

УДК 537.525

**Влияние газообразных продуктов гетерогенных реакций
на параметры плазмы аргона**

С. А. Смирнов, В. А. Титов, Т. Г. Шикова, А. А. Овцын, Д. В. Кадников

Представлены экспериментальные данные о параметрах плазмы и о составе газообразных продуктов при обработке ткани из полиэтилентерефталата в плазме пониженного давления (50—300 Па) в аргоне. Анализ газовой фазы проводили методами эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии. При различной площади обрабатываемого материала измерена напряженность электрического поля и температура газа на оси разряда, мольные доли продуктов деструкции полимера. Рассчитана функция распределения электронов по энергиям. Показано, что с увеличением площади обрабатываемого материала в реакторе изменяется приведенная напряженность электрического поля, температура газа, средняя энергия электронов и коэффициенты скоростей процессов с участием электронов. Спектры излучения плазмы показали, что диссоциация продуктов деструкции полимера приводит к изменению состава активных частиц плазмы: а именно, к образованию атомов О, Н и радикалов ОН.

PACS: 52.40 Hf

Ключевые слова: плазма, аргон, эмиссионная спектроскопия, масс-спектрометрия, напряженность электрического поля, температура газа, функция распределения электронов по энергии, газообразные продукты, полиэтилентерефталат.

Введение

Неравновесная плазма при пониженном или атмосферном давлении широко используется для модифицирования поверхности синтетических и натуральных полимерных материалов [1—4]. Выделение газообразных продуктов реакций активных частиц с полимерами изменяет состав плазмы и, как следствие, ее физические параметры. В результате должны изменяться как скорости образования активных частиц, так и скорости гетерогенных реакций. Наличие таких «химических

обратных связей» между гетерогенными плазмо-химическими реакциями и свойствами плазмы было показано в условиях обработки полимерных пленок и тканей в плазме разрядов постоянного тока в кислороде и воздухе при пониженном давлении ($p = 30\text{—}300$ Па) [5—7].

Основным газообразным продуктом воздействия плазмы инертных газов на полиолефины является молекулярный водород, при этом в тонком модифицированном слое полимера накапливаются двойные связи и сшивки [1, 8]. При наличии в макромолекулах функциональных групп (гидроксильных, карбонильных, аминогрупп и др.) появляются и другие продукты. Например, при обработке поливинилового спирта и полиакриловой кислоты в плазме аргона наряду с водородом были обнаружены молекулы кислорода, монооксида углерода и воды [1], а при обработке арамидных материалов — молекулы монооксида углерода и азота [9].

Экспериментальные данные о влиянии продуктов деструкции полимеров на параметры плазмы инертных газов в литературе отсутствуют. В настоящей работе приведены результаты измерений состава газа, напряженности электрического поля, температуры газа и спектрального состава излучения плазмы пониженного давления в аргоне

Смирнов Сергей Александрович, зав. кафедрой¹.
Титов Валерий Александрович, гл научный сотрудник².
Шикова Татьяна Григорьевна, доцент¹.
Овцын Александр Андреевич, аспирант¹.
Кадников Дмитрий Викторович, аспирант¹.

¹ Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ).

Россия, 153000, Иваново, Шереметевский проспект, 7.
Тел. +7 (961) 118-84-56. E-mail: sas@isuct.ru

² Институт химии растворов им. Г.А. Крестова
Российской академии наук (ИХР РАН).

Россия, Иваново, ул. Академическая, 1.
E-mail: titov25@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 июля 2016 г.

© Смирнов С. А., Титов В. А., Шикова Т. Г.,
Овцын А. А., Кадников Д. В., 2016

при обработке гетероцепного полимера — полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Выбор полимера обусловлен наличием в его структуре карбонильных и эфирных групп, разрушение которых должно приводить к выделению кислородсодержащих газообразных продуктов. Данные о составе плазмы и ее параметрах необходимы для последующего анализа механизмов образования активных частиц и их реакций с полимерами.

