

5. Сокольский, О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів [Текст] / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк, І. І. Івицький // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 2. — С. 66–69.
6. Sokolskyi, O. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment [Text] / O. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskiy // Modern Scientific Research and their Practical application. — 2014. — № 10. — P. 136–140.
7. Ивицкий, И. И. Моделирование пристенного скольжения полимера [Текст] / И. И. Ивицкий // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 5/3(19). — С. 8–11. doi:10.15587/2312-8372.2014.27927
8. Жданов, Ю. А. Исследование профиля скоростей при течении расплава полимера в цилиндрических каналах [Текст] / Ю. А. Жданов, В. Ф. Дубовицкий // Химическое машиностроение. — 1968. — № 8. — С. 42–47.
9. Morrison, F. A. Understanding Rheology [Text] / F. A. Morrison. — Oxford: Oxford University Press, 2001. — 560 p.
10. Рабек, Я. Экспериментальные методы в химии полимеров [Текст] / Я. Рабек. — М.: Мир, 1983. — 384 с.

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЛИЧИЯ, ХАРАКТЕРА И ВЕЛИЧИНЫ ПРИСТЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ТЕЧЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Созданы методики определения наличия пристенных эффектов при течении расплава полимерного материала, определения характера этих эффектов и их величины, в зависимости от напряжения сдвига на стенке с учетом неньютоновского характера свойств полимерных материалов. Созданные методики позволяют универсально подходить к определению пристенных эффектов в полимерных материалах.

Ключевые слова: полимер, пристенные эффекты, скольжения по стенке.

Сівецький Володимир Іванович, кандидат технічних наук, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: siv-vi@ukr.net.
Сокольський Олександр Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: sokolkiev@ukr.net.
Івицький Ігор Ігорович, аспірант, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: ivitskiy@gmail.com.

Сівецький Володимир Іванович, кандидат технічних наук, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.
Сокольський Олександр Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.
Івицький Ігор Ігорович, аспірант, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Sivetskiy Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: siv-vi@ukr.net.
Sokolskyi Oleksandr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: sokolkiev@ukr.net.
Ivitskiy Igor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: ivitskiy@gmail.com

УДК 66:661:004.942

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.43865

Сергеева О. В.,
Пивоваров А. А.

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА С ЖИДКИМ КАТОДОМ

В данной работе рассмотрены факторы, которые необходимо учитывать при проектировании реактора с электролитным катодом, в котором используется контактная неравновесная низкотемпературная плазма пониженного давления. Анализ характеристик и условий протекания таких процессов является основой для создания нового оборудования и технологий. Полученные зависимости позволяют рассчитывать размеры газоразрядной части реактора, и таким образом уменьшить энергопотребление.

Ключевые слова: контактная неравновесная плазма, электролитный катод, активные частицы и радикалы, размерные характеристики реактора.

1. Введение

В настоящее время все шире применяются технологии на основе контактной неравновесной низкотемпературной плазмы. Привлекательность в ее использования для получения новых соединений [1–4], обработки различных сред, с целью изменения свойств [2, 3], улучшения или активации обрабатываемых веществ [5, 6],

разрушения вредных веществ [2] — является основой для создания новых технологий, включающих проектирование и разработку плазмохимических реакторов различного назначения.

При этом практически нет информации касающейся особенностей проектирования плазмохимических реакторов с жидким электролитическим катодом, что и вызвало необходимость проведения данной работы.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Некоторые типы плазмы, образованной различными разрядами, при контакте с водной средой приводят образованию активных частиц и радикалов, которые возникают при деструкции воды [2, 4–6].

Исследования затрагивают в первую очередь саму плазму, ее характеристики, состав [2, 4, 5], скорость расхода компонентов и выход образующихся веществ в гомогенной среде [6] и степень воздействия на обрабатываемый материал в случае гетерогенных сред [1, 2, 7]. При обработке плазмой различных растворов, в которых, в отличие от твердых тел, могут возникать значительные потоки переноса массы (диффузия, конвекция), в результате чего возникшие при взаимодействии с плазмой физико-химические изменения в поверхностном слое жидкости могут распространиться по всему ее объему. Таким образом, за счет процессов перемешивания обработку объема жидкости можно проводить через обработку ее поверхности [8].

