

УДК 615.83:661.94

doi:10.20998/2413-4295.2019.10.15

ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ В РОЗРЯДНІЙ КАМЕРІ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНУ

М. В. МАХОНИН

Кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: nikalas1990@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті розглядаються хімічні процеси, що відбуваються в розрядному проміжку розрядної камери генератора озону під час процесу синтезу. Наведено основні хімічні реакції, які відповідають за розпад молекулярного кисню під дією розряду, синтезу озону та його розпаду. Літературний аналіз джерел показав, що існує велика кількість цих хімічних реакцій, основними є три реакції. Наведені константи швидкості цих реакцій. Обґрунтовано вплив температури на концентрацію озону в озono-кисневій суміші. Показано, що при зростанні температури значно збільшується швидкість групи реакцій, яка відповідає за синтез молекулярного кисню із атомарного, натомість, зменшується швидкість реакцій, які відповідають за синтез озону. Проведено дослідження впливу течії хімічних реакцій на параметри електричної енергії, яка живить розрядну камеру під час роботи генератора озону. Доведено, що робоча частота змінної напруги не повинна перевищувати значення у 20 кГц, бо це призведе до зниження отримуваної концентрації озону. Дослідження параметрів газу у розрядному проміжку визначалася за допомогою застосування методу репрезентативного елементарного об'єму, який дозволив розбити розрядний проміжок на квазістаціонарні по концентраціях об'єми. Описані процеси, що відбуваються між цими елементарними об'ємами під час синтезу озону, а також розглянуті процеси дифузії та визначена швидкість дифузії між двома дотичними елементарними об'ємами з різною концентрацією озону.

Ключеві слова: генератор озону; концентрація озону; озono-киснева суміш; синтез озону; розрядна камера; репрезентативний елементарний об'єм.

CHEMICAL PROCESSES IN THE DISCHARGE CHAMBER OF AN OZONE GENERATOR

М. МАХОНІН

Industrial and biomedical electronics department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The aim of this work was to study the effect of chemical reactions occurring in the discharge chamber of an ozone generator on the concentration of oxygen and ozone when working with medical oxygen as a working gas. This will allow to adjust the parameters of the electrical energy that the discharge chamber feeds for more efficient ozone generation. The article deals with the chemical processes that occur in the discharge gap of the discharge chamber of an ozone generator during synthesis. The main chemical reactions that are responsible for the decay of molecular oxygen under the influence of a discharge, ozone synthesis and its decay are presented. Literature analysis of the sources showed that there are a large number of such chemical reactions, the main are three reactions. The given rate constants of these reactions. The effect of temperature on the concentration of ozone in the ozone-oxygen mixture is justified. It was shown that with increasing temperature, the speed of the reaction group, which is responsible for the synthesis of molecular oxygen from atomic oxygen, significantly increases, and vice versa, the rate of reactions that are responsible for the synthesis of ozone decreases. A study was made of the influence of the course of chemical reactions on the parameters of electric energy supplying the discharge chamber during operation of the ozone generator. It is proved that the operating frequency of the AC voltage should not exceed the value of 20 kHz, as this will reduce the ozone concentration obtained. The study of gas parameters in the discharge interval was determined by applying the method of representative elementary volume, which allowed to break the discharge gap into volumes that are quasi-stationary in concentration. The processes occurring between these elemental volumes during ozone synthesis are described, as well as the processes of diffusion and the diffusion rate between two tangent elementary volumes with different ozone concentrations are determined.

Keywords: discharge chamber; ozone generator; ozone concentration; ozone-oxygen mixture; ozone synthesis; representative elementary volume.

Вступ

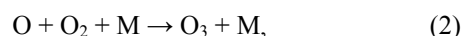
Згідно з сучасними уявленнями, озон синтезується в газовому середовищі, що містить кисень. Крім того, повинні виникнути умови, при яких кисень розкладається на атоми. Це можливо у всіх формах електричного розряду: тліючому, дуговому, іскровому, коронному, поверхневому, бар'єрному, безелектродному й т.п. [1]. Основною причиною дисоціації є зіткнення молекулярного кисню із прискореними в електричному полі електронами [2]. Крім розряду дисоціацію кисню викликають: різні частки високої енергії: α , β , γ -

частки; УФ-випромінювання (з довжиною хвилі < 240 нм); рентгенівські промені та інші. Озон одержують також при електролізі води.