Экспериментальная установка и методы измерений

Разряд постоянного тока возбуждали в цилиндрическом стеклянном реакторе с внутренним диаметром 3 см в потоке аргона при давлении $p = 50\text{—}300$ Па и токе $i = 20\text{—}110$ мА. Объемный расход газа соответствовал скорости его потока через реактор 30 см/с. Напряженность продольного электрического поля измеряли двумя электростатическими зондами с диаметром изолированной части 20 мкм и длиной 3 мм, которые помещали на оси разряда. Температуру газа на оси разряда определяли на основе измерений двумя термопарами медь—константан, помещенными в тонкостенные стеклянные капилляры (с наружными диаметрами 1,04 и 1,59 мм), по методике, подробно описанной в [10]. В ряде экспериментов измеренную температуру газа сравнивали с вращательной температурой состояний $N_2(C^3\Pi_u)$, $OH(A^2\Sigma^+)$ и $CO(b^1\Sigma^+)$, которую находили по методике, изложенной в [11].

Спектры излучения плазмы регистрировали спектрофотометром AvaSpec-2048FT-2-SPU. Состав газовой фазы анализировали с использованием масс-спектрометра ИПДО-2А, измерительную систему которого калибровали путем напуска в реактор чистых газов. Экспериментальная установка, методики масс-спектральных измерений и определения скоростей выделения газообразных продуктов подробно описаны в [12]. Скорость убыли массы полимерных образцов находили по результатам их периодического взвешивания на аналитических весах.

В экспериментах использовали ткань торговой марки SAATILENE 120.34 (Италия) из монофиламентных нитей из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Образцы ткани размещали в виде цилиндров на внутренней поверхности стенки реактора, температура которой (296 ± 5 К) задавалась внешним теплообменником, соединенным с термостатом UT-2/77. Суммарная площадь образцов составляла в разных экспериментах 18, 36, 73 и 111 см², то есть полимером было закрыто от 6 до 35 % площади поверхности, ограничивающей плазму. Температуру полимерного материала измеряли термопарой медь—константан, помещен-

ной в тонкостенный стеклянный капилляр, который проходил вдоль стенки реактора и плотно прижимался к образцу за счет своей упругости. Температура образцов в процессе обработки увеличивалась на 1—10 К в зависимости от вкладываемой в разряд мощности.

Результаты и обсуждение

Спектры излучения плазмы показали наличие примесей кислорода, азота, паров воды и молекул CO в плазме аргона даже в отсутствие полимера в реакторе. Эти примеси связаны как с чистотой исходного газа, так и, главным образом, с процессами десорбции со стенок реактора. Мольные доли основных компонентов газовой фазы, найденные в результате масс-спектральных измерений при горении разряда, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Мольные доли основных компонентов газовой фазы при обработке ткани из ПЭТФ в плазме аргона при токе разряда 80 мА

P, Па	Ar	O ₂	CO	H ₂ O	H ₂
	Разряд в аргоне без образца полимера				
50	0,970	0,003	0,003	0,020	0,003
100	0,987	0,001	0,002	0,008	0,002
200	0,994	0,002	0,001	0,003	0,001
300	0,996	0,001	0,001	0,002	0,001
Площадь образца S = 18 см ²					
50	0,996	—	0,010	0,012	0,012
100	0,987	—	0,003	0,005	0,005
200	0,989	—	0,004	0,001	0,006
300	0,994	—	0,010	0,012	0,012
Площадь образца S = 36 см ²					
50	0,958	—	0,022	0,013	0,007
100	0,973	—	0,013	0,014	—
200	0,978	—	0,010	0,003	0,009
300	0,981	—	0,008	—	0,011
Площадь образца S = 73 см ²					
50	0,972	—	0,018	0,007	0,003
100	0,974	—	0,018	0,004	0,004
200	0,982	—	0,010	0,004	0,004
300	0,989	—	0,007	0,002	0,002
Площадь образца S = 110 см ²					
50	0,954	—	0,031	—	0,015
100	0,950	—	0,030	0,004	0,016
200	0,961	—	0,018	0,009	0,012
300	0,975	—	0,015	—	0,010

