

УДК 553/521 (575.2) (04)

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ОЗОНАТОРЕ НА ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРЯДЕ

Ю.Г. Смирнова – ст. преподаватель,
А.В. Токарев – канд. физ.-мат. наук, доц.,
В.А. Юданов – вед. инженер

The results investigated peculiarities thermal process which accompaniment barrier-surfaces discharging. Displaying dominant role in heat exchange energy belong electrical wind.

Введение. Барьерный разряд в кислороде и в атмосферном воздухе уже более ста лет широко используется в качестве промышленного плазмохимического реактора [1–3]. В настоящее время ведется активный поиск оптимальных конструкций озонаторов на основе усовершенствования существующих и создания новых. Разработка плазмохимических технологий на основе барьерного разряда невозможна без полного анализа совокупности физико-химических процессов, протекающих в разрядной ячейке.

Поиск оптимальных режимов работы озонатора любой конструкции, оценка эффективности его работы, определение энергозатрат на образование озона в значительной степени определяются тепловыми и электрическими характеристиками разрядного узла [4]. Тепловые параметры озонатора исследуются различными способами. В ряде работ по длине озонатора наклеиваются термопары на наружную поверхность внешнего электрода, либо используются секционированные озонаторы [5].

В данной работе исследуются интегральные теплофизические характеристики барьерно-поверхностного разряда. Диэлектрический барьер разрядной ячейки выполнен из поливинилхлоридной трубки, внутри которой располагается коронирующий электрод в виде спирали из нихрома [6]. Интерес к плазменным

реакторам такого типа обусловлен возможностью их применения в качестве генераторов озона высоких и сверхвысоких концентраций.

Цель работы: изучение основных особенностей тепловых процессов, происходящих при горении барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке, и установление доли тепловой энергии, передаваемой от разряда через диэлектрический барьер, охлаждаемой жидкости и газовому потоку.

Эксперимент. Схема измерения тепловых характеристик показана на рис. 1. В теплоизолированном корпусе располагается диэлектрический барьер толщиной 2,5 мм из поливинилхлоридной трубки длиной 12 м. Внутри трубки с минимальным зазором размещен коронирующий электрод в виде спирали, с шагом намотки $\delta = 10$ мм, из нихромового провода, толщиной 0,8 мм. На электрод подается эффективное напряжение до 10 кВ с частотой 50 Гц. Охлаждение барьера производится проточной водой, являющейся одновременно вторым электродом. Для проведения калориметрических измерений установка снабжена входными и выходными датчиками температуры воды t_1, t_2 , и кислорода t_3, t_4 . По известным температурам, расходам воды и кислорода, вложенной электрической мощности определяется распределение мощностей выводимой из озонатора потоком озono-кислородной смеси и во-

дой. Схемотехнические решения и методология измерения электрических характеристик поверхностного разряда в полной мере отражены в работах [7, 8].

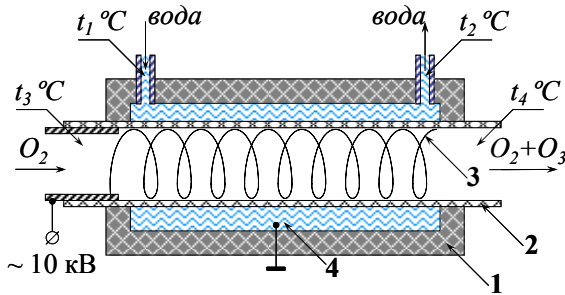


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – теплоизолированный корпус; 2 – диэлектрическая трубка; 3 – коронирующий электрод; 4 – вода – заземленный электрод; t_1, t_2, t_3, t_4 – входные и выходные датчики температуры воды и кислорода.

Результаты. Для анализа экспериментальных данных рассмотрим температурное поле в системе газ – стенка – вода (рис. 2). Тепловая энергия, выделяющаяся в зоне разряда, повышает температуру газа, и тепло через цилиндрическую стенку передается охлаждающей воде. Перепады температур $\Delta t_{\text{газа}}$ и $\Delta t_{\text{стенки}}$ определяются исходя из равенства тепловых потоков, которые передаются от газа к стенке за счет конвективного теплообмена и теплового потока, проходящего через цилиндрическую стенку за счет теплопроводности. Эффективность теплообмена в значительной степени определяется коэффициентом теплопроводности λ барьера и коэффициентом теплоотдачи α от газового потока к стенке.

Экспериментально определено изменение температуры кислорода, проходящего через озонатор в зависимости от расхода последнего (рис. 3.) при фиксированной мощности разряда 140 Вт. Нелинейный характер зависимости полностью определяется временем нахождения кислорода в разрядной зоне (рис. 4). С увеличением времени нахождения газа в зоне разряда увеличивается его температура. Исходя из степени нагрева газа, известного расхода

кислорода определяется мощность, выносимая газовым потоком из озонатора, по формуле:

$$Q_1 = V\rho \cdot c_p \Delta t_1 / \Delta \tau, \quad (1)$$

где Q_1 – тепловая мощность, выносимая из зоны разряда прокачиваемым кислородом, V – объем кислорода, прокаченного через озонатор за единицу времени, ρ – плотность кислорода, Δt_1 – разность температур кислорода на входе t_3 и выходе t_4 из озонатора, c_p – удельная теплоемкость кислорода при постоянном давлении, $\Delta \tau$ – период времени проведения измерения.

