

функциями угла между напряжениями, что и использовалось при получении результатов численных примеров.

**Выводы.** 1. Понятие натуральной мощности должно базироваться только на равенстве генерируемой и потребляемой ВЛ реактивной мощности, определяемой по уточненным формулам. При таком определении понятие натуральной мощности становится многозначным, зависящим от конкретного режима ВЛ. Кроме того, значение натуральной мощности разное для начала и конца ВЛ.

2. Определение значения максимальной передаваемой активной мощности ВЛ возможно только из решения уравнений:  $dP_1 / dd = 0$ ,  $dP_2 / dd = 0$ . При этом появляются два понятия максимальной мощности: для передающего и принимающего конца.

3. Максимальное значение КПД ВЛ не совпадает с передачей натуральной мощности и также является понятием многозначным, зависящим от значения передаваемой активной мощности.

4. Приведенные уточнения не исключают использование в учебном процессе упрощенных понятий, но с обязательным последующим уточнением.

5. Уточнения возможно будут полезны при расчете предельных режимов, средств противоаварийного управления.

\* \* \*

## Измерение энергозатрат в озонаторах с объемным барьерным разрядом

ПАШИН М.М., ЛЫСОВ Н.Ю.

*Проанализированы методы определения верхней и нижней границ мощности, потребляемой генератором озона, и дана их сравнительная характеристика. Минимальное значение энергозатрат в реальном озонаторе с объемным барьерным разрядом оценивается примерно 6 Вт·ч/г при работе на кислороде.*

**Ключевые слова:** озонаторы, потребление мощности, методы определения

При совершенствовании конструкции озонаторов промышленного назначения основное внимание уделяется снижению энергозатрат – количества энергии, затраченной на синтез озона. Следует сразу определиться с терминологией. Иногда энергозатратами считают количество энергии, потребляемой озонаторной установкой от сети питания. Это экономический показатель, и о нем здесь речь не идет. При электрофизическом анализе синтеза озона значение энергозатрат вычисляется из баланса энергии, необходимой на реализацию физи-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляков Ю.С.** Методика расчета параметров электрической сети, представленной многополюсниками. – Электричество, 1994, № 2.
2. **Нейман Л.Р., Калантаров П.Л.** Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Теория цепей переменного тока. – М.; Л.: ГЭИ, 1954.
3. **Аржаников Е.А., Чухин А.М.** Автоматизированный анализ аварийных ситуаций энергосистем. – М.: НТФ Энергопресс, 2000.
4. **Веников В.А.** Дальние электропередачи. Специальные вопросы. – М.; Л.: ГЭИ, 1960.
5. **Александров Г.Н.** Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учеб. для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

[31.03.11]

*Автор: Беляков Юрий Сергеевич в 1958 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию «Моделирование элементов электрических систем для противоаварийного управления» в Санкт-Петербургском политехническом университете. Доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энергоснабжения Петрозаводского государственного университета.*

*Methods for determining the upper and lower limits of power consumed by an ozone generator are analyzed and their comparative characterization is given. The minimal energy expenditures in a real ozonizer with bulk barrier discharge are estimated at around 6 Wh/g during operation on oxygen.*

**Key words:** ozonizer, power consumption, determination methods

ко-химических реакций в кинетическом процессе синтеза. Это минимальные энергозатраты. В статье речь идет об энергозатратах, определяемых как

$$\mathcal{E}_0 = \frac{P}{CV} \text{ Вт·ч/г}, \quad (1)$$

где  $P$  – активная электрическая мощность, потребляемая генератором озона (ГО), Вт;  $C$  – концентрация озона, г/м<sup>3</sup>;  $V$  – расход рабочего газа, м<sup>3</sup>/ч.

Эта величина объективно характеризует совершенство конструкции ГО и оптимальность режима его работы.

Теоретическая оценка энергозатрат проводилась многими авторами в разных приближениях. Результаты обобщения приведены в [1]. Сегодня можно считать это значение равным 2,1 Вт·ч/г при синтезе озона из кислорода. Разрозненные и немногочисленные результаты экспериментальных исследований лежат в диапазоне от 4 до 15 Вт·ч/г [1–3]. На наш взгляд, такая картина наблюдается из-за несовершенства и неточности использованных методов измерения мощности, потребляемой ГО.