В работе Аристовой и Пискарева [9] проводится анализ условий осуществления химических реакций в системе плазменный разряд – жидкость и выбор размера газовой полости.

В работе [10] на основании использования критериев подобия выводятся полуэмпирические уравнения, учитывающие зависимость вольт-амперной характеристики разряда с жидким электролитным катодом от давления и межэлектродного расстояния.

В работе Кравченко [11] предложена макрокинетическая модель газожидкостного плазмохимического реактора, основанная на использовании общего уравнения реактора идеального вытеснения для проведения процесса с учетом химических превращений в жидкой фазе в условиях контактного разряда.

Однако, несмотря на достаточно большое количество публикаций касающихся проектирования плазмохимических реакторов фактически нет комплексных рекомендаций касающихся расчета размерных параметров реакторов для процессов с жидким электролитическим катодом.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования являлись процессы плазмохимической обработки жидких сред, играющих роль электролитного катода в реакторе.

Целью данной работы было выявление основных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании плазмохимических реакторов с жидкими электролитическими катодами.

Для этого проводился анализ накопленных статистических характеристик в ходе проведения экспериментальных исследований, а также проводился анализ рекомендаций, предложенных различными авторами, с дальнейшим обобщением.

4. Материалы и оборудование, использовавшиеся в ходе экспериментов

В качестве объектов исследования использовались дистиллированная вода и различные растворы солей (NaOH, KOH, KJ, KCl, NaCl) в дистиллированной

воде; модельные растворы сульфатов Cu, Ni, Zn, Fe, Co различных концентраций в дистиллированной воде, модельные растворы $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, AgNO_3 , марок «чда» и «хч» и водопроводная вода, растворы с растворенными органическими компонентами (спирты: этанол, бутанол-1), включая сточные воды после хромирования, никелирования и цианистого цинкования.

Для проведения исследования использовалось лабораторная установка с параметрами эксплуатации, приведенными в табл. 1, и с использованием однотипных реакторов различного диаметра, характерные особенности которых представлены на рис. 1.

Таблица 1

Эксплуатационные параметры установки

Параметры	Описание	Величина
Входное напряжение	Переменное однофазное	$\sim 50 \text{ Гц} \div 220 \text{ В}$
Выходное напряжение	Постоянное, пульсирующее, регулируемое в пределах	$400 \div 1500 \text{ В}$
Ток нагрузки	Максимальное значение	0,4 А
Напряжение поджига	Амплитуда Длительность импульса	$12000 \div 15000 \text{ В}$ $1,0 \div 1,5 \text{ мс}$

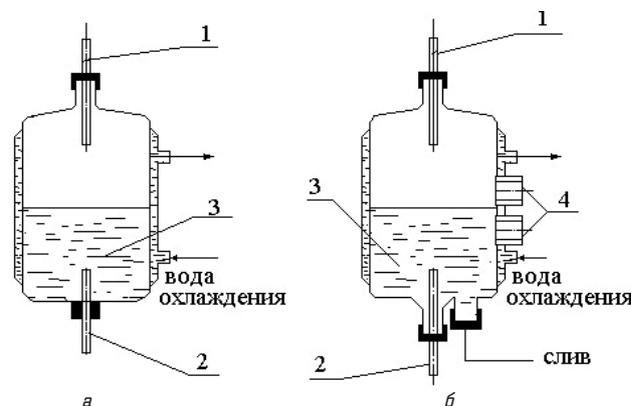


Рис. 1. Используемые реакторы: а — реактор без внешнего доступа в процессе плазмохимической обработки; б — реактор с возможностью прямого доступа в процессе плазмохимической обработки; 1 — анод; 2 — катод; 3 — обрабатываемый раствор; 4 — патрубки

5. Результаты исследований влияния параметров процесса плазмохимической обработки на конструкционные размеры реактора

При оценке зависимостей результатов плазмохимической обработки от конструктивных параметров реактора использовались следующие данные: значения изменения концентрационных характеристик в растворе от расстояния h_p , (рис. 2), параметров: напряжения U , В, силы тока I , мА, температуры раствора t , °С, давления в зоне реакции P , Па; длительности воздействия разряда на раствор τ , с, объема раствора V_0 , м³, а также данных табл. 2, которые дополнялись данными опубликованными ранее в работах [12–15].