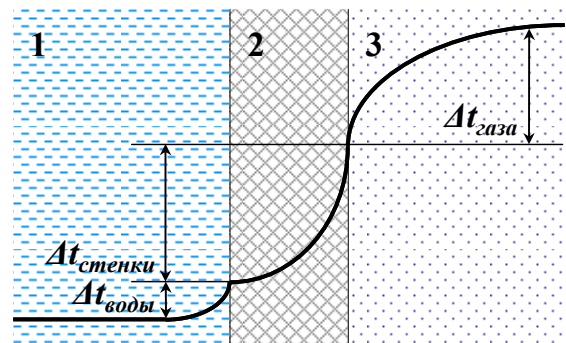


Рис. 2. Температурное поле в системе газ – стенка – вода: 1 – вода; 2 – диэлектрический барьер; 3 – кислород.

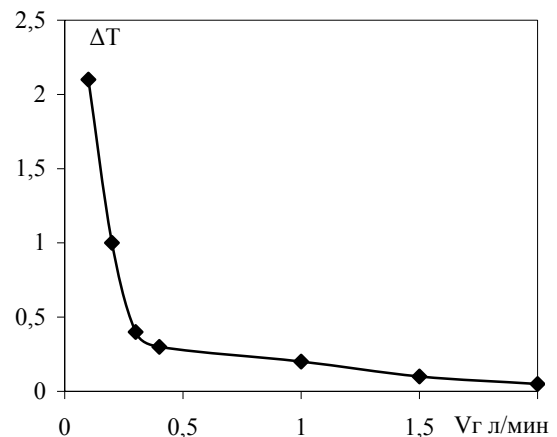


Рис. 3. Зависимость нагрева газа ΔT от его расхода V_2 .

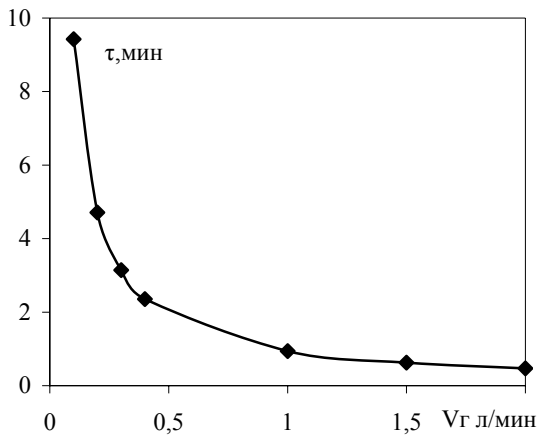


Рис. 4. Зависимость времени нахождения газа в зоне разряда τ от его расхода V_g .

Синтез озона сопровождается эндотермическими реакциями, учитываемыми соотношением:

$$Q_2 = rGC, \quad (2)$$

где r – теплота образования озона, равная 3 МДж/кг; G – расход кислорода через озонатор; C – концентрация озона на выходе из озонатора.

Вычисления показывают, что для всех расходов газа доля выносимой мощности Q_1 составляет около 3% от активной мощности в разряде $N_{акт}$. Мощность Q_2 , поглощаемая в эндотермических химических реакциях, направленных на синтез озона, также составляет около 3% от активной мощности. Поэтому оставшаяся часть подводимой мощности

$$Q_3 = N_{акт} - Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

передается тепловым потоком через стенку каоксиального цилиндра охлаждающей воде теплопроводностью. Этот поток вычисляется по формуле:

$$Q_3 = 2\pi\lambda l \Delta t_{стенки} / \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right), \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности ПВХ, l – длина трубки, $\Delta t_{стенки}$ – перепад температур в стенке трубки, d_2 – внешний диаметр трубки, d_1 – внутренний диаметр трубки.

Так как численное значение Q_3 известно из формулы (3), то, преобразуя формулу (4), можно вычислить перепад температур в стенке трубки:

$$\Delta t_{стенки} = Q_3 \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) / 2\pi\lambda l. \quad (5)$$

Учитывая, что коэффициент теплоотдачи от воды к стенке в 60–100 раз превосходит коэффициент теплоотдачи от газа к стенке, то температуру наружной части стенки можно принять за температуру охлаждающей воды. Отсюда температура внутренней поверхности стенки равна:

$$t_{вн.ст.} = t_{воды} + \Delta t_{стенки}. \quad (6)$$

Зная эту температуру и температуру кислорода на выходе из озонатора t_4 можно определить коэффициент теплоотдачи α из закона Ньютона–Рихмана:

$$\alpha = \frac{Q_3}{S(t_4 - t_{вн.ст.})}, \quad (7)$$

где S – площадь внутренней поверхности трубки. Сравнивая вычисленное значение коэффициента теплоотдачи 1 с аналогичным значением, рассчитанным при той же подводимой мощности, но в отсутствие разряда 2 (см. рис. 5), видим, что коэффициент теплоотдачи α при наличии разряда в 6–7 раз больше, чем в его отсутствие во всем диапазоне рассматриваемых расходов газа.