При возбуждении разряда без полимерного образца парциальные давления примесей снижались со временем. Об этом же свидетельствовало и уменьшение интенсивностей полос излучения $OH(A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi, \Delta V = 1)$, $CO(b^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi, \Delta V = 1)$

и линии атомов водорода (H_α , $\lambda = 656,3$ нм, $3p^3P \rightarrow 2p^2P^0$). В то же время при обработке полимера интенсивности линии H_α и полос ОН и СО увеличивались, достигая стационарных значений за 30—300 с горения разряда. Необходимо также отметить, что при наличии полимерного образца в реакторе наблюдалось уменьшение отношения интенсивностей линии атомов О ($\lambda = 844,6$ нм, $3p^3P \rightarrow 3s^3S^0$) к интенсивности линии Аг ($\lambda = 811,5$ нм, $4p^3D_3 \rightarrow 4s^3P_2$), а парциальное давление молекул O_2 было ниже предела регистрации масс-спектрометра. Это может быть обусловлено расходом кислорода в реакциях с полимером.

Воздействие плазмы на ткань ведет к частичной деструкции полимера и уменьшению массы образцов. В исследованном диапазоне параметров разряда значения скорости убыли массы, отнесенные к единице площади образца, составляют $(1,8—25) \times 10^{-8}$ г см⁻² с⁻¹ и при фиксированных параметрах обработки уменьшаются с увеличением площади образца. Аналогичные зависимости были получены ранее при обработке пленки и ткани из полиэтилентерефталата в плазме кислорода или воздуха [6], но скорости травления были примерно в 10 раз выше.

Согласно результатам масс-спектральных измерений, основными газообразными продуктами воздействия плазмы аргона на ткань из ПЭТФ являются молекулы водорода, воды и монооксида углерода (см. табл. 1). Увеличение давления аргона ведет к росту скоростей выделения молекул H_2 и СО. Скорости образования молекул воды и характер их изменения с давлением аргона зависят от площади обрабатываемого материала: при относительно малой площади ($S = 18$ см²) скорость уменьшается с ростом давления, но при большей степени загрузки реактора тканью ($S = 73$ см²) значения скорости ниже и проходят с ростом давления через максимум. Отметим, что подобное изменение зависимостей от давления для скоростей выделения газообразных продуктов при увеличении площади обрабатываемого материала наблюдали и при окислительной деструкции пленки полиимида в плазме кислорода [5], а также ткани из волокон ПЭТФ в плазме воздуха [13].

Основными активными агентами плазмы аргона, способными инициировать деструкцию и модифицирование полимеров, являются УФ-излучение ($\lambda = 104,8$ и $106,7$ нм), обусловленное излучательными переходами $Ar(4s^1P_1) \rightarrow hv + Ar(3s^1S_0)$ и $Ar(4s^3P_1) \rightarrow hv + Ar(3s^1S_0)$, а также положительные ионы и метастабильные атомы аргона, которые дезактивируются на ограничивающей плазму поверхности. Оценки плотностей потоков этих активных частиц на стенку реактора были выполнены в работе [9] с использованием

кинетической модели процессов [14] и экспериментальных данных о температуре газа и напряженности электрического поля в плазме. При расчетах не учитывали процессы соударений электронов с молекулами – продуктами гетерогенных реакций. Было найдено, что плотности потоков УФ-квантов на стенку реактора достигают значений $6,0 \times 10^{15}$ см⁻² с⁻¹, а метастабильных атомов Аг — $2,0 \times 10^{16}$ см⁻² с⁻¹, то есть эти активные агенты могут обеспечить наблюдаемые скорости образования газообразных продуктов, в то время как экспериментально найденные плотности потока положительных ионов на стенку примерно на два порядка ниже.

Появление в плазме молекул, продуктов гетерогенных реакций, приводит к изменению набора электронных соударений, что должно влиять на энергетическое распределение электронов, баланс заряженных частиц, тепловой баланс плазмы, а также на скорости образования и потоки активных агентов на поверхность обрабатываемого материала. Анализ механизмов такого влияния требует информации о внутренних параметрах плазмы, реагирующей с полимерами.