В работах [6, 7] рассматривается энергетический баланс на жидком катоде. В качестве электролита использована техническая вода. Оценки, выполненные в работе [6], показывают, что тепловые потери на катоде

в основном определяются потоком тепла от плазмы, т. е. основная часть потока тепла от плазмы к жидкому катоду идет на нагрев электролита и безвозвратно уносится в систему охлаждения.

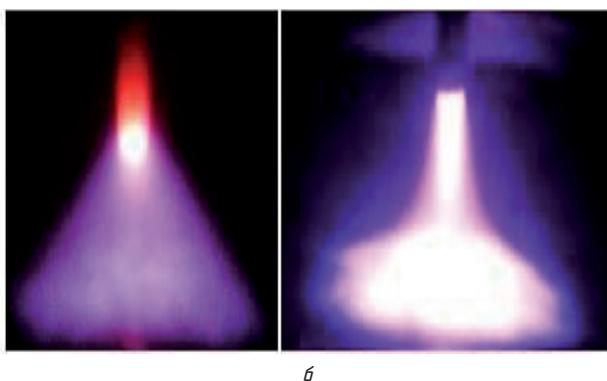
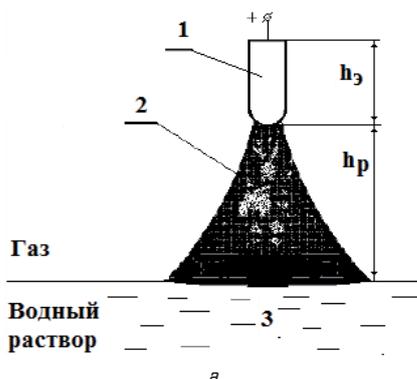


Рис. 2. Стационарный разряд над электролитным катодом: а — схематическое изображение: 1 — электрод, 2 — плазменный разряд, 3 — водный электролитный электрод; б — разряд контактной неравновесной плазмы, наблюдаемой в плазмохимическом реакторе при обработке водных сред

Таблица 2

Учет факторов приведших к некорректному проведению эксперимента

Причина сбоя	Фактор	Решение
Разряд на стенке (стенках) реактора	Внутренний радиус реактора меньше h_p	Уменьшить h_p или увеличить внутренний диаметр (сменить реактор)
Перегрев нижней части анода	Не правильно выбран материал или режим работы разряд переходит в дуговой	Сменить электрод или уменьшить величину h_p , I или P
Разрушение нижней части анода	Возможен механический брак или анодная плотность тока j_A достигла значения, при котором электрод разрушается	Заменить электрод или уменьшить анодную плотность тока, изменив параметры процесса
Перегрев верхней части реактора	Недостаток охлаждения или переход разряда в дуговой	Увеличить скорость охлаждения реактора или уменьшить h_p , I или P
Электролиз вместо плазменного разряда	Не учтена вязкость жидкости и влияние электрического поля на жидкость, $h_p < 1$ мм	Увеличить высоту h_p
Кипение раствора	Недостаток охлаждения	Увеличить скорость охлаждения в реакторе или повысить давление

Так, в работе [9] на основании сравнения скорости w_1 (взаимодействия активных радикалов $R\bullet$, генерируемых в разряде и находящегося в жидкости вещества А) и скорости w_2 (расхода радикалов $R\bullet$, образующихся в газовой фазе), отмечено, что для того, чтобы не допустить значительной потери активных частиц, необходимо выполнить условие $w_2 \ll w_1$ или $[R\bullet] \ll A_{кин}k_1[A]/k_2$, где k_1, k_2 — константа скорости реакции w_1 и w_2 соответственно; $A_{кин}$ — кинетический фактор, характеризующий поглощение активных частиц и перемешивание жидкости, $[A]$ — концентрация вещества в жидкости; $[R\bullet]$ — концентрация радикалов в газовой фазе.

Требования к объему газовой фазы в реакторе формируются исходя из концентрации активных радикалов ($[R\bullet]/V_T$) в нем. Соответственно при выполнении условия $w_2 \ll w_1$, должно выполняться условие $V_T \gg k_1A_{кин}[A]/(k_2[R\bullet])$.

В этой же работе отмечено, что для уменьшения доли гибели активных частиц на стенках реактора, для случая газового объема в форме цилиндра с радиусом r и высотой h , необходимо увеличение площади основания при минимальной высоте.