В статье рассматривается получение достоверных результатов по энергозатратам в ГО и сравниваются методы измерения мощности  $P$  при работе с ГО различной конструкции и производительности в различных режимах эксплуатации.

*Отработка методов измерения мощности.* Измерения мощности проводились тремя методами:

1) путем интегрирования произведения мгновенных значений напряжения  $u(t)$  на зажимах ГО и тока  $i(t)$  через него за определенный промежуток времени  $T$  (например период изменения напряжения) – метод ИНТ:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt;$$

2) по площади вольт-кулонной характеристики (ВКХ) ГО (параллелограмма потерь Мэнли [4]) – метод ПЛМ:

$$P = \frac{S}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \frac{dq}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt,$$

где  $S$  – площадь ВКХ;  $u(t)$ ,  $i(t)$  и  $q(t)$  – изменение напряжения, тока и заряда ГО соответственно;

3) по количеству тепла, отводимого системой водяного охлаждения ГО (проточная калориметрия [5]) – метод ПКМ:

$$P = c_m m_0 Dt,$$

где  $c_m$  и  $m_0$  – удельная теплоемкость и массовый расход воды;  $Dt$  – перепад температуры воды на входе и выходе ГО.

Отработка методов измерения мощности проводилась на стенде, включавшем в себя высоковольтный источник питания, ГО с системами охлаждения и газоснабжения и средства измерений. Принципиальная электрическая схема стенда показана на рис. 1,а конструкция ГО – на рис. 1,б.

Источник питания (ИП) состоит из преобразователя П, резонансного дросселя Др и высоковольтного трансформатора ВВТ. Схема обеспечивает диапазон изменения частоты выходного синусоидального напряжения 5–50 кГц, амплитуды 0–10 кВ; мощность источника 1 кВт.

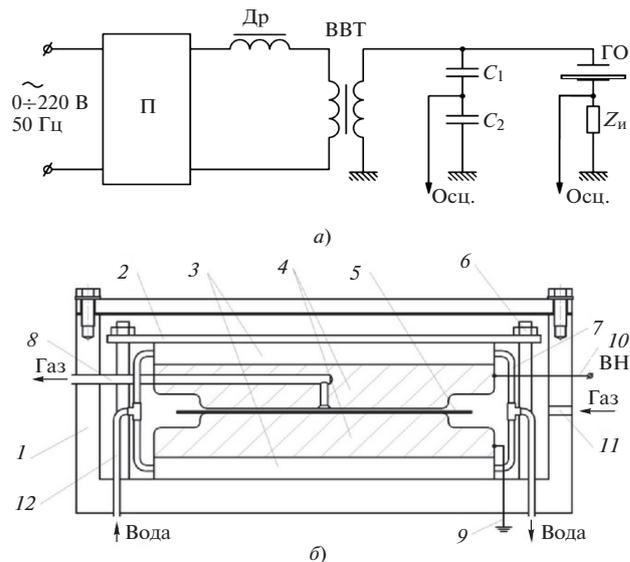


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема измерения мощности (а) и эскиз генератора озона (б)

Электроды ГО служат два диска 4 (рис. 1,б) из нержавеющей стали. Рабочий (активный) диаметр равен 76 мм, края скруглены с  $R \gg 5$  мм. В верхнем электроде для выхода озono-кислородной смеси предусмотрен канал 8. Каждый из электродов снабжен эффективным пластинчато-ребристым теплообменником 3, через который проходит охлаждающая вода. Охлаждение для удобства осуществляется параллельно: вода подходит и отходит от теплообменников высоковольтного и заземленного электрода по полиуретановым шлангам диаметром 4 мм, которые попарно соединены между собой на расстоянии 1 м от теплообменников. Сопrotивление постоянному току столба воды, разделяющего электроды,  $R = 4 \cdot 10^6$  Ом. Диэлектрический барьер 5 из высококачественной пластины прессованного оксида алюминия (96%) толщиной 0,63 мм и диаметром 120 мм плотно прижат к нижнему электроду посредством теплопроводящей пасты КПТ-8. Верхний (высоковольтный) электрод располагается на расстоянии  $0,35 \pm 0,03$  мм от диэлектрического барьера. Равномерность газового зазора обеспечивалась тремя диэлектрическими (стеклянными) проставками диаметром 5 мм. Электродная система стягивалась тремя диэлектрическими шпильками 6. Вся конструкция помещалась внутрь герметичной камеры из капролона 1. Диаметр камеры 300 мм, высота 200 мм, толщина стенки 20 мм. Рабочий газ с концентрацией кислорода не менее 97% подается в камеру через отверстие в боковой стенке от концентратора кислорода типа ОХУ-6000. Расход кислорода измерялся поплавковым ротаметром, а концентрация озона приборами ВМТ 961 фирмы Ozonia и 245/5 Медозон. Высокое напряжение подавалось на верхний электрод, нижний

