

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Люшкевич*, С. В. Гончарик, В. В. Парашук, И. И. Филатова

УДК 533.9.08;621.039.66

Институт физики НАН Беларуси,
Минск, Беларусь; e-mail: v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 20 февраля 2023)

Изучено влияние свойств обработанных плазмой диэлектрического барьерного разряда (ДБР) гранулированных материалов (катализатора ZnO, морской соли NaCl) и семян растений на режимы горения и мощность разряда. Методами оптической эмиссионной спектроскопии исследована пространственная структура ДБР. Из анализа распределения интенсивности в неразрешенных по вращательной структуре полосах $(2+) N_2$ и $(1-) N_2^+$ определены усредненные по поперечному сечению разрядного промежутка электронная, колебательная и вращательная температуры плазмы. В присутствии обрабатываемых материалов имеет место переход от филаментарного режима горения ДБР к комбинации филаментарного и поверхностного разрядов, что сопровождается увеличением потребляемой электрической мощности и колебательной температуры плазмы в приэлектродной области в окрестности наполнителя.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, диэлектрический барьерный разряд, оптическая эмиссионная спектроскопия, плазменная обработка, катализатор, семена растений.

The effect of the properties of granular materials (catalyst ZnO, sea salt NaCl) and plant seeds during their treatment in plasma of dielectric barrier discharge (DBD) on the combustion mode and discharge power was investigated. Optical emission spectroscopy methods were used to investigate the discharge spatial structure. Electron, vibrational, and rotational temperatures of plasma averaged over the cross section of the discharge gap were determined from the analysis of intensity distribution in rotationally unresolved spectral bands of $(2+) N_2$ and $(1-) N_2^+$. It was observed a transition from the DBD filamentary mode to the combination of filamentary and surface discharges when the treated materials were presented in the discharge that was accompanied by an increase in the power dissipated in the discharge and the vibrational temperature in the near-electrode region in the vicinity of the material.

Keywords: low temperature plasma, dielectric barrier discharge, optical emission spectroscopy, plasma treatment, catalyst, plant seeds.

Введение. Многие современные технологии обработки материалов включают в себя процессы плазменной модификации, обеспечивающей эффективное и целенаправленное изменение их физико-химических свойств, экономичность и экологическую безопасность обработки. Для широкого круга приложений, таких как модификация и обеззараживание поверхностей [1—3], осаждение [4], фотокатализ [5—8], наиболее востребован диэлектрический барьерный разряд (ДБР), позволяющий создавать неравновесные плазменные среды в газах при атмосферном и пониженном давлении, обладающие филаментарной или однородной структурой, с возможностью их масштабирования для обработки поверхностей различного профиля и площади [8—10]. В последние годы активно развиваются направления, связанные с использованием плазмы ДБР для обработки продуктов питания [11, 12], различных природных объектов, включая семена растений [13—16].

INVESTIGATION OF PLASMA PARAMETERS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A BARRIER DISCHARGE DURING PLASMA TREATMENT OF GRANULAR MATERIALS

V. A. Lyushkevich*, S. V. Goncharik, V. V. Parashchuk, I. I. Filatova (B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by)

