

## Оптимизация параметров резонансного источника высокого напряжения для питания генератора озона на поверхностном барьерном разряде

ЛЫСОВ Н.Ю.

*Приведены результаты моделирования процессов в озонаторе на поверхностном барьерном разряде на основании созданной компьютерной расчетной модели. Показано, что для корректной работы модели необходимо учитывать влияние значения напряжения на озонаторе на емкость диэлектрического барьера, участвующего в разряде. Показано влияние параметров высоковольтного трансформатора и дросселя на значение мощности, выделяемой в разряде. Приведено сравнение результатов моделирования с показателями работы реального озонатора. Даны рекомендации по созданию генераторов озона на поверхностном разряде и приведены оптимальные диапазоны величин элементов резонансных источников питания. Показано, что озонатор с поверхностным барьерным разрядом способен успешно решать задачи генерации озона из кислорода с концентрацией до  $60 \text{ г/м}^3$  при простоте конструкции и энергозатратах на уровне  $8\text{--}9 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ .*

Ключевые слова: генератор озона, поверхностный барьерный разряд

Использование поверхностного барьерного разряда для синтеза озона давно известно [1] и применяется, в том числе, и в промышленных масштабах [2]. К плюсам этой технологии стоит отнести относительную простоту разрядной ячейки (генератора озона), в которой отсутствует газовый зазор, высокие требования к значению и равномерности которого составляют одну из основных проблем при синтезе озона в объемном барьерном разряде. Существенным же минусом является более низкая по сравнению с объемным барьерным разрядом концентрация получаемого озона. Однако для большого числа технологических процессов высокие концентрации и не требуются, в частности, для самой массовой на сегодняшний момент сферы применения озона — подготовки питьевой воды [2]. Поэтому создание и оптимизация озонаторов с поверхностным барьерным разрядом является актуальной задачей.

При оптимизации параметров работы озонатора помимо различных модификаций конструкции, материалов генератора озона и соотношения их с объемом расхода рабочего газа невозможно обойтись без оптимизации параметров напряжения (формы, амплитуды и частоты) и способов его получения. Существует большое число работ, где подбирается оптимальный (по тому или иному показателю) режим совместной работы конкретного генератора озона с конкретным источником питания без изменения конструкции последнего.

В статье сформулирован принцип создания и расчета системы

«генератор озона — источник питания» с точки зрения оптимальности дальнейшей работы. В первую очередь оцениваются параметры резонансного источника синусоидального напряжения с сосредоточенным дросселем и преобразователем, работающим по полномостовой схеме на основе IGBT транзисторов.

За параметр оптимизации принималась мощность, которая выделялась в разряде при работе системы в резонансе. Также учитывались амплитуда и частота напряжения на генераторе озона и ток, протекающий через дроссель. Фактически оптимизировался коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора и значение индуктивности дросселя для работы их с конкретной электродной системой. Для этого в среде визуального моделирования процессов в электрических цепях была создана расчетная модель. На рис. 1 представлена схема замещения озонатора на поверхностном барьерном разряде.

В отличие от генераторов озона с объемным поверхностным разрядом, схема замещения которых давно и успешно моделируется, удачных моделей

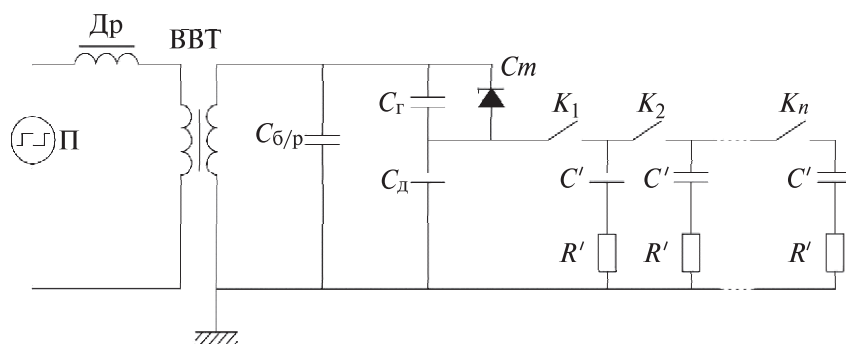


Рис. 1. Схема замещения озонатора на поверхностном барьерном разряде

поверхностного разряда найти не удалось из-за их особенностей: по мере развития разряда по поверхности емкость диэлектрического барьера увеличивается. По этой причине схема замещения этого разряда, в отличие от объемного, содержит постоянные и переменную емкости, значение последней зависит от амплитуды напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Емкость  $C_{б/р}$  (рис. 1) определяется площадью барьера, на которой невозможны разрядные процессы:

площадь, непосредственно «под» проволокой;  
площадь эмалированного электрода, где не выполняются условия самостоятельности разряда.