заземлялся через измерительное сопротивление  $Z_{и}$ . Делитель высокого напряжения  $C_1-C_2$  подключался к входу осциллографа через согласующий резистор  $R=50$  Ом.

Особое внимание было уделено измерению тока и напряжения в схеме рис. 1,а, так как речь идет об осциллографировании в наносекундном диапазоне с последующей цифровой обработкой сигналов. Для регистрации и обработки сигналов использовались два осциллографа фирмы Tektronix TDS 3012 В и TDS 7154 В, позволявшие регистрировать сигналы с частотой дискретизации до 20 ГГц в аналоговой полосе частот до 1,5 ГГц. Для осциллографирования тока в качестве  $Z_{и}$  использовались миниатюрные малоиндуктивные коаксиальные шунты, собранные из шести металлодиэлектрических резисторов. Сопротивление шунтов от 2 до 3 Ом. Для оценки полосы воспроизводимых частот проводилось осциллографирование стандартного импульса тока от генератора наносекундных импульсов типа Г5-56. Характерная осциллограмма сигнала и реакции шунта на импульс длительностью около 20 нс показаны на рис. 2.

Измерения свидетельствуют о полном соответствии амплитудно-временных характеристик таких шунтов характеру необходимых измерений.

Для осциллографирования высокого напряжения на электродах ГО применялся емкостный делитель  $C_1-C_2$ , верхним плечом которого был импульсный малоиндуктивный керамический конденсатор типа КВИ-1 (3,3 пФ; 10 кВ) с максимально укороченными выводами. Для уменьшения индуктивности нижнего плеча  $C_2$  оно изготовлялось аналогично шунту из шести миниатюрных керамических конденсаторов, объединенных в коаксиальную конструкцию и соединенных с жилой сигнального кабеля ( $Z=50$  Ом) через резистор сопротивлением 50 Ом. Аналогичная конструкция малоиндук-