Эффективность обработки материалов в плазме ДБР с целью модификации их физико-химических и функциональных свойств в значительной степени зависит от амплитуды и частоты иницирующего разряда электрического напряжения, конфигурации электродной системы, режимов разряда, материала и толщины диэлектрического барьера [17—21]. В свою очередь присутствие в плазме обрабатываемых образцов может влиять на режимы горения и энергетические параметры разряда [22—27]. Как особый случай следует выделить обработку плазмой ДБР сыпучих (гранулированных) объектов, к которым относятся каталитические порошковые материалы, а также семена растений. Удельная проводимость материала наполнителя (порошков, гранул) существенно зависит от его диэлектрических свойств, степени пористости, конфигурации упаковки, что также влияет на характер плазмообразования ДБР. Результаты численного моделирования барьерного разряда в реакторах в присутствии наполнителя применительно к задачам плазменного катализа свидетельствуют о существенном влиянии диэлектрической проницаемости слоя на распределение электрических полей в локальных зонах между гранулами наполнителя и, следовательно, на эффективность протекающих вблизи обрабатываемой поверхности плазмохимических реакций [27]. Увеличение количества микроразрядов в зонах между гранулами наполнителя наблюдалось экспериментально в [28]. Подобные результаты получены в работе [29], где исследованы электрические характеристики ДБР в присутствии в плазме семян растений и показано, что электрическая емкость семенного слоя влияет на образование реактивных форм кислорода и азота в окрестности точек контакта между отдельными гранулами. Ранее было показано, что обработка плазмой ДБР фотокатализаторов на основе оксида цинка повышает их каталитическую активность [30], а воздействие плазмы ДБР на семена озимой пшеницы способствует увеличению всхожести, снижению зараженности семян и улучшению морфометрических характеристик проростков [31].

Для совершенствования существующих конструкций плазменных реакторов на основе ДБР, оптимизации режимов обработки материалов и прогнозируемого изменения их свойств требуется комплексный анализ совокупности протекающих в разряде физико-химических процессов с учетом синергетики взаимодействия возбуждаемой плазмы с обрабатываемыми объектами. Длительность обработки различных объектов в плазме ДБР, как правило, варьируется в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от типа материала. При этом параметры разряда (режим горения, рассеиваемая в разряде мощность, характеристики микроразрядов) могут изменяться во времени, что также следует учитывать и контролировать в процессе воздействия на материал.

В настоящей работе исследовано влияние обрабатываемых в плазме ДБР в воздухе при атмосферном давлении каталитических порошковых материалов и биологических растительных объектов на динамику изменения энергетических характеристик разряда в процессе обработки, электронную T_e , колебательную T_{vib} , газовую T_g температуры плазмы, знание которых необходимо для оценки баланса и перераспределения потерь вкладываемой в разряд энергии по основным каналам, в том числе в поступательную энергию тяжелых частиц, что важно при обработке термочувствительных объектов.

Экспериментальная установка и методы исследований. Схема экспериментальной установки на основе ДБР для электрофизических и оптико-спектроскопических измерений представлена на рис. 1. Разряд возбуждался в разрядной камере (РК) между двумя плоскопараллельными электродами. Верхний электрод 1, изготовленный из металлической проволочной сетки толщиной ~100 мкм (размер ячейки 1.4×1.4 мм), размещался внутри стеклянной чашки Петри 2, дно которой служило диэлектрическим барьером толщиной ~1.5 мм. Нижний электрод 3 изготовлен из меди. Расстояние между электродами 3 мм. Напряжение питания с амплитудой ~20 кВ подавали на сетчатый электрод 1 от генератора высоковольтных импульсов, запуск которого осуществлялся от внешнего генератора прямоугольных импульсов Г5-54, работающего на частоте $f \approx 1$ кГц. Длительность запускающих импульсов ~25 мкс. В качестве источника питания генератора высоковольтных импульсов применен специально изготовленный мощный блок питания с выходным напряжением <450 В и током до ~1 А.

Обрабатываемые образцы (фотокатализатор — полупроводниковый порошок ZnO марки ЭКОС-1, морская соль NaCl, семена пшеницы, клевера, мака) в процессе воздействия размещались на нижнем электроде. Занимаемый наполнителем ZnO объем составлял ~2/3 от общего объема РК. Семена размещались в один слой толщиной ~2 мм для пшеницы, ~1.2 мм для клевера, ~0.9 мм для мака. Толщина слоя морской соли ~2.5 мм. Разряд возбуждался в воздухе при атмосферном давлении для всех исследуемых режимов. Изображение разряда регистрировали с помощью цифровой фотокамеры 4 Canon PowerShot SX50HS. Температуру обрабатываемого материала контролировали с помощью тепловизора FLIR E63900.