Умовно групу реакції, що приводять до дисоціації кисню, можна позначити наступним чином



Атом кисню в результаті потрійного зіткнення утворює озон



де М – будь-яка частка, наприклад молекула кисню, озону, молекула домішки, атом кисню і т.д.

Потрійне зіткнення обов'язкове, оскільки необхідно відвести надлишок енергії. Потрійне зіткнення іноді представляють як два подвійні:



Практично у всіх літературних джерелах утворення озону існує група реакцій, у результаті яких озон розкладається. Вони знижують концентрацію озону та їх вплив необхідно враховувати.

Кожна із трьох груп реакцій – дисоціація кисню, утворення озону і його розпад – може складатися з декількох, іноді багатьох реакцій, так що повний механізм складається зі значного числа стадій, паралельних каналів і реакцій [2–4].

На сьогодні застосовуються наступні види розрядів для промислового одержання озону: поверхневий, коронний бар'єрний. Важливу особливістю отримання озону в розряді є те, що температура газу повинна залишатися невисокою, щоб зменшити вплив процесів термічного розкладу. А для цього розряд не повинен переходити в дугову фазу, коли різко підвищується температура. Області застосування різних типів розрядів, в основному визначаються по кількості виробленого озону й енергоефективності його генерації. Діелектричний бар'єрний розряд і імпульсний розряд короткої тривалості вивчалися як методи запобігання термізації (дугового розряду) розрядної плазми [6,7]. Однак, навіть при бар'єрному розряді і коротко імпульсній плазмі, усе ще занадто багато втрат енергії через нагрів. Як відомо з [6,8], 80-90% вхідної енергії перетворюється в тепло. Згідно з цими даними, майже вся вхідна енергія споживається нагріванням діелектрика, металевго електрода й газу. Для хімічних реакцій використовується тільки близько 10-20% вхідної енергії [9]. Тому є необхідність підвищити ефективність синтезу озону за рахунок підвищення вкладу групи реакцій, що приводить до його утворення.

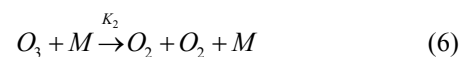
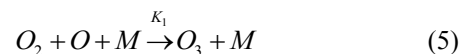
Мета роботи

Вивчення впливу хімічних реакцій, що відбуваються в розрядній камері генератора озону, на концентрацію озону при роботі з медичним киснем у якості робочого газу. Це дозволить скорегувати параметри електричної енергії, якою живиться розрядна камера, для більш ефективної генерації озону.

Визначення впливу хімічних процесів

Як було відзначено раніше, процес синтезу озону в розрядній камері генератора є комплексним процесом. За сучасними уявленнями він складається з більш ніж 100 хімічних реакцій, частина яких відповідає за синтез озону, а інша частина за його розпад. Слід зазначити, що, незважаючи на таку

велику кількість хімічних реакцій, які відбуваються в генераторі озону при розряді, основними є дві реакції, які вносять найбільш відчутний внесок у синтез й розпад озону [10]. Ці реакції відомі та виглядають наступним чином



Також відомі константи цих реакцій, які визначаються відповідно наступними виразами

$$K_1(M=[O_2]) = 6.2 \cdot (T/300)^{-2} \cdot 10^{-34} \quad (7)$$

$$K_2(M=[O_2]) = 7.26 \cdot 10^{-10} \cdot \exp(-11435/T) \quad (8)$$

Основна реакція синтезу озону відноситься до реакцій другого порядку, швидкість яких пропорційна до концентрації кожної з реагуючих речовин. Однак, після початку цієї реакції, одразу починається реакція розпаду озону, та можна вважати, що ці реакції відбуваються паралельно. Відомо, що для паралельних хімічних реакцій концентрація отриманих речовин пропорційна константі швидкості цих реакцій. Якщо вважати, що концентрація кисню O_2 є величною квазістаціонарною, то отримуємо наступне співвідношення констант K_1 та K_2 , значення яких беруться із [3], яке вказує на швидкість прирощення речовин після розряду, згідно з [10]

$$\frac{d[O_3]}{d[O_2]} = \frac{K_1}{K_2} \quad (9)$$

На рис. 1 наведена зміна цього співвідношення у залежності від температури. З цього графіку добре видно, що зростання температури приводить до зниження швидкості наростання молекул озону. Окрім того, висока температура сприяє швидкому розпаду озону.