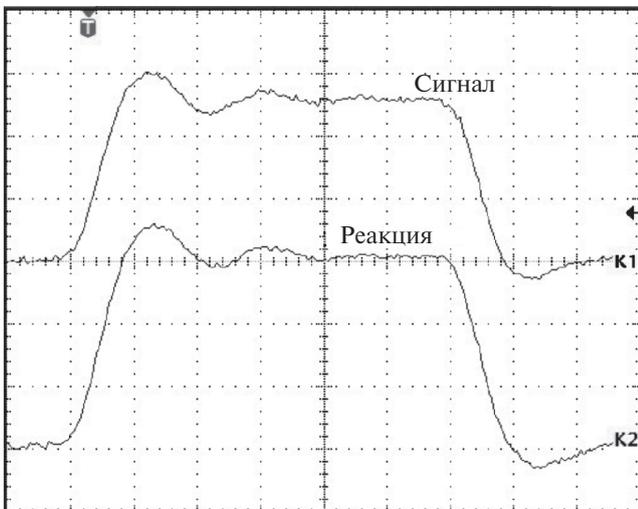


Рис. 2. Осциллограмма, иллюстрирующая градуировку шунта

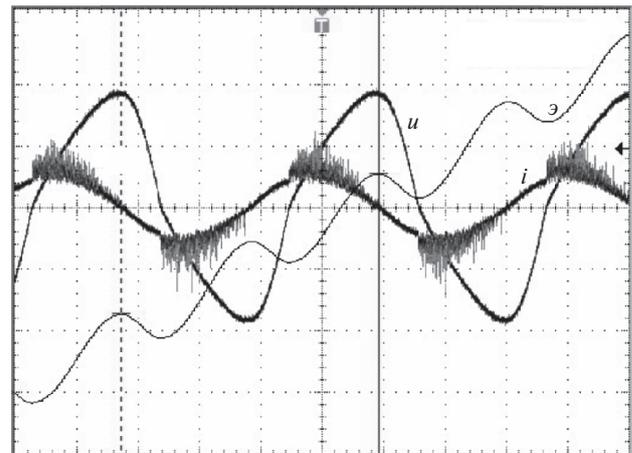
тивного конденсатора использовалась и в качестве  $Z_{и}$  при измерении заряда в методе ПЛМ. Емкость конденсатора от 0,05 до 0,2 мкФ.

Для оценки частотной характеристики делитель  $C_1-C_2$  испытывался аналогично шунту на воспроизводимость прямоугольного наносекундного импульса от генератора Г5-56. Так же, как и при градуировке резистивного шунта (рис. 2), измерения показали полное соответствие амплитудно-временных характеристик делителя.

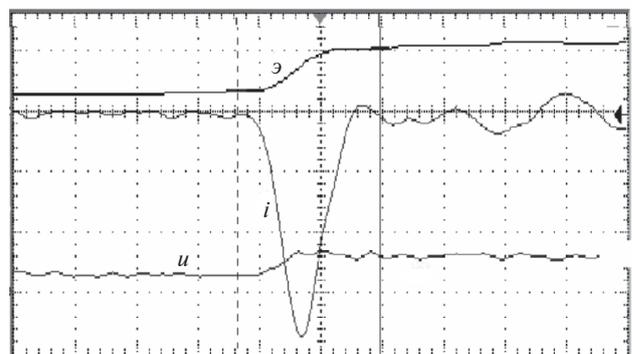
Значение коэффициента деления определялось при сопоставлении результатов измерения высокого напряжения амплитудой до 2,5 кВ совместно с делителем НР-9258 ( $f \leq 250$  МГц).

В качестве примера на рис. 3 показаны типичные осциллограммы изменения напряжения  $u(t)$ , тока  $i(t)$  и энергии  $\varepsilon(t)$ , получаемые при измерениях.

При измерении площади параллелограмма потерь в методе ПЛМ для ГО большой производительности ( $>200$  г/ч) особых трудностей не возникает (рис. 4,а). Для ГО небольшой производительности ( $<20$  г/ч) стороны параллелограмма, соответствующие горению разряда, имеют характерные ступеньки (рис. 4,б) со сложной траекторией  $q(u)$



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы напряжения  $u$ , тока  $i$  и энергии  $\varepsilon$ : а — за период изменения напряжения  $T=42$  мкс; б — за время 46,4 нс, соответствующее длительности одного микроарзряда

между ними. В обоих случаях вычисление площади проводилось по специально разработанной программе в среде Matlab с использованием цифровой информации осциллографа.