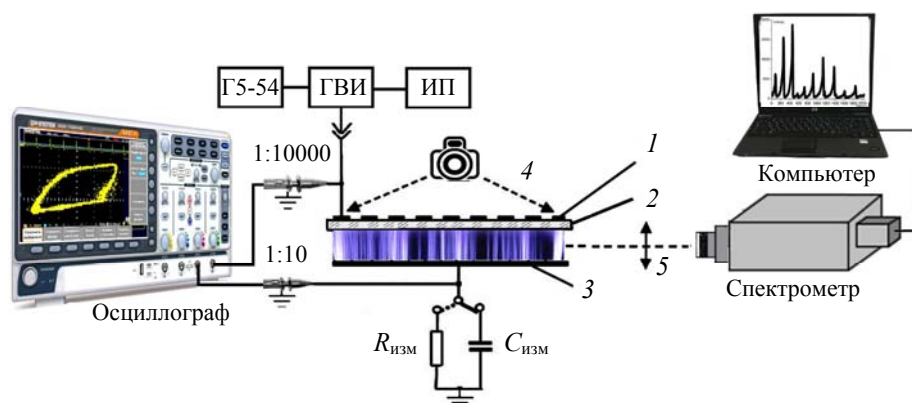


Рис. 1. Схема диэлектрического барьерного разряда и диагностического блока для оптико-спектроскопических и электрофизических исследований: 1 — металлический проволочный электрод, 2 — стеклянная пластина (чашка Петри), 3 — медный электрод, 4 — цифровая фотокамера, 5 — кварцевый объектив, Г5-54 — генератор последовательностей импульсов, ГВИ — генератор высоковольтных импульсов напряжения, ИП — источник питания, $C_{изм}$ — конденсатор для измерений перемещенного заряда в разряде, $R_{изм}$ — резистор для измерений тока разряда

Для исследования электрических характеристик ДБР использован цифровой запоминающий осциллограф GDS-72204E (Good Will Instrument Co., Ltd., Тайвань). В зависимости от режима измерений к нижнему электроду подключали конденсатор емкостью $C_{изм} \approx 27.6$ нФ для определения перемещенного заряда или резистор $R_{изм} \approx 76$ Ом для измерения тока разряда. Один канал осциллографа подключен через делитель высокого напряжения и пробник с общим коэффициентом деления 1:10000 к верхнему электроду, второй — через осциллографический делитель 1:10 (пробник ГТР-300А-4) к измерительному конденсатору $C_{изм}$ или резистору $R_{изм}$. Ток разряда рассчитан по измеренному падению напряжения на резисторе $R_{изм}$, перемещенный через разрядный промежуток электрический заряд $Q(t)$ — по измеренному на конденсаторе $C_{изм}$ падению напряжения.

Динамика мощности в процессе горения разряда исследована для разрядного промежутка 3 мм в течение 10 мин для случая отсутствия обрабатываемых материалов в разрядном промежутке и при обработке семян клевера, пшеницы, мака, порошка ZnO и морской соли NaCl. Вложенная в течение полного цикла разряда электрическая энергия E_{el} определена из площади фигуры Лиссажу, построенной в координатах перемещенный заряд (Q)—напряжение (U), согласно методике [2]:

$$E_{el} = \oint U(t) dQ. \quad (1)$$

Мощность, выделяемая в разрядной ячейке, оценена по формуле:

$$P = E_{el} f, \quad (2)$$

где f — частота разряда.

Компонентный состав, электронная, колебательная и вращательная температуры плазмы определены методами оптической эмиссионной спектроскопии. Спектры излучения плазмы регистрировали с использованием построенного по схеме Черни—Тернера спектрометра MC250 со встроенным приемником излучения U2C-16H10141-19 (ООО “ЭЛМИНС СР”) на основе термостабилизированной ПЗС-матрицы S10141-1109S-01 (Hamamatsu) в диапазоне 200—1100 нм. Пространственное разрешение по высоте межэлектродного промежутка 0.018 мм/пиксель. Интегральное по лучу зрения излучение плазмы собиралось на входной щели спектрометра с помощью кварцевого объектива 5. Таким образом, учитывая неоднородность плазменного образования в филаментарном режиме ДБР, оценивали усредненные по лучу зрения в сечении, перпендикулярном плоскости электродов, параметры плазмы. Электронную температуру T_e определяли с помощью методики [32] путем сопоставления экспериментально измеренных соотношений пиковых интенсивностей излучения I^{391}/I^{394} в полосах молекулярного иона азота N_2^+ (переход $B^2\Sigma_g^+ (v=0) \rightarrow X^2\Sigma_g^+ (v=0)$, $\lambda = 391.4$ нм) и молекулы N_2 (переход $C^3\Pi_u (v=2) \rightarrow B^3\Pi_g (v=5)$, $\lambda = 394.3$ нм) с расчетными данными [32, 33], где приведены