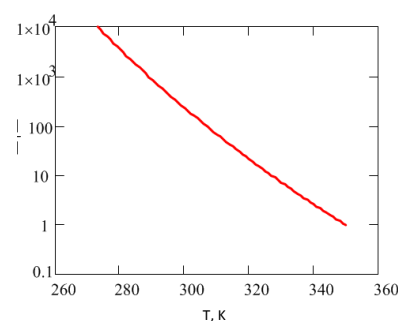


Рис. 1 – Співвідношення швидкості наростання озону та кисню у залежності від температури

Також треба сказати, що у концентрація молекул по всьому обсягу розрядної камери є неоднаковою із-за того, що бар'єрний розряд, який відбувається в розрядній камері генератора озону, має філаментовану природу. Він представляє собою роздільні швидкоплинні мікророзряди, які горять між двома діелектричними шарами. Тому буде зручним

розділити об'єм розрядної камери на маленькі об'єми, які будемо вважати квазіоднорідними. Такий підхід у вигляді репрезентативних елементарних об'ємів (РЕО) дозволить врахувати процеси, що відбуваються при розряді у різних частинах газового проміжку розрядної камери.

Реакції відбуваються при зіткненні молекул речовин, що реагують між собою. Її швидкість визначається кількістю зіткнень і ймовірністю того, що ці зіткнення приведуть до перетворення. Число зіткнень визначається концентраціями реагуючих речовин, а ймовірність реакції – енергією молекул, що реагують

$$\tau = \frac{K_1}{K_2} \cdot N[O]. \quad (11)$$

При моделюванні цієї реакції були отримані наступні результати, зображені на рис. 2. З них можна визначити, що максимальну концентрацію озону у одному РЕО після розряду дорівнює $1,2 \cdot 10^{10}$ молекул.

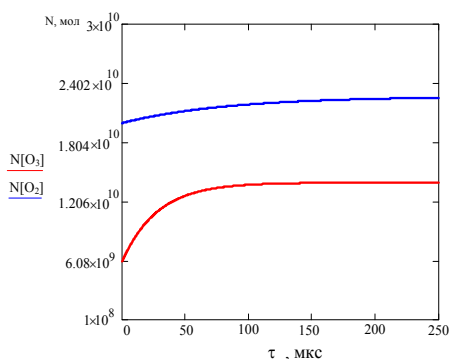


Рис. 2 – Концентрація озону та кисню у РЕО після проходження розряду

Далі можливо визначити за який час пройде реакція всіх молекул атомарного кисню до утворення стану, який характеризується практично відсутністю молекул такого кисню. Такий стан можна назвати квазістаціонарним виходячи з того, що тривалість життя молекул озону набагато довше тривалості життя молекул атомарного кисню, і може становити десятки хвилин, і навіть годин у газовому середовищі.

З рис. 2. можна зробити висновок, що концентрація озону швидко змінюється за період приблизно 50 мкс, після чого її зміна починає відбуватися значно повільніше. Це обумовлено тим, що за цей період часу проходить реакція за участю атомарного кисню, швидкість реакцій якого набагато вища, ніж швидкість реакцій у розрядній камері генератора озону без його участі. З цього можна зробити припущення, що підвищення частоти напруги, яка подається на розрядну камеру, вище ніж $1/\tau$, не буде приводити до підвищення концентрації озону, бо більша частина атомів атомарного кисню не буде встигати реагувати. Окрім цього, з частотою зростає й енергія, що подається до камери, що викликає, в свою чергу, підвищення температури газу

та зменшення співвідношення синтезу озону та кисню, а також прискорення термічного розпаду озону. Тобто підвищення частоти живлячої напруги є ефективним засобом підвищення концентрації у межах до 20 кГц, що обумовлено течією хімічних реакцій та збільшенням кількості енергії. Це припущення співпадає з аналізом літературних даних [11,12], котрі показали, що виробники не рекомендують підвищувати частоту роботи генератора озону більш ніж 20 кГц.