В работе [10] исследовались характеристики разряда между жидким катодом и металлическим анодом с целью получения обобщенной вольт-амперной характеристики (ВАХ). На основании использования критерильных параметров получено упрощенное уравнение для напряжения разряда:

$$U_p h_p^{0,5} / I = f(I^2 / h_p^{1,5}, P \cdot h_p),$$

а на основе изучения обобщенной ВАХ разряда полученной для разряда с жидким катодом из технической воды, учитывающей зависимость тока и напряжения от P и h_p , в диапазоне значений $I = 0,1-0,6$ А, $P = 10-10$ кПа, $h_p = 2$ мм, находят:

$$f(I^2 / h_p^{1,5}, P \cdot h_p) = a(I^2 / h_p^{0,75})^{-1,1} (P \cdot h_p)^{0,42},$$

где $a = 430 \text{ A}^{0,1} \cdot \text{В} \cdot \text{Па}^{-0,42} \cdot \text{м}^{-0,745}$.

При этом величина среднеквадратического отклонения экспериментальных составила от расчетных не превышала 10 %.

В работе Кравченко [11] рассматривалась макрокинетическая модель проточного газожидкостного плазмохимического реактора в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами h — расстояние между двумя равноименными электродами, l — длина, b — ширина. Полный объем реактора (V_0) представлен тремя объемами: объем занимаемый жидкой фазой ($V_ж$), объем газовой среды в зоне существования разряда ($V_{Г1}$) и объем газовой среды, в которой этот разряд вырождается ($V_{Г2}$). При отсутствии перемешивания жидкой фазы и интернировании в ее объем заряженных частиц только через поверхность раздела фаз предлагается следующая зависимость изменения концентрации C_A от $V_{Г1}$:

$$-\frac{dC_{A1}}{A_l dV_{Г1}} = \frac{V_0}{V_0 - V_{Г1} - V_{Г2}} - \frac{V_{Г1}}{V_0 - V_{Г2}},$$

где A_l — коэффициент.

При переходе к линейным параметрам автором работы [11] выводится общее уравнение реактора идеального вытеснения для проведения процесса с учетом химических превращений в жидкой фазе в условиях контактного разряда, с помощью которого можно найти значения I и h_{r1} для любого конкретного вида кинетической зависимости. Также автор делает вывод, что основными технологическими факторами, определяющими интенсивность процессов в реакторе с неравновесной низкотемпературной плазмой, являются время обработки, давление в зоне реакции и расстояние от анода до межфазной границы газ — жидкость.

6. Обсуждение результатов исследований влияния параметров процесса плазмохимической обработки на конструкционные размеры реактора

На основании проведенных экспериментов, при обобщении накопленного материала, можно отметить, что основными технологическими параметрами, влияющими на изменение состояния исходных веществ (концентраций исходных веществ, их преобразование в различные оксидные и гидроксидные соединения для металлов, выделение металлических и оксидных частиц, разрушение и/или осаждение вредных примесей, характерных для сточных вод, активация растворов и образование пероксидных соединений) являются: начальные значения концентраций растворенных веществ C_{a0i} , рН раствора, давление в зоне реакции P , Па, высота анода над поверхностью жидкости h_p , сила тока I , мА, объем раствора $V_{ж}$ и длительность воздействия разряда на раствор τ , с.

В общем виде это можно представить как функцию изменения концентрации растворенного вещества:

$$f(C_a) = f(C_{a0i}, \text{рН}, P, I, h_p, V_{ж}, \tau).$$

В зависимости от требуемых значений $f(C_a)$ можно определить h_p , $V_{ж}$ и соответственно общий объем реактора V_0 .

При изучении работ [6, 7, 9–11] выделили дополнительные рекомендации по проектированию плазмохимических реакторов, представленные в табл. 3.

В работе [10] исследовались характеристики разряда между жидким катодом и металлическим анодом с целью получения обобщенной вольт-амперной характеристики (ВАХ). При использовании критериальных характеристик получено упрощенное уравнение для напряжения разряда:

$$U_p h_p^{0,5} / I = f(I^2 / h_p^{1,5}, P \cdot h_p),$$

а на основании изучения обобщенной ВАХ разряда полученной для разряда с жидким катодом из технической воды, учитывающей зависимость тока и напряжения от P и h_p , в диапазоне значений $I = 0,1-0,6$ А, $P = 10-10$ кПа, $h_p = 2$ мм, получено:

$$f(I^2 / h_p^{1,5}, P \cdot h_p) = a(I^2 / h_p^{0,75})^{-1,1} (P \cdot h_p)^{0,42},$$

где $a = 430 \text{ А}^{0,1} \cdot \text{В} \cdot \text{Па}^{-0,42} \cdot \text{м}^{-0,745}$.