соответствующие зависимости $I^{391}/I^{394} = f(T_e)$, полученные в рамках столкновительно-радиационной модели плазмы, характерной для условий горения возбуждаемого ДБР.

Колебательную температуру плазмы T_{vib} рассчитывали по относительным интенсивностям электронно-колебательных полос (2+) системы молекулы N_2 , зарегистрированных в диапазоне 365—381 нм (секвенция $v = -2$):

$$\ln \frac{I_{v'v''}}{v_{v'v''}^4 q_{v'v''}} = -\frac{G(v')}{0.6925 T_{\text{vib}}} + C, \quad (3)$$

где $G(v')$ — энергия верхнего колебательного уровня (см^{-1}); $I_{v'v''}$ — интенсивность излучения в полосе; $v_{v'v''}$ — частота перехода; v' и v'' — номер колебательного уровня верхнего и нижнего состояний; $q_{v'v''}$ — фактор Франка—Кондона; C — постоянная [34].

Газовую температуру плазмы T_g определяли путем сравнения экспериментально зарегистрированных контуров неразрешенных по вращательной структуре электронно-колебательно-вращательных полос (2+) системы N_2 и рассчитанных с помощью программы SPECAIR [34] для различных T_g контуров соответствующих полос. Соответствие измеряемых значений вращательной температуры T_{tot} газовой температуре T_g плазмы ДБР следует из соотношения $\tau_c \gg \tau_{\text{RT}}$, где τ_c — время жизни возбужденного электронно-колебательного состояния $N_2(C^3\Pi_u)$ с учетом его тушения при межмолекулярном взаимодействии, τ_{RT} — время вращательно-поступательной релаксации состояния $N_2(C^3\Pi_u)$ [35].

Результаты и их обсуждение. Изображения свечения барьерного разряда в плоскости электродов и (Q - U)-диаграммы в отсутствие наполнителя в разрядной камере и при внесении в РК обрабатываемых образцов приведены на рис. 2. Осциллограммы тока $i(t)$ и падения напряжения на разрядном промежутке $U(t)$ представлены на рис. 3.