Як було зазначено раніше, швидкість проходження реакції атомарного кисню на кілька порядків вище, і тому ці молекули не враховуються при визначенні дифузійного поширення озону. Після закінчення стадії наявності мікророзряду, починається відносно тривалий процес дифузії, тобто поширення молекул озону по розрядній камері з областей з більшою концентрацією речовини в області з меншою. Так як, в даний час процесу синтезу озону, газова суміш складається із двох речовин, а саме озону й молекулярного кисню, то її можна вважати бінарною. Ухвалюємо, що загальне число молекул у газовій суміші рівно N_{TOTAL} . Із загальної кількості молекул кількість кисню становить N_{O_2} , а кількість озону – N_{O_3}

$$N_{TOTAL} = N_{O_2} + N_{O_3} = const. \quad (12)$$

Відповідно аналогічне співвідношення буде отримано й для концентрацій

$$n_{TOTAL} = n_{O_2} + n_{O_3} \quad (13)$$

Вирівнювання концентрацій відбувається при взаємодії двох сполучених РЕО, тобто можна стверджувати, що концентрація молекул двох речовин є функцією однієї змінної і змінюється уздовж однієї осі. Тоді слушний вираз

$$\frac{\partial n_{O_2}}{\partial x} = -\frac{\partial n_{O_3}}{\partial x}. \quad (14)$$

Із цього виразу випливає висновок, що уздовж однієї осі (в даному випадку обрана вісь x) швидкість росту концентрації озону повинна дорівнювати швидкості зменшення концентрації кисню по обраній осі. Графічно цей процес зображено на рис. 3.

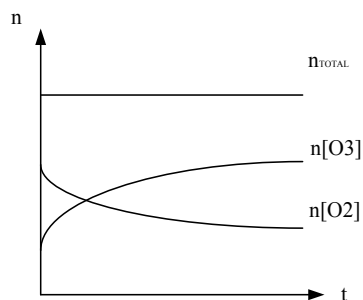


Рис. 3 – Процес зміни КО й кисню в обраній області розрядної камери

Дифузія молекул здійснюється між двома дотичними РЕО, площа їх взаємодії буде рівнятися площі однієї сторони РЕО, тобто dS . Також, логічно припустити, що кількість молекул, які продифундують через цю площу прямо пропорційна цій площі, часу протікання процесу дифузії, а також різниці концентрацій між областями, отже

$$dN_{[O_3]} = -D_{[O_3]} \frac{dn_{[O_3]}}{dx} dS dt . \quad (15)$$

У виразі (15) $D_{[O_3]}$ – коефіцієнт дифузії, який показує, з якою швидкістю дифундують молекули першої речовини в простір з більшою концентрацією молекул іншої речовини. Тут знак мінус вказує, що зміна концентрації відбувається тільки у бік її зменшення. Схожа картина спостерігається й для молекул кисню, які направляються в протилежну сторону від руху молекул озону. При цьому, беручи в основу рівність суми концентрацій молекул у двох взаємодіючих РЕО, одержуємо, що й коефіцієнти дифузії за таких умов будуть однакові.

Знаходячи з цього виразу коефіцієнт дифузії, можливо зробити висновок, за який час у розрядному проміжку вирівнюється концентрація синтезованого озону. Вирівнювання концентрації необхідно, перш за все, для того, щоб розряд відбувався по всій площині робочої зони камери. Якщо нова серія мікророзрядів буде проходити у неоднорідному газі, то є ризик, що виникне ситуація коли мікророзряди будуть відбуватися у окремих місцях з відмінним від оточуючого простору співвідношенням концентрації кисню та озону. Це, в свою чергу може привести до ситуації локального перегріву робочого газу та до підвищення деструкції озону у цьому просторі, що викликає зниження концентрації озону в озоні-кисневій суміші, яка отримується на виході генератора озону. Таким чином, підставивши в вираз (15) обрані параметри РЕО знаходимо, що швидкість дифузії у початковий етап часу, який означає закінчення процесу розряду, між двома дотичними РЕО становить приблизно $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Висновки

Таким чином, було досліджено вплив основних хімічних реакцій, що відбуваються в газовому проміжку розрядної камери генератора озону при синтезі озону у бар'єрному розряді. Показано, що процес синтезу озону сильно залежить від температури газу. А хімічні реакції у яких приймає участь атомарний кисень, накладають певні обмеження на параметри електричної напруги, якою живиться розрядна камера.