При этом величина среднеквадратического отклонения экспериментальных данных от расчетных не превышала 10 %.

Однако, как следствие частичной эмпиричности такого подхода, для каждого раствора необходимо получение своей обобщенной ВАХ, для дальнейшего уточнения соответствующих коэффициентов.

7. Выводы

В данной работе на основании проведенных исследований отмечен ряд факторов, которые необходимо учитывать при проектировании плазмохимических реакторов с жидкими электролитическими катодами.

Также обобщены рекомендации различных авторов, работающих в данном направлении с подобными плазмохимическими реакторами.

Использование теоретических зависимостей и результатов экспериментальных исследований позволило уточнить ряд нюансов, которые следует учитывать при проектировании размерных параметров реактора для плазмохимических процессов. Учет особенностей процесса при проектировании реактора позволит снизить расход энергии и реагентов на проведение процессов обработки жидкости.

Таблица 3

Параметры плазмохимических реакторов, которые следует учесть при их проектировании

Параметр	Условие	Следствие	Источник
Объем газовой полости, V_r	$w_2 \ll w_1$ или $[R] \bullet \ll A_{\text{кин}} k_1 [A] / k_2$	$V_r \gg k_1 A_{\text{кин}} [A] / (k_2 [R] \bullet)$	[9]
Объем газовой полости, V_r , цилиндр с радиусом r и высотой h	Уменьшение потерь $[R] \bullet$	Увеличение V_r за счет увеличения площади основания при минимальной высоте	[9]
Зависимость параметров I , U от P и h_p	$U_p h_p^{0,5} / I = a(I^2 / h_p^{0,75})^{-1,1} (P h_p)^{0,42}$, где $a = 430 \text{ А}^{0,1} \cdot \text{В} \cdot \text{Па}^{-0,42} \cdot \text{м}^{-0,745}$	Расчет параметров I , U при заданных P и h_p , при $I = 0,1-0,6$ А, $P = 10-10$ кПа, $h_p = 2$ мм, дает величину среднеквадратического отклонения не более 10 %	[10]
Расчет толщины слоя жидкости $V_{ж} = V_0 - V_{r1} + V_{r2}$	$\frac{d_{cA1}}{A_r dV_{r1}} = \frac{V_0}{V_0 - V_{r1} - V_{r2}} - \frac{V_{r1}}{V_0 - V_{r2}}$ поступление заряженных частиц идет только через поверхность раздела фаз	Для достижения максимальной степени преобразования вещества А, необходим переход к пленочному режиму	[11]