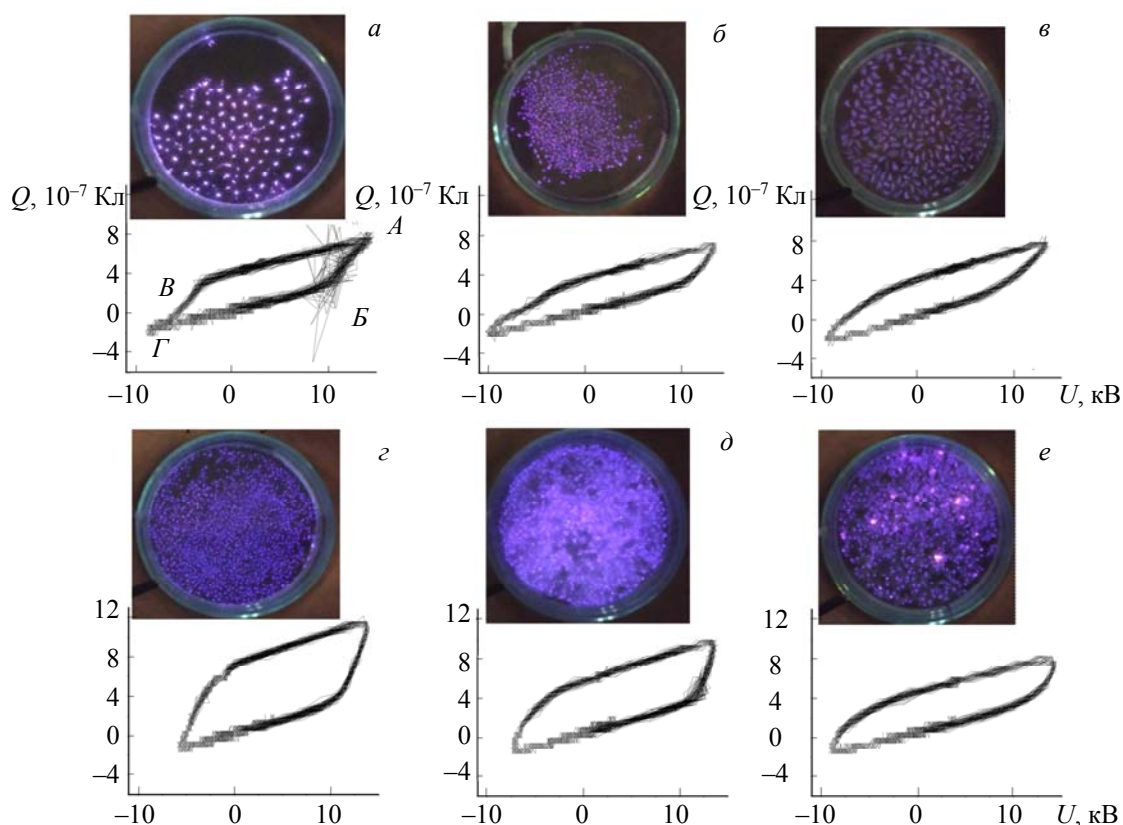


Рис. 2. Фигуры Лиссажу (AB , $BГ$ — в период горения разряда; BA , $ГБ$ — в отсутствие разряда) и фотоизображения ДБР в отсутствие в разрядном промежутке образцов (a) и в процессе обработки семян клевера (b), пшеницы (v), мака (z), порошка ZnO (d) и гранул $NaCl$ (e)

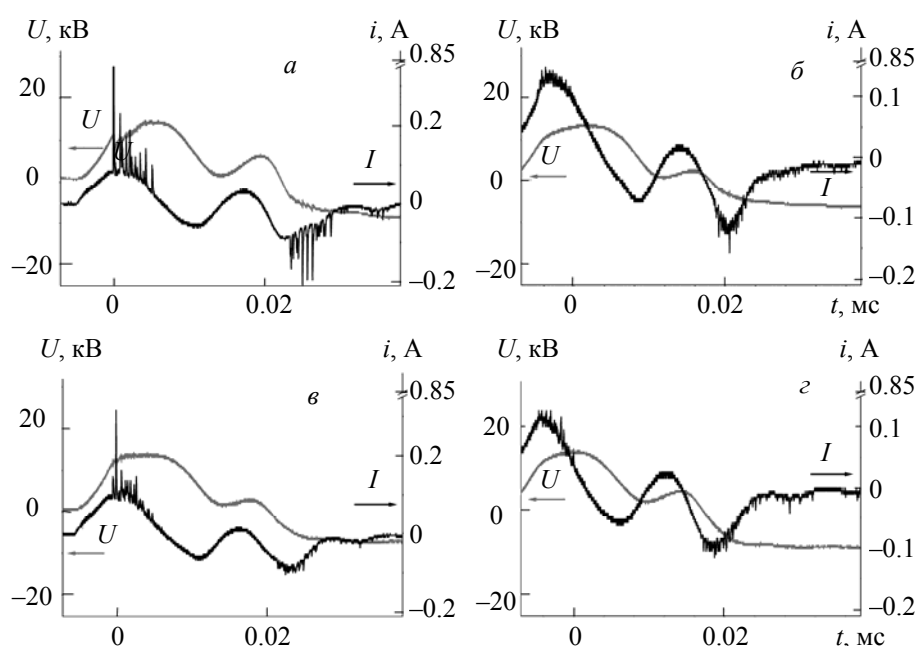


Рис. 3. Осциллограммы напряжения питания $U(t)$ и тока $i(t)$ диэлектрического барьерного разряда в отсутствие наполнителя (a) и в процессе обработки семян мака ($б$), порошка ZnO ($в$) и кристаллов NaCl ($г$)