На остальной части эмалированного электрода протекают разрядные процессы. Эта часть моделируется двумя последовательными соединенными емкостями: ёмкостью газового зазора между высоковольтным электродом (проволокой) —  $C_г$ , и ёмкостью диэлектрика (эмали) —  $C_д$ . Ёмкость газового промежутка в момент зажигания и горения разряда шунтируется плазменным каналом. Шунтирующим элементом в схеме является тиристор ( $C_т$ ), прямое падение напряжения на котором определяется напряжением зажигания разряда.

Поскольку длина микроразрядов на поверхности эмали и, соответственно, площадь диэлектрического барьера, «включенная» в поверхностный барьерный разряд, зависят от приложенного напряжения [3], емкость  $C_д$  зависит от напряжения на высоковольтном электроде. На схеме это моделировалось посредством подключения емкостей  $C'$  после замыкания управляемых ключей  $K$ , срабатывающих при достижении амплитуды напряжения значения, определенного для каждого ключа. Резисторы  $R'$  моделируют сопротивление каналов поверхностных микроразрядов. При срабатывании всех ключей общая емкость барьера соответствовала емкости конденсатора с площадью обкладок, равной площади барьера, на которой мог развиваться разряд. Число  $n$  подключаемых элементов  $C'R'$  и, соответственно, шаг напряжения срабатывания ключей  $K$  определялись с учетом времени счета каждой отдельной модификации схемы. Наиболее оптимально схема работала при  $n=25$  параллельных ветвях с шагом напряжения срабатывания 150 В. Напряжение, при котором можно считать всю поверхность диэлектрического барьера покрытой разрядами, определялось из [3], рис. 2.

На вход высоковольтного трансформатора ВВТ через последовательно соединенную индуктивность  $L_{др}$ , моделировавшую дроссель  $D_r$ , от преобразователя П подавалось напряжение в виде меандра амплитудой 300 В. Мощность трансформатора и его

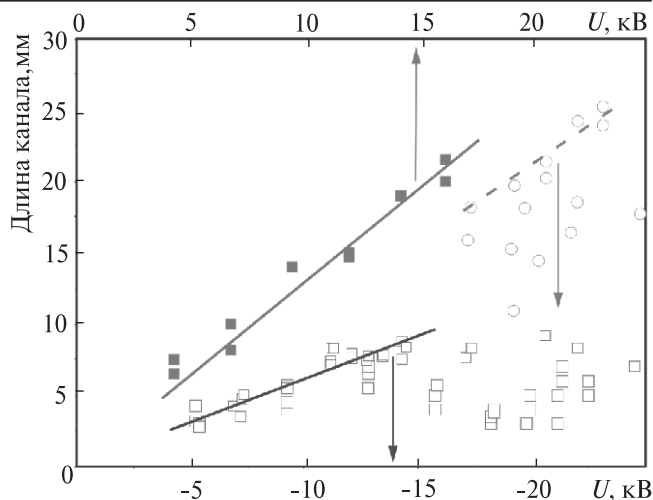


Рис. 2. Зависимость длины канала разряда от приложенного напряжения: ■ — положительная полярность; □ — отрицательная; ○ — то же при напряжении более 15 кВ

рабочая частота соответствовали параметрам счетного процесса или заведомо перекрывали их.

Корректность полученной расчетной модели определялась соответствием значений и формы получаемых токов и напряжений токам и напряжениям, характерным в реальных конструкциях.