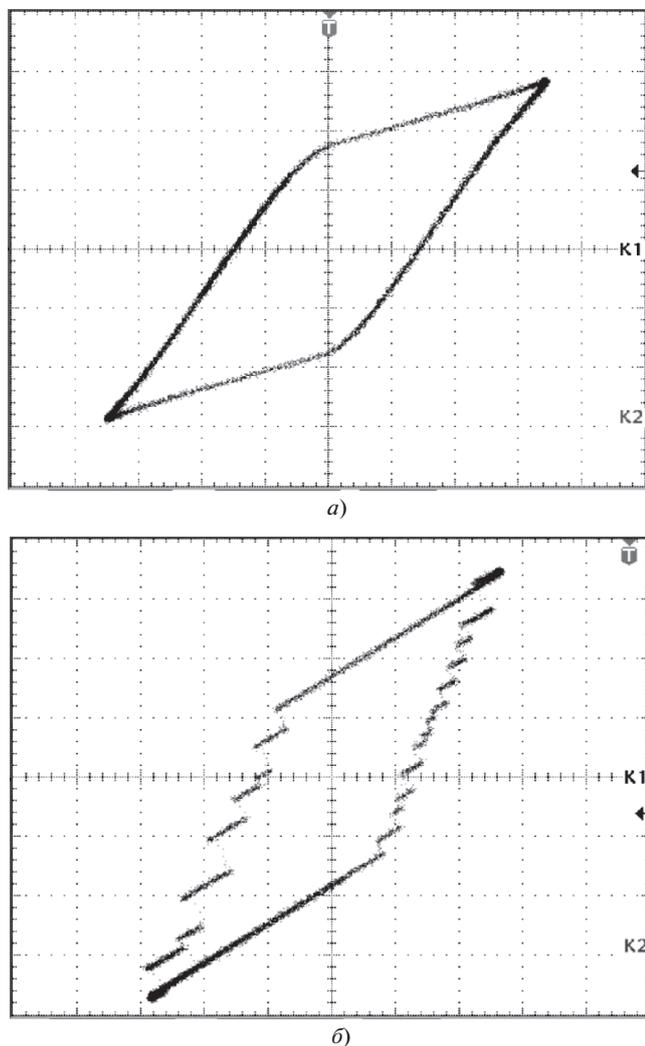


Рис. 4. Осциллограммы (в режиме  $X-Y$ ) вольт-кулонной характеристики ГО с площадью электродов 2 м (а) и 0,45 дм<sup>2</sup> (б)

Температура охлаждающей воды на входе и выходе ГО для метода ПКМ измерялась цифровыми термометрами Velleman DTP 1, установленными максимально близко к корпусу ГО. Расход воды измерялся мерной емкостью. Разность температуры воды на входе и выходе была в среднем около 5 °С. Цифровые термометры чувствительны к электромагнитным помехам, неизбежным при их использовании вблизи работающего ГО. Во избежание этого они должным образом экранировались. Для проверки надежности экранирования проводилось сопоставление результатов их измерений с показаниями ртутных дублирующих термометров с ценой деления 0,1°С с учетом временных реакций термометров на изменение мощности, рассеиваемой внутри ГО. По результатам контрольных измерений разница показаний составила менее 1%.

На рис. 5,а приведены результаты измерений, выполненных тремя методами, в виде зависимостей концентрации озона от удельной мощности, рассеянной в ГО при частоте питающего напряжения 32 кГц. Результаты, полученные методами ИНТ и ПЛМ, практически совпадают, что логично, поскольку в обоих случаях измеряется одно и то же в одной точке схемы. Метод ПКМ дает результат на 10–15% ниже, по-видимому из-за неучета мощности, затрачиваемой на реакцию синтеза озона.

Зависимости рис. 5 дают своеобразную «вилку», внутри которой находятся истинные энергозатра-