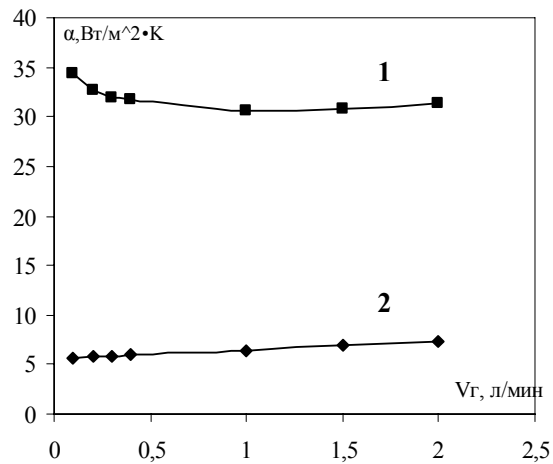


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от расхода газа G . 1 – с разрядом; 2 – в отсутствие разряда.

При анализе аномальной разницы в поведении коэффициентов теплоотдачи установлено совместное влияние на процесс теплоотда-

чи электрического ветра, сопровождающего разряд, и продольного движения газа. Из выражения для коэффициента теплоотдачи α между газом и гладкой поверхностью [9], можно определить величину скорости электрического ветра w :

$$\alpha = 5,6 + 4w. \quad (8)$$

Вычисленное значение составляет величину порядка 6–7 м/с. Продольная скорость движения газа определяется сечением трубки и объемным расходом газа. В рассматриваемых экспериментах она находилась в интервале 0,021–0,42 м/с.

Наличие электрического ветра в диэлектрической трубке приводит к формированию системы тороидальных вихрей вблизи спиральных коронирующих электродов. Характерные размеры этих вихрей определяются шагом коронирующего электрода и внутренним диаметром трубки. В нашем случае они составляли около $d_3 = 5$ мм. Частоту вращения этих тороидов ν можно оценить по формуле:

$$\nu = \frac{w}{\pi \cdot d_3}. \quad (9)$$

Полученные значения изменяются с увеличением расхода газа и находятся в пределах 380–460 Гц.

В отсутствие электрического ветра, увеличивающего коэффициент теплоотдачи, создание того же теплового потока через стенку к охлаждающей воде требует в 4–6 больший перепад температур между стенкой и газом. Расчет показывает, что при этом температура газа внутри трубки должна составлять величину 60–73 °С. При такой температуре синтез озона в озонаторе практически прекращается.

Выводы

1. В озонаторе рассматриваемой конструкции 94% подводимой мощности передается через диэлектрический барьер, 3% выводится из системы газовым потоком, остальное – не учтенные потери и энергия эндотермических реакций образования озона и окислов азота.

2. Интенсивный теплообмен в озонаторе происходит за счет электрического ветра, возникающего в зоне разряда.

3. Коэффициент теплопередачи α увеличивается по сравнению с ламинарным течением в 6–7 раз за счет турбулизации газа электрическим ветром.

4. Поверхностный разряд можно вводить в диэлектрические теплообменники с целью интенсификации теплообмена.

5. Без электрического ветра синтез озона в данном типе озонатора невозможен.

Литература

1. Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. Dielectric barrier discharges – principle and applications // J. Physique. – 1997. – V. IV-C4. – P. 47–66.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1989.
3. Eliasson B., Kogelschatz U. Modeling and Applications of Silent Discharge Plasmas // IEEE Trans. on Plasma Science. – 1991. – V. 19. – No. 2. – P. 309–323.
4. Ли П., Верещагин И.П., Соколова М.В. Физические процессы в барьерных озонаторах. – М.: Информационный центр “Озон”, 1998. – № 9. – С. 9.
5. Kuchler P. Zur Optimierung Inftbetriebener Ozonerzeuger, Ph. Thesis., 1990.
6. Энгельшт В.С. Патент России 17544647. // Б.И. – 1992. – № 30. – С. 244.
7. Смирнова Ю.Г. Барьерно-поверхностный разряд в диэлектрической трубке с металлической спиралью // Вестник ИГУ. – Каракол, 2005. – № 13. – С. 44–53.
8. Смирнова Ю.Г. Материалы первой всероссийской конференции “Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии”. – М.: Изд-во “Книжный дом университет”, 2005. – С. 139.
9. Кухлинг К. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985.