Критерием оптимизации являлось получение требуемого значения активной мощности при нахождении основных параметров работы озонатора в разумных пределах. Эти пределы определялись параметрами комплектующих, используемых для создания реальных озонаторов (частота транзисторов, индукция насыщения сердечников моточных изделий, сечения проводников и т.д.), габаритами высоковольтных конструкций (трансформатор, вводы), физикой барьерного разряда и синтеза озона.

Для определения резонансной частоты при смене параметров цепи использовался генератор, подававший напряжение на вход схемы (меандр с плавно менявшейся частотой). При этом напряжение на вторичной стороне трансформатора было подобно приведенному на рис. 3.

Резонансная частота, найденная подбором частоты генератора постоянной частоты, соответство-

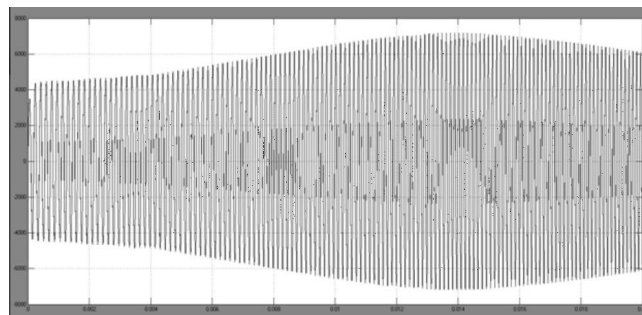


Рис. 3. Синтезированная осциллограмма напряжения на озонаторе (частота на левом «крае» осциллограммы 5,5 кГц, на правом — 8,0 кГц)

вала найденной от генератора переменной. Для корректного нахождения резонанса необходимо устанавливать достаточно медленное изменение частоты задающего генератора. На рис. 3 частота изменяется от 5,5 до 8,0 кГц в течение 20 мс.

Моделирование проводилось для генератора озона с поверхностным барьерным разрядом общей «активной» площадью 8 дм<sup>2</sup>; толщина диэлектрического барьера – 1 мм,  $\epsilon=8$ . Высоковольтный электрод – проволока диаметром 2 мм.

Для данного генератора озона были рассчитаны параметры элементов модели, а индуктивность дросселя принята 2,8 мГн. В табл. 1 приведены результаты моделирования подобной схемы при различных коэффициентах трансформации  $K_{тр}$ .

Под условной резонансной емкостью понимается емкость, рассчитанная по формуле

$$C^* = \frac{1}{4\pi^2 f_{рез}^2 K_{тр}^2 L_{др}}$$

Физически это общая, эффективная емкость, которая и определяет резонанс. Отличие этой емкости при малых напряжениях от практически постоянного значения при высоких объясняется тем, что при напряжениях ниже 5 кВ (выбрано из параметров предполагаемого шага намотки проволоки и данных о длине микроразрядов, рис. 2) в схеме сработали не все ключи К. В реальном озонаторе это означает, что не вся площадь барьера покрыта разрядами.

Целевой параметр оптимизации – активная мощность разряда проявляет монотонную зависимость от коэффициента трансформации (рис. 4): линейно нарастает с последующей стабилизацией значения мощности на уровне, близком 1800 Вт.

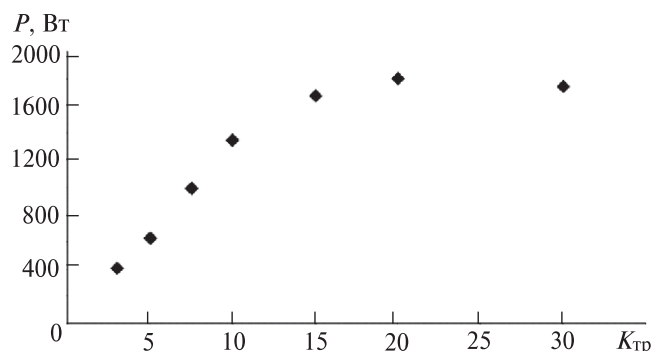


Рис. 4. Зависимость активной мощности разряда от коэффициента трансформации

Мощность разряда линейно нарастает до значений коэффициента трансформации порядка 10 ( $P = 133K_{тр}$ ). Амплитуды тока дросселя и напряжения на вторичной обмотке трансформатора практически линейно зависят от коэффициента трансформации (рис. 5). В таком случае стабилизация активной мощности разряда свидетельствует о том, что при значениях коэффициента трансформации 10÷15 и более разряд становится все более реактивной нагрузкой и фазовый угол между током и напряжением становится ближе к 90°, т.е. данный разряд характеризуется переменным значением  $\cos\varphi$  и это, возможно, объясняет то, что оценка мощности разряда путем перемножения действующих значений тока и напряжения в цепи преобразователя [4] может приводить к некорректным результатам.