В отсутствие наполнителя наблюдается филаментарный режим горения ДБР. Разряд представляет собой совокупность микроразрядов, распределенных по поверхности электродов. На осциллограмме тока отчетливо видны многочисленные пики с амплитудой до 0.8 А (рис. 3, a), а фигура Лиссажу имеет характерную форму параллелограмма (рис. 2, a) [2]. При помещении в разрядный промежуток обрабатываемых материалов амплитуда тока микроразрядов существенно снижается (рис. 3, $б—г$), интенсивность свечения разряда становится более однородной, при этом фигура Лиссажу приобретает миндалевидную форму (рис. 2, $б—г$), характерную для ДБР с уплотненным слоем, а также для поверхностного ДБР [36, 37].

Динамика изменения мощности P представлена на рис. 4. В отсутствие в РК наполнителя $P = 6$ Вт, в присутствии образцов значения P заметно возрастают и существенно различаются для разных обрабатываемых объектов. Для одной группы образцов (семена клевера, пшеницы) мощность в течение первых 2 мин горения разряда практически не отличается от значений, реализуемых в отсутствие наполнителя, для другой группы (семена мака, ZnO, NaCl) варьируется в диапазоне 9—11 Вт.

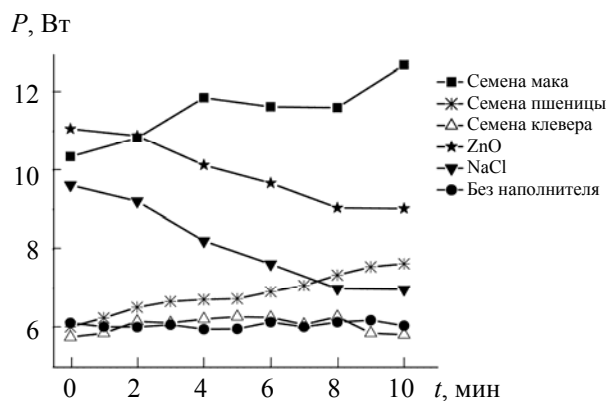


Рис. 4. Динамика изменения потребляемой электрической мощности ДБР в отсутствие и при наличии в разрядном промежутке обрабатываемых образцов

Из анализа Q - U -диаграмм (рис. 2) оценена общая емкость реактора (отношение dQ/dU) в период неактивной фазы (BA , в отсутствие разряда) $C_{\text{неакт}}$ и в активной фазе (AB , в период горения разряда) $C_{\text{акт}}$. Значение $C_{\text{неакт}}$ характеризует последовательную цепочку емкости диэлектрика, воздушного промежутка до наполнителя и параллельного соединения емкостей наполнителя и воздушного зазора между его гранулами. Емкость $C_{\text{акт}}$ соответствует последовательному включению емкости диэлектрика и емкости той части разрядного промежутка, на которую не распространяется область разряда, включая соответствующие зоны наполнителя [29] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Рассчитанные емкости реактора в активной $C_{\text{акт}}$ и неактивной $C_{\text{неакт}}$ фазах разряда

Материал	$C_{\text{неакт}}$, пФ	$C_{\text{акт}}$, пФ
Разрядный промежуток без наполнителя: воздух + диэлектрик	24.7	130
Обработка семян пшеницы	29.6	110
Обработка семян клевера	26.6	172
Обработка гранул NaCl	26.3	211
Обработка семян мака	29.4	261
Обработка порошка ZnO	27.9	289

Спектры излучения разряда представлены преимущественно молекулярными полосами N_2 (вторая (2+) и первая (1+) положительные системы), N_2^+ (первая отрицательная (1-) система) и NO (γ -система) (рис. 5). Структура разряда вдоль межэлектродного промежутка L в отсутствие наполнителя и при наличии образцов (на примере порошка ZnO) проанализирована по распределениям интенсивности в максимуме излучения полос $N_2(2+)$ (380.4 нм) и $N_2^+(1-)$ (391.4 нм) (рис. 6, а). Распределения электронной, колебательной, вращательной температур плазмы в межэлектродном промежутке представлены на рис. 6, б—г.