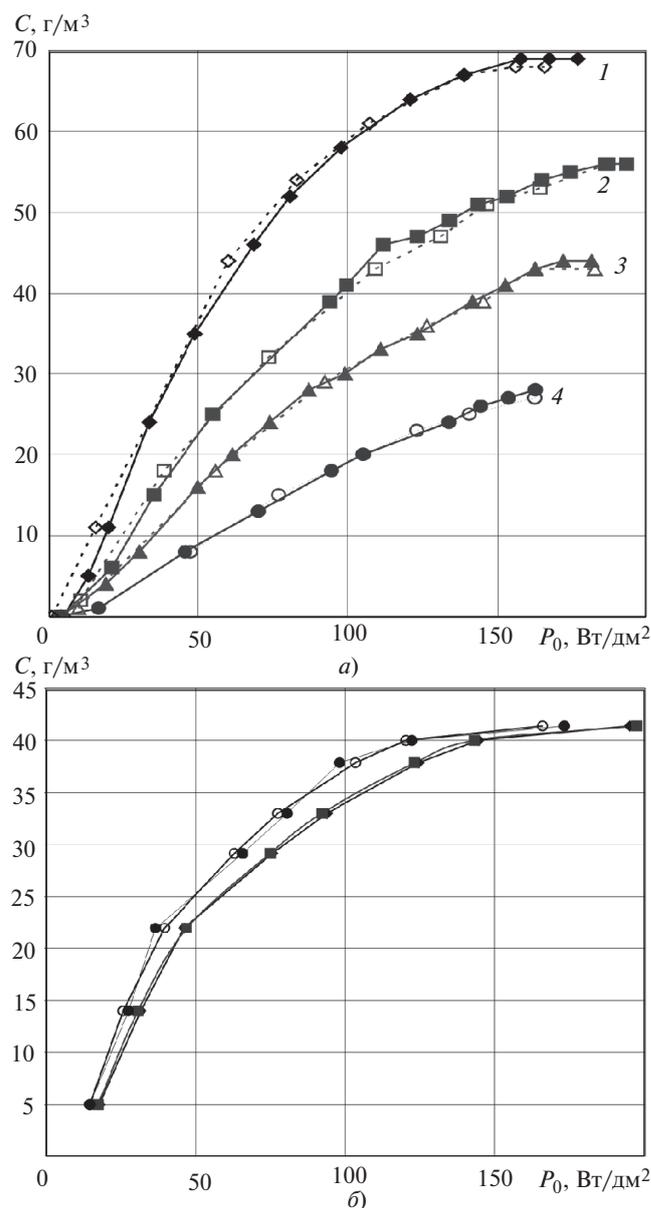


Рис. 5. Зависимости концентрации озона от удельной мощности: а – при различном расходе кислорода  $V$ : 1 –  $V=1$  л/мин; 2 – 2 л/мин; 3 – 3 л/мин; 4 – 5 л/мин (в зависимости  $C$  от  $P/V$  все точки 1–4 ложатся практически на одну кривую); б – полученные тремя методами при расходе кислорода 3 л/мин: ◆ – метод ИНТ (расход воды 3 л/мин); ■ – метод ПЛМ (расход воды 3 л/мин); ● – ПКМ (расход воды 1,05 л/мин); ○ – МПК (расход воды 0,63 л/мин)

ты, и предпочтение тому или иному методу следует отдавать в зависимости от конкретных целей измерений.

При оценке метода ИНТ и метода ПЛМ следует иметь в виду, что они принципиально дают несколько большую по сравнению с рассеянной в межэлектродном пространстве ГО мощность по двум причинам. Первая заключается в том, что ни тот, ни другой не позволяют измерить истинное значение тока в канале микрозаряда или заряда, перенесенного им. Значение постоянной времени  $t = L/r_k$  ( $L$  – суммарная индуктивность ИП, приведенная к стороне высокого напряжения,  $r_k \gg 10^5$ – $10^6$  Ом – сопротивление канала микрозаряда) изменения тока микрозаряда в цепи ИП составляет более 100 нс при средней длительности импульса около 20 нс. Поэтому заряд в канале единичного микрозаряда поступает в основном от межэлектродной емкости ГО ( $C_3$ ), а ток в канале замыкается током смещения через  $C_3$ , а не через  $Z_{и}$ . Напряжение на  $C_3$  падает, и через измерительный элемент  $Z_{и}$  протекает ток зарядки  $C_3$ : кратковременный импульс от паразитной емкости высоковольтного электрода и ошинок относительно земли и более длинный «хвост» от ИП с постоянной времени  $t$ . Этим и обусловлен своеобразный вид сторон параллелограмма на рис. 4,б, когда отдельные микрозаряды четко разделены во времени. Таким образом, ГО является типичным представителем систем «накачки» электрического разряда через емкостный накопитель ( $C_3$ ) [6]. Минимальный КПД такой системы, как известно, равен 50% и приближается к 100% [7] при стремлении потребляемой мощности к постоянной, т.е. при увеличении частоты следования микрозарядов рис. 4,а, что, по нашему мнению, является второй причиной превышения значения измеренной мощности над значением реальной. Поэтому оба эти метода дают верхнюю границу энергозатрат с тем большим завышением, чем меньше частота повторения микрозарядов.

На рис. 6,а представлена зависимость энергозатрат от концентрации озона, полученная обработкой результатов измерений, приведенных на рис. 5,а.