Измерения напряженности электрического поля E и температуры газа на оси разряда T_g , интенсивностей излучения компонентов плазмы в отсутствие полимерного материала в реакторе и при обработке образцов ткани различной площади показали следующее. Внесение в плазму образца полимера относительно малой площади ($S = 18$ см²) ведет к уменьшению напряженности поля, поддерживающего плазму, однако дальнейшее увеличение площади образца (и, как следствие, мольных долей газообразных продуктов реакций) сопровождается ростом напряженности поля (см. рис. 1). При одинаковой вложенной в плазму мощности температура газа в плазме с обрабатываемым полимером выше, чем в отсутствие образца (см. рис. 2), увеличение площади материала сопровождается ростом температуры газа (см. табл. 2). Введение в плазму образца с относительно малой площадью (18 см²) приводит к уменьшению приведенной напряженности электрического поля E/N . Однако дальнейшее увеличение площади обрабатываемого материала в реакторе сопровождается ростом E/N (рис. 3).

Эксперименты показали также, что при увеличении площади образца полимера уменьшается интенсивность излучения возбужденных атомов аргона. При этом изменение интенсивностей линий и полос излучения продуктов гетерогенных реакций носит более сложный характер и зависит от тока разряда и давления. Интерпретация этих результатов требует анализа механизмов заселения и дезактивации возбужденных состояний, что составляет задачу следующего этапа исследований.

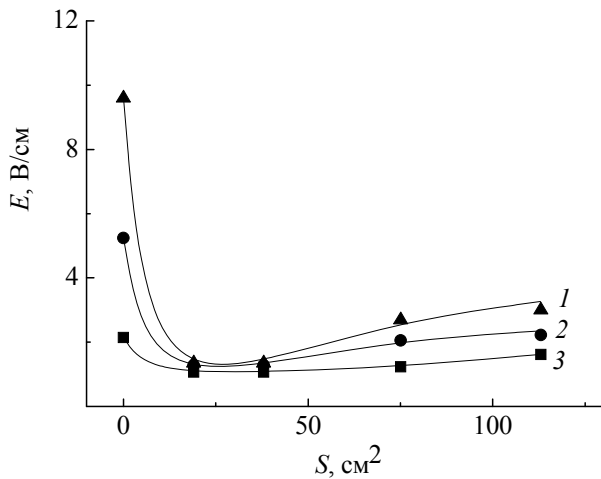


Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля в плазме аргона, взаимодействующей с тканью из ПЭТФ, от площади образца. Ток разряда 50 (1), 80 (2) и 110 мА (3), давление 100 Па.

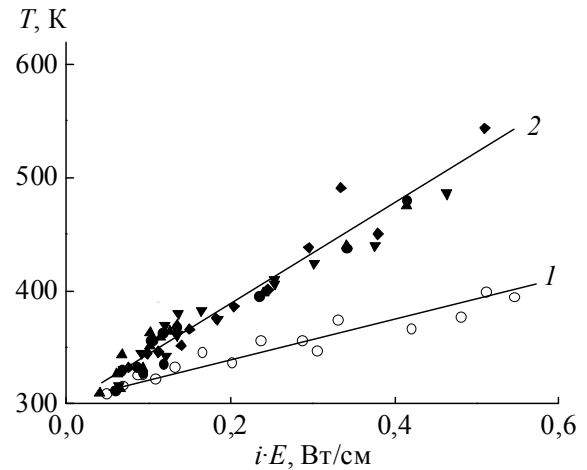


Рис. 2. Зависимость температуры газа в плазме аргона, взаимодействующей с тканью из ПЭТФ, от погонной мощности: 1 — без образца полимера в реакторе, 2 — с образцами ткани площадью от 18 до 111 см².