Литература

1. Рыбкин, В. В. Низкотемпературная плазма как инструмент модификации полимерных материалов [Текст] / В. В. Рыбкин // Соросовский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6, № 3. — С. 58–63.
2. Hoeben, W. F. L. M. Gas phase corona discharges for oxidation of phenol in an aqueous solution [Text] / W. F. L. M. Hoeben, E. M. van Veldhuizen, W. R. Rutgers, G. M. W. Kroesen // Journal of Physics D: Applied Physics. — 1999. — Vol. 32, № 24. — P. L133–L137. doi:10.1088/0022-3727/32/24/L133
3. Акулова, М. В. Применение тлеющего разряда в текстильной и строительной промышленности [Текст]: монография / М. В. Акулова и др. — Иваново: ИГХТУ, 2008. — 232 с.
4. Голубев, С. Н. Электрофизические характеристики разряда пониженного давления с жидким водным катодом [Текст]: тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородская) конференции по физике плазмы и УТС, 9–12 февраля 2010 г. / С. Н. Голубев, А. Н. Иванов, Д. А. Шутов. — Москва, 2010. — С. 262.
5. Иванов, А. Н. Исследование пробоя разрядов с водными катодами [Текст]: тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородская) конференции по физике плазмы и УТС, 9–12 февраля 2010 г. / А. Н. Иванов, В. В. Рыбкин, Д. А. Шутов. — Москва, 2010. — С. 261.
6. Гайсин, Ф. М. Энергетические характеристики разрядов в атмосфере между электролитом и медным анодом [Текст] / Ф. М. Гайсин, Ф. А. Гизатулина, Р. Р. Камалов // ФизХОМ. — 1985. — № 4. — С. 58–64.
7. Тазмеев, Х. К. Пористые элементы в генераторах плазмы с жидким электролитным катодом [Текст] / Х. К. Тазмеев, Б. Х. Тазмеев // ИФЖ. — 2003. — Т. 76, № 4. — С. 107–114.
8. Бородин, В. И. Установка для обработки воды плазмой тлеющего разряда [Текст]: материалы Конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2001 / В. И. Бородин. — Петрозаводск, 2001. — С. 197–201.
9. Аристова, Н. А. Вспышечный коронный электрический разряд как источник химически активных частиц [Текст] / Н. А. Аристова, И. М. Пискарев // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. — Т. XI-5. — С. 308–342.
10. Валиев, Р. И. Исследование характеристик и разработка плазменной электротермической установки с жидким катодом [Текст] / Р. И. Валиев, Б. Ю. Шакиров, Ю. И. Шакиров // Вектор науки ТГУ. — 2012. — № 1(19). — С. 54–57.
11. Кравченко, А. В. Макрокинетическая модель газожидкостного плазмохимического реактора [Текст] / А. В. Кравченко, А. Г. Рудницкий, В. Д. Барский, В. С. Кублановский // Вопросы химии и химической технологии. — 2004. — № 5. — С. 226–229.
12. Пивоваров, А. А. Физико-химические превращения воды, обработанной плазмой тлеющего разряда [Текст] / А. А. Пивоваров, О. В. Сергеева // Вопросы химии и химической технологии. — 1999. — № 3. — С. 61–64.
13. Пивоваров, А. А. Механизм восстановления цианидов серебра в водных растворах под действием низкотемпературной плазмы [Текст] / А. А. Пивоваров, О. В. Сергеева, А. П. Тищенко, А. С. Каташинский и др. // Вопросы химии и химической технологии. — 2007. — № 5. — С. 28–30.
14. Пивоваров, А. А. Плазмохимическое извлечение поливалентных металлов из сточных вод гальванических производств [Текст] / А. А. Пивоваров, О. В. Сергеева, А. П. Тищенко и др. // Вопросы химии и химической технологии. — 2007. — № 6. — С. 230–237.
15. Пивоваров, А. А. Влияние добавок низших спиртов на свойства водных растворов, обработанных электрическими разрядами [Текст] / А. А. Пивоваров, О. В. Сергеева, С. В. Сытник // Вопросы химии и химической технологии. — 2001. — № 1. — С. 186–189.

ВРАХУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГАЗОРОЗЯДНОЇ ПЛАЗМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ПЛАЗМОХІМІЧНОГО РЕАКТОРА З РІДКИМ КАТОДОМ

У даній роботі розглянуто фактори, які необхідно врахувати при проектуванні реактора з електролітним катодом, у якому використовується контактна нерівноважна низкотемпературна плазма зниженого тиску. Аналіз характеристик та умов протікання таких процесів є підґрунтям для створення нового обладнання та технологій. Отримані залежності, що дозволяють розраховувати розміри газорозрядної частини реактора, і таким чином знизити енерговитрати.

Ключові слова: контактна нерівноважна плазма, електролітичний катод, активні частинки та радикали, розмірні характеристики реактора.

Сергеева Ольга Вячеславовна, кандидат технических наук, докторант, кафедра технологии неорганических веществ и экологии, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепропетровск, Украина, e-mail: ov.sergeeva@mail.ru.

Пивоваров Александр Андреевич, доктор технических наук, профессор, кафедра технологии неорганических веществ и экологии, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», Днепропетровск, Украина, e-mail: apivo@ua.fm.

Сергеева Ольга Вячеславовна, кандидат технічних наук, докторант, кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпропетровськ, Україна.

Пивоваров Олександр Андрійович, доктор технічних наук, професор, кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпропетровськ, Україна.

Sergeyeva Olga, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: ov.sergeeva@mail.ru.

Pivovarov Alexander, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: apivo@ua.fm