Рост концентрации достигался увеличением подводимой к ГО мощности  $P_0$ . Это приводит к повышению температуры газа в межэлектродном промежутке, интенсифицирует процесс разложения озона и, как следствие, ведет к росту энергозатрат. Рост энергозатрат в области малых концентраций не связан с кинетикой образования и разложения озона. Дело в том, что измеряемая мощность содержит помимо мощности, рассеиваемой в разрядном промежутке, еще и мощность «паразитных»

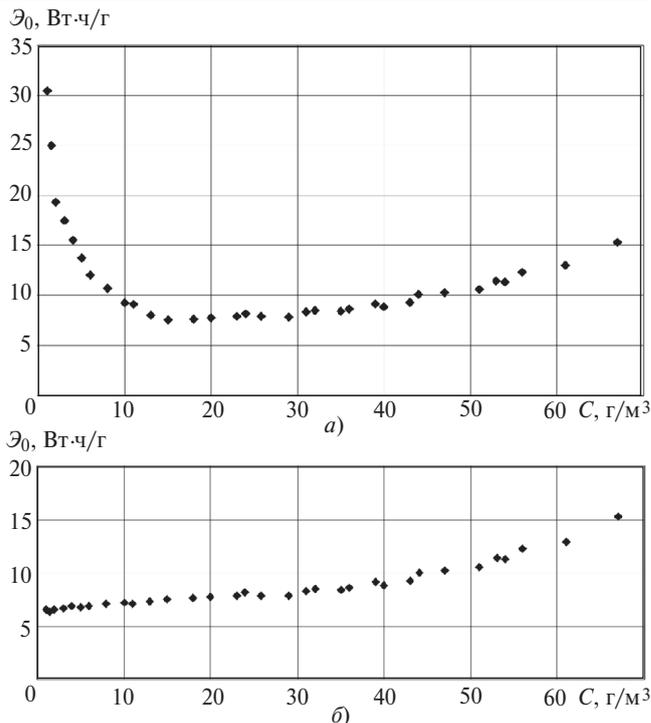


Рис. 6. Зависимость энергозатрат от концентрации озона: без учета внутренних потерь в ГО (а) и с их учетом (б)

потерь в диэлектрике барьера, электродах и т.п. Уменьшение концентрации достигалось снижением напряжения, приложенного к ГО. При приближении его значения к значению напряжения зажигания разряда концентрация озона и знаменатель в (1) стремятся к нулю, а числитель (мощность потерь) – хоть и к малому, но конечному значению, поэтому  $\mathcal{E}_0 \rightarrow \infty$  при  $C \rightarrow 0$ .

«Паразитные» потери нетрудно исключить при построении зависимости  $\mathcal{E}_0 = f(C)$ . Для этого измерялись их значения в зависимости от напряжения вплоть до напряжения зажигания разряда  $U_3$ , результат экстраполировался в область  $U > U_3$  и вычитался из результатов измерений, приведенных на рис. 6,а. Скорректированная таким образом зависимость энергозатрат от концентрации показана на рис. 6,б. Она интересна тем, что дает представление о минимальном значении энергозатрат в озонаторе с объемным барьерным разрядом. Напомним, что по теоретической оценке это значение составляет примерно 2,1 Вт·ч/г. Полученное значение 6 Вт·ч/г неплохо согласуется с результатом экстраполяции в область  $C \rightarrow 0$  данных, полученных [3] на опытно-промышленном озонаторе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В.В., Карягин Н.В., Ткаченко С.Н., Самойлович В.Г. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов. – М.: МАКС Пресс, 2008.
2. Kogelschatz U. Industrial ozone generation: Historical perspective, current status and future prospects. – 17th World Ozone Congress, Strasbourg, 2005.

3. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. – М.: Изд-во МГУ, 1987.
4. Manley T.C. The electrical characteristics of the ozonator discharge. – Trans. of the electrochemical society, 1943. vol. 84.
5. Хеммингер, Хене Г. Калориметрия. Теория и практика.– М.: Химия, 1990/
6. Mostov P., Neuringer J., Rigney D. Optimum charging efficiency for space system. – Proc. IRE, 1961, vol. 49, №5/
7. Полищук Ю.А. Исследование системы заряда емкостного накопителя в режиме постоянной мощности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1969.

[31.03.11]

*Авторы: Пашин Михаил Михайлович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Техника высоких напряжений». Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*

*Лысов Николай Юрьевич окончил институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2008 г. Научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*