Таблица 2

Физические характеристики плазмы аргона* в присутствии продуктов деструкции ПЭТФ

Площадь образца, см ²	Суммарная мольная доля продуктов	T _г , К	T _r (N ₂), К	T _r (OH), К	T _r (CO), К	E/N, В×см ²	Средняя энергия электронов, эВ
0	0,013	360±30	370±50	—	—	2,65·10 ⁻¹⁶	5,41
36	0,027	363±20	370±50	400±50	460±50	6,42·10 ⁻¹⁷	3,20
73	0,026	382±25	—	400±50	400±50	1,09·10 ⁻¹⁶	3,08
110	0,050	413±20	—	500±50	420±50	1,27·10 ⁻¹⁶	2,75

* Ток разряда 80 мА, давление 100 Па.

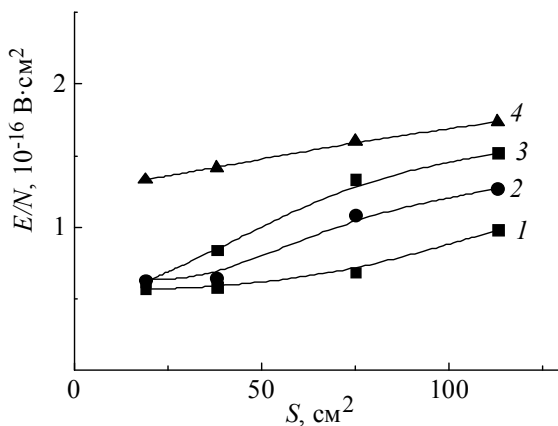


Рис. 3. Зависимость приведенной напряженности электрического поля в плазме аргона, взаимодействующей с тканью из ПЭТФ, от площади образца. Ток разряда 110 (1), 80 (2), 50 (3) и 20 мА (4), давление 100 Па.

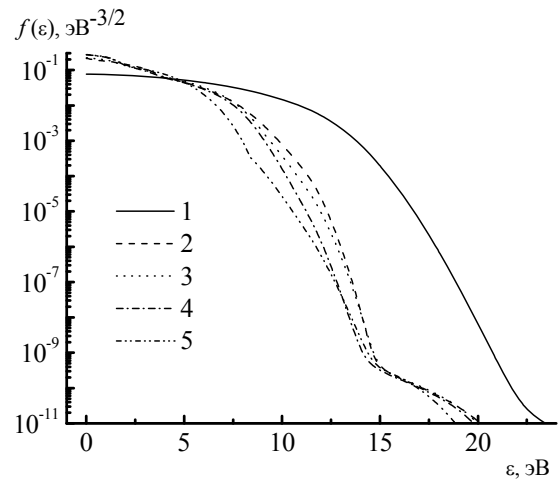


Рис. 4. Функция распределения электронов по энергиям ε в плазме аргона без полимера (1) и в присутствии образца ПЭТФ с площадью 18 (2), 36 (3), 73 (4), 111 см² (5).

На рис. 4 показана функция распределения электронов по энергиям, полученная численным решением кинетического уравнения Больцмана с использованием экспериментальных значений параметра E/N и мольных долей компонентов газовой смеси. Методика расчета приведена в [15], использовались наборы сечений из работ [16—20] для Ag, O₂, CO₂, CO, H₂O, H₂ соответственно.

Расчеты показали, что увеличение мольной доли продуктов деструкции сопровождается уменьшением средней энергии электронов: если в плазме без образца полимера она составляет 5,4 эВ, то при увеличении площади материала от 18 до 111 см² средняя энергия изменяется от 3,24 до 2,75 эВ (табл. 2). Это приводит к уменьшению ко-

эффицентов скоростей пороговых процессов с участием электронов. Например, для возбуждения излучающего уровня $\text{Ar}(4s^3P_1)$ — от $3,8 \times 10^{-12}$ до $1,1 \times 10^{-16} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Заселенности излучающих состояний $4s^3P_1$, $4s^1P_1$ аргона уменьшаются при этом значительно меньше, поскольку решающий вклад в их заселение, по-видимому, дает ступенчатое возбуждение через метастабильные уровни $\text{Ar}(4s^3P_2)$, $\text{Ar}(4s^3P_0)$.

