Finney W. C., B. R. Locke. The role of Fenton's reaction in aqueous phase pulsed streamer corona reactors. *Chemical Engineering Journal.* 2001. V.82. P.189–207.
13. Иванников А.А., Лелёвкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Воздействие тлеющего разряда атмосферного давления на воду. *Химия высоких энергий.* 2003. Том 37. № 2. С. 148–151.
14. Anpilov A. M., Barkhudarov E.M., Bork Yu.B., et. all. Electrical discharge in water as a source of UV radiation, ozone and hydrogen peroxide. *Journal of physics D: Applied Physics.* 2001. V.34. P.993–999.
15. Burlica R., Kirkpatrick M.J., Locke B.R. Formation of reactive species in gliding arc discharges with liquid water. *Journal of electrostatics.* 2006. V.64. P.35–43.
16. Joshi A.A., Locke B.R., Arce P., Finney W.C. Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials.* 1995. V.41. P.3–30.
17. Hickling A., Ingram M.D. Glow discharge electrolysis (review)// *Journ. Electroanalytical Chemistry.* 1964. V.8. P.65–81.
18. Sengupta S.K., Singh O.P. Contact glow discharge electrolysis: a study of its chemical yields in aqueous inert-type electrolytes. Summary. *Journal of electroanalytical chemistry.* 1994. V. 369. N 1/2. P.113–120.
19. Stara Z., Krcma F. The study of H₂O₂ generation by DC diaphragm discharge in liquids. *Czechoslovak Journal of Physics. Supl.C.* 2004. V.54. P.C-1–C-6.
20. Titova U.V., Sergeeva I.N., Kusmicheva L.A., Maximov A.I. Hydrogen peroxide synthesis in a electrolyte solution under action of discharges of atmospheric pressure. *Materials of III International symposium on theoretical and applied plasma chemistry.* Ivanovo. Russia. 2002. V.1. P.103–105.
21. Sharma A.K., Locke B.R., Arge P., Finney W.C. A preliminary study of pulsed streamer corona discharge for degradation of phenol in aqueous solutions. *Hazardous waste and hazardous materials.* 1993. V.10. N2. P.209-219.

Поступила 21.04.06.

Summary

A process of hydrogen peroxide generation in an underwater capillary discharge with a different geometry of the current conducting channel has been investigated. Measurement of H₂O₂ has been carried out by means of spectrophotometry with a reaction of ammonium metavanadate in an acid medium. It is found that an efficiency of hydrogen peroxide formation depends on input power dissipated in the discharge and on length of the capillary. It is shown that maximal rate of the hydrogen peroxide formation is 0.11 mmol/l·s with the equal capillary length of to the in-y 1 mm. The efficiency of H₂O₂ formation in 1 mm capillary decreases to 4.1 g/kW·h after a long treatine time by compare with 5 mm capillary (efficiency is 7,8 g/kW·h). A maximum yield of H₂O₂ in the capillary discharge is higher than in the traditional diaphragm one or in a glow discharge with electrolyte cathode. The maximum hydrogen peroxide yield amounts to 3.48 mol/F.