Из полученных данных следует, что для достижения максимальной активной мощности разряда следует увеличивать коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора. Однако подобное увеличение эффективно лишь до определенных его значений и ведет к падению резонансной час-

Таблица 1

Коэффициент трансформации $K_{тр}$	Результаты расчета				
	Резонансная частота $f_{рез}$	Амплитудное значение		Мощность, выделяемая при резонансной частоте <sup>1</sup> $P_{рез}$ , Вт	Условная резонансная емкость $C^*$ , нФ
		вторичного напряжения $U_m$ , В	тока через дроссель $I_{др}$ , А		
3	23,2	2955	2,53	410	1,87
5	11,8	4250	3,8	630	2,60
7,5	7,2	7170	6,36	995	3,10
10	5,4	10610	9,25	1348	3,10
15	3,7	15440	13,51	1672	2,94
20	2,7	19600	17,02	1798	3,10
30	1,78	24758	21,45	1740	3,17

<sup>1</sup> Измерялась встроенными программными средствами.

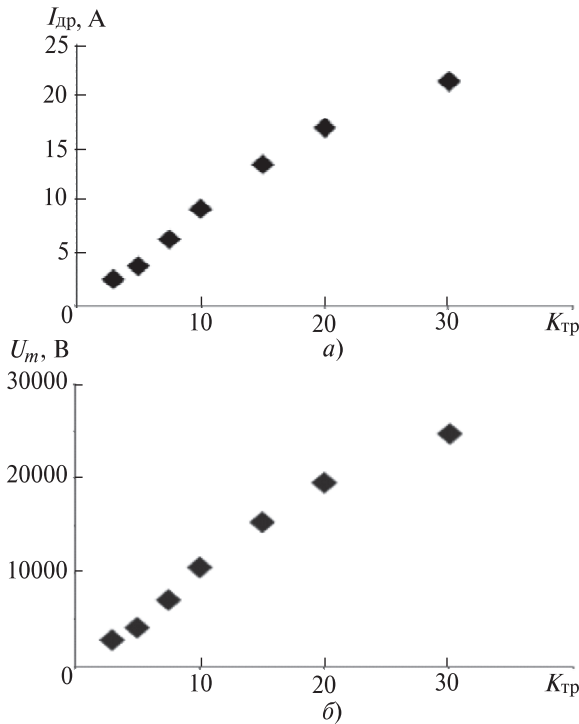


Рис. 5. Зависимость тока в дросселе (а) и напряжения на генераторе озона (б) от коэффициента трансформации при постоянной индуктивности дросселя

тоты и существенному (недопустимому) росту напряжения и тока.

Для уменьшения наблюдаемых негативных явлений были проведены расчеты при изменяющемся коэффициенте трансформации, но при постоянной резонансной частоте (в приведенном примере 7,2 кГц). Для удержания резонансной частоты при изменении коэффициента трансформации изменялось и значение индуктивности дросселя  $L_{др}$ . Результаты представлены в табл. 2

Видно, что изменение параметров трансформатора совместно с индуктивностью дросселя не оказывает влияния на максимально возможную мощность в разряде и на характер «насыщения схемы».

При этом значения тока, а особенно напряжения, остаются в пределах значений, доступных для реализации в реальных конструкциях. Также при низких значениях коэффициента трансформации для достижения необходимой резонансной частоты индуктивность дросселя должна быть экстремально большой, при высоких — маленькой.