Заключение

Полученные в работе данные показывают, что из-за выделения газообразных продуктов гетерогенных реакций обработка полимеров происходит в плазме смеси аргона с молекулярными продуктами деструкции, мольные доли которых зависят не только от параметров разряда, но и от площади обрабатываемого материала. Изменение состава газовой фазы существенно влияет на физические характеристики плазмы: температуру газа, приведенную напряженность электрического поля, функцию распределения электронов по энергиям. В результате изменяются коэффициенты скоростей и скорости процессов с участием электронов, а также заселенности возбужденных состояний атомов аргона.

Появление в спектрах излучения линий атомов кислорода, водорода и полос радикалов ОН показывает, что диссоциация и возбуждение молекулярных продуктов гетерогенных реакций изменяет состав активных частиц плазмы, способных реагировать с полимером.

Детальный анализ механизмов влияния продуктов гетерогенных реакций на генерацию активных частиц плазмы требует принимать во внимание элементарные процессы с участием продуктов деструкции полимеров, что составляет задачу дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных ис-

следований и Правительства Ивановской области в рамках научного проекта № 15-42-03124-р-центр-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутенов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. — М.: Наука, 2004.
2. Morent R., De Geyter N., Verschuren J., De Clerck K., Leys C. // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202. No. 14. P. 3427.
3. Гильман А. Б. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 1. С. 20.
4. Khulbe K. C., Feng C., Matsuura T. // J. Appl. Polymer Sci. 2010. Vol. 115. No. 2. P. 855.
5. Максимов А. И., Рыбкин В. В., Кувалдина Е. В. // Химия высоких энергий. 1995. Т. 29. № 1. С. 60.
6. Титов В. А., Рыбкин В. В., Смирнов С. А. // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 3. С. 218.
7. Смирнов С. А., Титов В. А., Рыбкин В. В. // Российский химический журнал. 2013. Т. LVII. № 3. С. 52.
8. Nelea V., Vasilets V. N., Skurat V. E., Truica-Marasescu F., Wertheimer M. R. // Plasma Process. Polym. 2010. Vol. 7. No. 6. P. 431.
9. Джбааи К. А., Шикова Т. Г., Титов В. А., Ларина Ю. Н. // Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. № 6. С. 58.
10. Иванов Ю. А., Лебедев Ю. А., Полак Л. С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. — М.: Наука, 1981.
11. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2006.
12. Рыбкин В. В., Кувалдина Е. В., Смирнов С. А., Титов В. А., Иванов А. Н. // Химия высоких энергий. 1999. Т. 33. № 6. С. 463.
13. Кувалдина Е. В., Рыбкин В. В., Титов В. А., Иванов А. Н. // Химия высоких энергий. 2000. Т. 34. № 6. С. 456.
14. Смирнов С. А., Рыбкин В. В., Иванов А. Н., Титов В. А. // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 3. С. 333.
15. Diany A.-M., Legrand J.-C., Rybkin V. V., Smirnov S. A. // Contrib. Plasma Phys. 2005. Vol. 45. No. 1. P. 5.
16. Puech V., Torchin L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1986. Vol. 19. No. 12. P. 2309.
17. Kajita S., Ushiroda S., Kondo V. // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67. No. 9. P. 4015.
18. Itikawa Y. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. Vol. 31. No. 3. P. 749.
19. Land J. E. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. P. 5716.
20. Рыбкин В. В., Титов В. А., Холодков И. В. // Изв. высш. учеб. заведений. Химия и хим. технология. 2008. Т. 51. № 3. С. 3.
21. Tawara H., Itikawa Y., Nishimura H., Yoshino M. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1990. Vol. 19. No. 3. P. 617.