Також було отримано концентрації озону та молекулярного кисню для одного репрезентативного елементарного об'єму під час проходження кризь нього мікророзряду. Після досягнення квазістаціонарного рівню концентрація озону становила $1,2 \cdot 10^{10}$.

Було знайдено параметри процесу дифузії між дотичними елементарними об'ємами у випадку, коли їх концентрації різнилися.

Список літератури

1. **Elliason, B.** Electrical Discharge in Oxygen Part 1: Basic Data, Rate Coefficients and Cross Sections / **B. Elliason** // *Switzerland: Brown Boveri Research Report*. – 1985. – 144 p.
2. **Skalny, J. D.** A Study of the physical and chemical processes active in corona discharges fed by carbon dioxide / **J. D. Skalny, S. Matejcek, J. Orszagh et al.** // *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. – 2008. – Vol. 30. – № 2. – P. 145–151. – doi: 10.1080/01919510701863058.
3. **Самойлович, В. Г.** Физическая химия барьерного разряда / **В. Г. Самойлович, В. И. Гибалов, К. В. Козлов**. – М.: МГУ. – 1989. – 176 с.
4. **Lee, H. M.** Kinetic Modeling of Ozone Generation via Dielectric Barrier Discharges / **H. M. Lee, M. B. Chang, T. C. Wei** // *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. – 2004. – Vol. 26. – № 6. – P. 551–562. – doi: 10.1080/01919510490885361.
5. **Christensen, P.** The Electrochemical Generation of Ozone: A Review / **P. Christensen, T. Yonar, K. Zakaria** // *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. – 2013. – Vol. 35. – № 3. – P. 149–167. – doi: 10.1080/01919512.2013.761564.
6. **Филиппов, Ю. В.** Электросинтез озона / **Ю. В. Филиппов, В. А. Вобликова, В. И. Пантелеев** // *М: Издательство Московского университета*. – 1997. – 237 с.
7. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / **Ю. П. Райзер** // *Долгопрудный: Интеллект*. – 2009. – 734 с.
8. **Sun, Y.** Investigation of influencing factors in ozone generation using dielectric barrier discharge / **Y. Sun, F. Zhang** // *Properties and Applications of Dielectric Materials*. – 2009. – P. 614–617. – doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252354.
9. **Niayesh, K.** Volume discharge based description of pulsed breakdown in triggered spark gaps in air / **K. Niayesh, E. Hashemi, E. Agheb** // *Pulsed Power Conference 2007 16th IEEE International*. – 2007. – Vol. 2. – P. 1656–1660. – doi: 10.1109/PPPS.2007.4652508.
10. **Лунин, В. В.** Физическая химия озона / **В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко**. – М: Изд-во МГУ. – 1998. – 480 с.
11. **Murai, A.** A Study of Ozone Formation on the Surfaces of Electrodes / **A. Murai, C. Yamabe, S. Ihara** // *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*. – 2010. – Vol. 32. – № 3. – P. 153–160. – doi: 10.1080/01919511003785510.
12. **Гордееня, Е. А.** Об условиях эффективного получения высоких концентраций озона в озонаторах с барьерным разрядом / **Е. А. Гордееня, Н. И. Пуресев, Ю. В. Тарасов** // *Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: материалы 32-го Всерос. семинара*. – Москва, 2012. – С. 41–58.

References (transliterated)

1. **Elliason, B.** Electrical Discharge in Oxygen Part 1: Basic Data, Rate Coefficients and Cross Sections. *Switzerland: Brown Boveri Research Report*, 1985, 144.