При эксплуатации реальных озонаторов не стоит работать строго в резонансе, поскольку небольшие колебания параметров схемы в результате изменений температуры окружающей среды, параметров рабочего газа, давления в тракте и т.д. могут привести к «выпаданию из резонанса» и существенному изменению режима синтеза озона. Озонатор настраивают на рабочую частоту, на 10–15% превышающую резонансную, а выходную мощность регулируют скважностью работы преобразователя. При этом озонатор работает стабильно, а подобное отклонение от резонанса еще не вносит существенного влияния в тепловые режимы полупроводниковых элементов схемы. В случае, если регулирование скважностью недоступно, повышают рабочую частоту до тех пор, пока мощность разряда не достигнет необходимого значения. В табл. 2 приведены результаты расчетов, иллюстрирующие подобную настройку для мощности разряда 600 Вт при различных  $K_{тр}$ .

На рис. 6 представлены зависимости тока через дроссель и напряжения на генераторе озона при регулировании только коэффициента трансформации или пары «дроссель—трансформатор».

Из рис. 6 видно, что оптимизация пары «дроссель—трансформатор» по сравнению с оптимизацией только  $K_{тр}$  позволяет работать при существенно более низких напряжениях на всем диапазоне  $K_{тр}$  и схожих величинах тока в дросселе при  $K_{тр} \leq 10$ .

Результаты моделирования и их корректность проверялись на созданном озонаторе, генератор

Таблица 2

Коэффициент трансформации $K_{тр}$	Результаты расчета			
	Амплитудное значение		мощность, выделяемая при резонансной частоте $P_{рез}$ , Вт	индуктивность дросселя $L_{др}$ , мГн
	вторичного напряжения $U_m$ , В	тока через дроссель $I_{др}$ , А		
3,0	2787	0,69	97,6	30,2
5,0	4301	2,31	387	7,52
7,5	7170	6,36	995	2,80
10	9322	10,86	1495	1,58
15	10446	18,25	1809	0,70
20	10140	23,50	1677	0,39

Таблица 3

Коэффициент трансформации $K_{тр}$	Параметры схемы							
	Индуктивность дросселя $L_{др}$ , мГн	Рабочая частота $f_{раб}$ , кГц	Амплитудное значение		мощность разряда $P$ , Вт	Отношение		
			вторичного напряжения $U_m$ , В	тока через дроссель $I_{др}$ , А		$f_{раб}/f_{рез}$	$U_{рез}/U_m$	$P_{рез}/P$
При постоянном значении индуктивности дросселя								
5	2,8	12,9	4019	3,62	603	1,09	1,06	1,04
7,5	То же	9,25	4508	4,54	603	1,28	1,59	1,65
10	—	7,13	4990	5,46	600	1,32	2,13	2,25
15	—	4,9	6540	7,65	603	1,32	2,36	2,77
20	—	3,77	7740	9,58	598	1,40	2,53	3,01
30	—	2,59	9990	12,9	600	1,46	2,48	2,90
При переменном значении индуктивности дросселя								
7,5	2,80	9,25	4508	4,54	603	1,28	1,59	1,65
10	1,58	10,25	4303	6,47	602	1,42	2,47	2,24
15	0,70	11,8	4155	10,7	605	1,64	3,72	2,76
20	0,39	13,1	4003	14,92	601	1,82	4,90	2,99

озона которого представлял собой заземленную эмалированную трубу, на поверхность которой была намотана проволока, находившаяся под высоким напряжением. Заземленный электрод охлаждался проточной водой, высоковольтный—работал без принудительного охлаждения. Площадь разрядной зоны составляла 8 дм<sup>2</sup>. Параметры генератора озона (толщина диэлектрического барьера, диаметр и шаг намотки высоковольтного электрода, расстояние до газоограничивающего кожуха и т.д.) оптимизировались согласно требованиям и подходам [5, 6].