Influence of gas products of heterogeneous reactions on parameters of the argon plasma

S. A. Smirnov¹, V. A. Titov², T. G. Shikova¹, A. A. Ovtsyn¹, and D. V. Kadnikov¹

¹ Ivanovo State University of Chemistry and Technology
7 Sheremetevskii av., Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: sas@isuct.ru

² G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry, Russian Academy of Sciences
1 Akademicheskaya str., Ivanovo, Russia
E-mail: titov25@gmail.com

Received July 13, 2016

Experimental data on plasma parameters and gaseous products composition at the treatment of poly(ethylene terephthalate) fabric in low pressure (50—300 Pa) argon plasma are represented. Optical emission spectroscopy and mass-spectrometry methods were used for gas phase analysis. Electric field strength and gas temperature at the discharge axis and mole fractions of polymer destruction products were measured at different square of material been treated in the reactor. Electron energy distribution function was calculated. Reduced electric field strength, gas temperature, average electron energy and rate coefficients for electron assisted processes have been shown to change with the growth of polymer square in reactor. Plasma optical emission spectra showed the dissociation of polymer destruction products results in alteration of plasma active species composition: namely, formation of O and H atoms and OH radicals.

PACS: 52.40 Hf

Keywords: plasma, argon, emission spectroscopy, mass-spectrometry, electric field strength, gas temperature, electron energy distribution function, gas products, poly(ethylene terephthalate).

REFERENCES

1. A. M. Kutepov, A. G. Zakharov, and A. I. Maximov *Vacuum-Plasma and Plasma-Solution Modification of Polymer Materials*. (Moscow, Nauka, 2004) [in Russian].
2. R. Morent, N. De Geyter, J. Verschuren, K. De Clerck, and C. Leys, *Surf. Coat. Technol.* **202**, 3427 (2008).
3. A. B. Gilman, *High Energy Chemistry* **37**, 17 (2003).
4. K. C. Khulbe, C. Feng, and T. Matsuura, *J. Appl. Polymer Sci.* **115**, 855 (2010).
5. A. I. Maximov, V. V. Rybkin, and E. V. Kuvaldina, *High Energy Chemistry* **29**, 56 (1995).
6. V. A. Titov, V. V. Rybkin, and S. A. Smirnov, *High Energy Chemistry* **43**, 172 (2009).
7. S. A. Smirnov, V. A. Titov, and V. V. Rybkin, *Rus. J. General Chemistry* **85**, 1260 (2015).
8. V. Nelea, V. N. Vasilets, V. E. Skurat, F. Truica-Marasescu, and M. R. Wertheimer, *Plasma Process. Polym.* **7**, 431 (2010).
9. K. A. Dzhbaai, T. G. Shikova, V. A. Titov, and Yu. N. Larina, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* **57** (6), 58 (2014).
10. Yu. A. Ivanov, Yu. A. Lebedev, and L. S. Polak, *Methods of Contact Diagnostics in the Nonequilibrium Plasmochemistry* (Moscow, Nauka, 1981) [in Russian].
11. V. N. Ochkin, *Spectroscopy of Low-Temperature Plasma* (Nauka, Moscow, 2006) [in Russian].
12. V. V. Rybkin, E. V. Kuvaldina, S. A. Smirnov, V. A. Titov, and A. N. Ivanov, *High Energy Chemistry* **33**, 409 (1999).
13. E. V. Kuvaldina, V. V. Rybkin, V. A. Titov, and A. N. Ivanov, *High Energy Chemistry* **34**, 398 (2000).
14. S. A. Smirnov, V. V. Rybkin, A. N. Ivanov, and V. A. Titov, *High Temperature* **45**, 291 (2007).
15. A.-M. Diemy, J.-C. Legrand, V. V. Rybkin, and S. A. Smirnov, *Contrib. Plasma Phys.* **45**, 5 (2005).
16. V. Puech and L. Torchin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **19**, 2309 (1986).
17. S. Kajita, S. Ushiroda, and V. Kondo, *J. Appl. Phys.* **67**, 4015 (1990).
18. Y. Itikawa, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **31**, 749 (2002).
19. J. E. Land, *J. Appl. Phys.* **49**, 5716 (1978).
20. V. V. Rybkin, V. A. Titov, and I. V. Kholodkov, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Technol.* **51** (3), 3 (2008).
21. H. Tawara, Y. Itikawa, H. Nishimura, and M. Yoshino, *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **19**, 617 (1990).