2. Skalny, J. D., Matejcek, S., Orszagh, J. et al. A Study of the physical and chemical processes active in corona discharges fed by carbon dioxide. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 2008, **30**, 2, 145–151, doi: 10.1080/01919510701863058.
3. Samojlovich, V. G., Gibalov, V. I., Kozlov, K. V. Fizicheskaja himija bar'ernogo razrjada. M.: MGU, 1989, 176.
4. Lee, H. M., Chang, M. B., Wei, T. C. Kinetic Modeling of Ozone Generation via Dielectric Barrier Discharges. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 2004, **26**, 6, 551–562, doi: 10.1080/01919510490885361.
5. Christensen, P., Yonar, T., Zakaria, K. The Electrochemical Generation of Ozone: A Review. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 2013, **35**, 3, 149–167, doi: 10.1080/01919512.2013.761564.
6. Filippov, Ju. V., Voblikova, V. A., Panteleev, V. I. Jelektrosintez ozona. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1997, 237.
7. Rajzer, Ju. P. Fizika gazovogo razrjada. Dolgoprudnyj: Intellekt, 2009, 734.
8. Sun, Y., Zhang, F. Investigation of influencing factors in ozone generation using dielectric barrier discharge. *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009, 614–617, doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252354.
9. Niayesh, K., Hashemi, E., Agheb, E. Volume discharge based description of pulsed breakdown in triggered spark gaps in air. *Pulsed Power Conference 2007 16th IEEE International*, 2007, **2**, 1656–1660, doi: 10.1109/PPPS.2007.4652508.
10. Lunin, V. V., Popovich, M. P., Tkachenko, S. N. Fizicheskaja himija ozona. M.: Izd-vo MGU, 1998, 480.
11. Murai, A., Yamabe, C., Ihara, S. A Study of Ozone Formation on the Surfaces of Electrodes. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 2010, **32**, 3, 153–160, doi: 10.1080/01919511003785510.
12. Gordeenja, E. A., Puresev, N. I., Tarasov, Ju. V. Ob uslovijah jeffektivnogo poluchenija vysokih koncentracij ozona v ozonatorah s bar'ernym razrjadom. *Ozon i drugie jekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tehnologii: materialy 32-go Vseros. seminaru*, Moskva, 2012, 41–58.

Свідомості про авторів (About authors)

Махонін Микола Віталійович – інженер I категорії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер I категорії кафедри «Промислова і біомедична електроніка», м. Харків, Україна; e-mail: nikalas1990@gmail.com.

Mykola Makhonin – engineer of I category, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: nikalas1990@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Махонін, М. В. Хімічні процеси в розрядній камері генератора озону / **М. В. Махонін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 121-125. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.15.

Please cite this article as:

Makhonin, M. Chemical processes in the discharge chamber of an ozone generator. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **10** (1335), 121-125, doi:10.20998/2413-4295.2019.10.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Махонин, Н. В. Химические процессы в разрядной камере генератора озона / **Н. В. Махонин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 121-125. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.15.

АННОТАЦИЯ В статье рассматриваются химические процессы, происходящие в разрядном промежутке разрядной камеры генератора озона при процессе синтеза. Приведены основные химические реакции, которые отвечают за распад молекулярного кислорода под действием разряда, синтез озона и его распад. Литературный анализ источников показал, что существует большое количество таких химических реакций, однако основными являются три реакции. Приведены константы скорости этих реакций. Показано, что при росте температуры значительно увеличивается скорость группы реакций, которая отвечает за синтез молекулярного кислорода из атомарного, зато уменьшается скорость реакций, которые отвечают за синтез озона. Проведено исследование влияния течения химических реакций на параметры электрической энергии, питающей разрядную камеру во время работы генератора озона. Доказано, что рабочая частота переменного напряжения не должна превышать значения в 20 кГц, так как это приведет к снижению получаемой концентрации озона. Исследование параметров газа в разрядном промежутке проводилось с помощью применения метода репрезентативного элементарного объема, который позволил разбить разрядный промежуток на объемы, которые были квазистационарными по концентрации. Описаны процессы, происходящие между этими элементарными объемами при синтезе озона, а также рассмотрены процессы диффузии и определена скорость диффузии между двумя касательными элементарными объемами с разной концентрацией озона.

Ключевые слова: генератор озона; концентрация озона; озono-кислородная смесь; синтез озона; разрядная камера; репрезентативный элементарный объем.

Надійшла (received) 02.05.2019