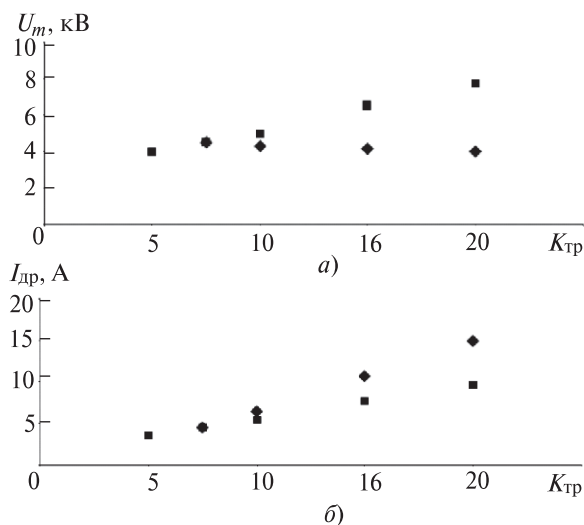


Рис. 6. Зависимость напряжения на генераторе озона (а) и тока в дросселе (б) при постоянной мощности разряда от коэффициента трансформации: ■ — при постоянной индуктивности дросселя; ◆ — при постоянной резонансной частоте

В качестве рабочего газа использовался баллонный кислород или кислород от медицинского концентратора. Расход кислорода измерялся с помощью поплавковых ротаметров.

Измерение концентрации вырабатываемого озона проводилось с помощью озономера «Медозон 245». Качество используемого кислорода (концентрация и влажность) определялось с помощью измерителей ПКГ-4 и ИВА-8 соответственно.

Коэффициент трансформации по результатам расчетов был выбран равным 7,5, индуктивность дросселя — 2,8 мГн. Эти значения соответствовали середине линейной части зависимости мощности разряда от  $K_{тр}$  и приемлемым значениям токов и напряжений.

Для работы с генератором озона был создан специальный блок питания, который позволял варьировать параметры разряда (частоту питания и мощность) изменением скважности преобразователя. Напряжение на генераторе озона регистрировалось с помощью специально созданных малоиндуктивных высоковольтных делителей, ток — с помощью «пояса Роговского» или токовых шунтов. Напряжение и ток регистрировались цифровым осциллографом Tektronix 3254. Мощность, выделяемая в газовом разряде, измерялась прямым интегрированием произведения кривых напряжения и тока. Поскольку водой охлаждался только заземленный электрод, потери в воде отсутствовали, и получаемая мощность относилась только к разряд-

ному процессу. Подробно процесс измерения мощности описан в [7].

Измерения показали, что при выбранных параметрах источника питания резонансная частота составила 8 кГц (у модели 7,2 кГц), амплитуда напряжения на генераторе озона 6,3 кВ (у модели 7170 В), ток через дроссель — 7,5 А (у модели 6,36 А), при этом мощность — 930 Вт (у модели 995 Вт). Расхождения в результатах объясняются неидеальностью конструкции и модели, но находятся на вполне допустимом уровне.

По результатам серии измерений с различными параметрами были получены кинетические кривые синтеза озона, которые практически не отличаются от таких же в объемном барьерном разряде (рис. 7): линейное нарастание концентрации озона с ростом удельного энергозатрата в разряд с выходом на концентрацию насыщения (стационарная концентрация озона) при значении плотности энергии более 100 Вт·мин/л.

Предельные энергозатраты на синтез озона, рассчитанные по линейной части кинетической кривой, получаются порядка 8—9 кВт·ч/кг озона, что соответствует уровню энергозатрат озонаторов ведущих мировых производителей. Стационарная концентрация озона в этом генераторе озона достигает значений порядка 100 г/м<sup>3</sup>, что ниже показателей, демонстрируемых озонаторами на объемном барьерном разряде.

Производительность исследуемого озонатора представлена на рис. 8. Кривые на этом рисунке имеют обычный вид: производительность минимальна при небольших расходах кислорода, растет и выходит на насыщение с его ростом, т.е., производительность озонатора становится максимальной на линейной части кинетической кривой синтеза озона (рис. 8). Линейный участок кинетической

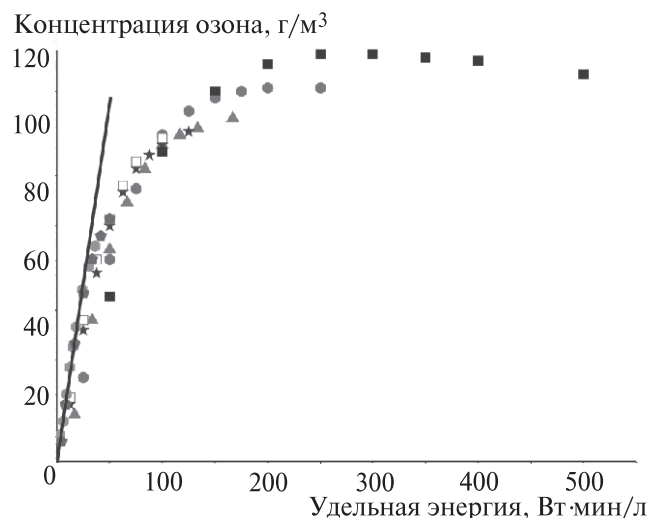


Рис. 7. Кинетическая кривая синтеза озона в поверхностном барьерном разряде: ■ — расход 1,0 л/мин; ● — 2,0; ▲ — 3,0; ★ — 4,0; ◆ — 12,0; ◆ — 16,6

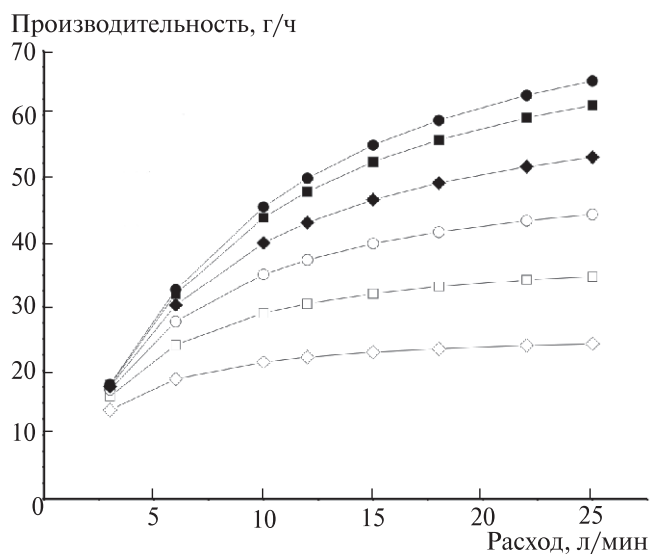


Рис. 8. Зависимость производительности озонатора на поверхностном барьерном разряде от расхода кислорода: ◇ — мощность 200 Вт; □ — 300; ○ — 400; ◆ — 500; ■ — 600; ● — 650

кривой генератора озона заканчивается при концентрации озона порядка 50—60 г/м<sup>3</sup>. Такой концентрации озона вполне достаточно для большинства технологических процессов [2]. При необходимости концентрацию озона можно увеличить до 100 г/м<sup>3</sup>, но производительность генератора озона при этом снизится (рис. 7 и 8).

Таким образом, увеличивая расход кислорода, можнократно увеличить производительность озонатора, но необходимо учесть следующее:

при концентрации озона ниже 50—60 г/м<sup>3</sup> производительность достигает предельного значения;

при больших расходах кислорода возможен существенный рост давления в генераторе озона, что приводит к необходимости повышения напряжения на генераторе озона и к дополнительным требованиям к механической прочности разрядной ячейки.

Кроме того, большие расходы кислорода увеличивают габариты и стоимость кислородного оборудования.

Стационарная концентрация озона в соответствии с результатами [8] зависит от средней температуры в разрядной зоне. Для созданного озонатора эта зависимость приведена на рис. 9.

Наблюдается падение стационарной концентрации озона примерно на 1 г/м<sup>3</sup> на каждые 2 °С подъема температуры. Как правило, озонаторы работают в режиме максимальной производительности, которая достигается на линейной части кинетической кривой рис. 7. Концентрация озона в этом режиме не превышает 50—60 г/м<sup>3</sup> и не зависит от температуры в разрядной зоне.

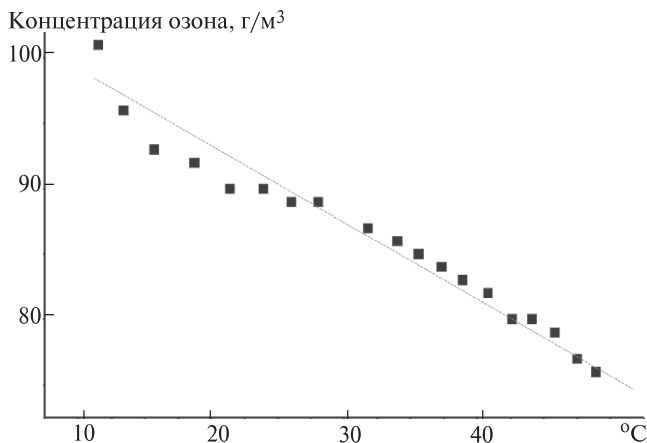


Рис. 9. Температурная зависимость значения стационарной концентрации от температуры в поверхностном барьерном разряде

**Выводы.** 1. Корректное моделирование процессов в озонаторах с поверхностным барьерным разрядом возможно при введении в схему замещения озонатора переменной емкости диэлектрической поверхности, значение которой зависит от напряжения на высоковольтном электроде. Результаты такого моделирования удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными.

2. Созданная модель озонатора с поверхностным барьерным разрядом позволяет подобрать оптимальные значения коэффициента трансформации высоковольтного трансформатора и индуктивности дросселя исходя из значения требуемой мощности разряда. Проведенные расчеты показывают, что оптимальные результаты получаются при коэффициенте трансформации от 5 до 10. В этом случае трансформатор остается оптимальной конструкцией, а амплитуды тока в первичной цепи и напряжения во вторичной цепи не превышают ра-

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 10, pp. 28–35.*

зумных пределов по электрической прочности как трансформатора, так и транзисторов в полномостовой схеме.

3. Созданный по результатам моделирования озонатор на поверхностном разряде способен успешно решать задачи генерации озона «невысоких» (до 60 г/м<sup>3</sup>) концентраций при простоте конструкции и высокой надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siemens W. Poggendoras Annalen der Chemie und Physik, 1857, 102, p. 66.
2. Loeb B.L., Thompson C.M., Drago J, Takahara H., Baig S. Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review. Ozone: Science & Engineering, Paris, 2011, vol. 34.
3. Saveliev A., Pietsch G.J. Some properties of barrier discharges on dielectric surfaces. — Gas discharge conference. Liverpool, 2—6 September 2002.
4. Гордеева Е.А., Пуресев Н.И., Тарасов Ю.В., Назаров Ю.А. Об условиях эффективного получения высоких концентраций озона в озонаторах с барьерным разрядом. 32-й всероссийский семинар «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». — М., 2012, с. 41—58.
5. Hoskinson A. Measurements and Simulations of Surface Dielectric Barrier Discharges as Plasma Actuators. — Madison, Wisconsin, 2012.
6. Лысов Н.Ю., Пашин М.М. Энергетические характеристики синтеза озона в поверхностном и объемном барьерном разряде. — Электричество, 2011, № 11, с. 43—46.
7. Пашин М.М., Лысов Н.Ю. Измерение энергозатрат в озонаторах с объемным барьерным разрядом. — Электричество, 2011, № 12, с. 21—26.
8. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. — М.: Изд-во МГУ, 1987, 236 с.

*Автор: Лысов Николай Юрьевич окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ (ТУ) — ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ») в 2008 г. Старший преподаватель НИУ «МЭИ», начальник отдела высоковольтных материалов и технологий Всероссийского электротехнического института.*

## Optimization of Parameters of High Voltage Resonant Power Source for Ozone Generator with Surface Barrier Discharge

LYSOV Nikolay Yur'yevich (National Research University «Moscow» Power Engineering Institute», Moscow, Russia) — Senior Lecturer

*Results of simulating the processes in the ozonator with surface barrier discharge are presented based upon the computational simulation model. It is discovered that correct model operation requires considering the effects of ozonator voltage value on capacity of the dielectric barrier involved in discharge. Effects of parameters of high voltage transformer and reactor on the level of power emitted at discharge are presented. Comparison of simulation results with the real ozonator performance is presented. Recommendations for creation of ozone generators with surface discharge are provided and optimum value ranges for resonant power source elements are listed. It is demonstrated that ozonator with surface barrier discharge can be effectively used for generating ozone from oxygen with concentration up to 60 g/m<sup>3</sup> and is characterized by the simplicity of design and energy efficiency at the level of 8–9 kWh/kg.*

**Key words:** ozone generator, surface barrier discharge