Анализ фотоизображений барьерного разряда свидетельствует об изменении его вида и характеристик при размещении на нижнем электроде обрабатываемых образцов. Разряд становится более однородным, отдельные микроаряды возникают между гранулами наполнителя (семенами, частичками порошка, кристаллами) и электродами в зонах с наибольшей шероховатостью поверхности слоя [22]. В целом интенсивность свечения микроарядов значительно ниже, чем в отсутствие наполнителя в РК, что проявляется на осциллограммах тока: в присутствии порошка ZnO амплитуда пиков тока снижается в два раза (рис. 3, в), при обработке семян — в 10 раз и более (рис. 3, б, г), при этом количество мелких пиков возрастает, что, по-видимому, связано с возникновением микроарядов в зонах между частицами наполнителя либо рядом с ними [28, 30, 37, 38]. В [28] также сообщается

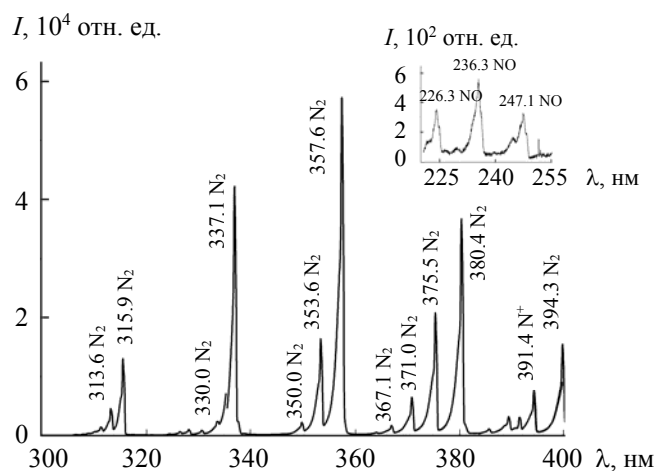


Рис. 5. Спектр излучения плазмы ДБР в воздухе в диапазоне 220—400 нм

об увеличении количества микрозарядов в окрестности точек соприкосновения между гранулами наполнителя, что обусловлено локальным увеличением напряженности электрического поля в этих зонах, которое зависит от расстояния между точками соприкосновения наполнителя (плотности упаковки). В [27] при моделировании реактора ДБР с уплотненным слоем, представленным в виде модельных шарообразных объектов, показано, что электрическое поле усиливается вблизи точек контакта между такими объектами вследствие их поляризации. Материал с более высокой диэлектрической проницаемостью оказывает более существенное влияние на распределение электрического поля в разряде [37, 38]. Увеличение интенсивности диффузного свечения ДБР, связанного с возникновением поверхностных микрозарядов, наблюдается также в присутствии образцов с наибольшей диэлектрической проницаемостью (порошок ZnO, кристаллы NaCl) (рис. 2, *д, е*). В присутствии семян клевера и пшеницы поверхностный разряд визуально практически повторяет топографию отдельных зерен (рис. 2, *б, в*). Особенности плазмообразования в реакторах ДБР в присутствии семян растений рассмотрены в работе [29], где в качестве важных критериев преимущественного образования плазмы в некоторых междоузлиях наполнителя названы расстояние между точками соприкосновения зерен, наличие локальных пиковых эффектов из-за топографии слоя, наличие тройных точек соприкосновения семя—диэлектрический барьер—плазмообразующий газ, или семя—электрод—плазмообразующий газ.

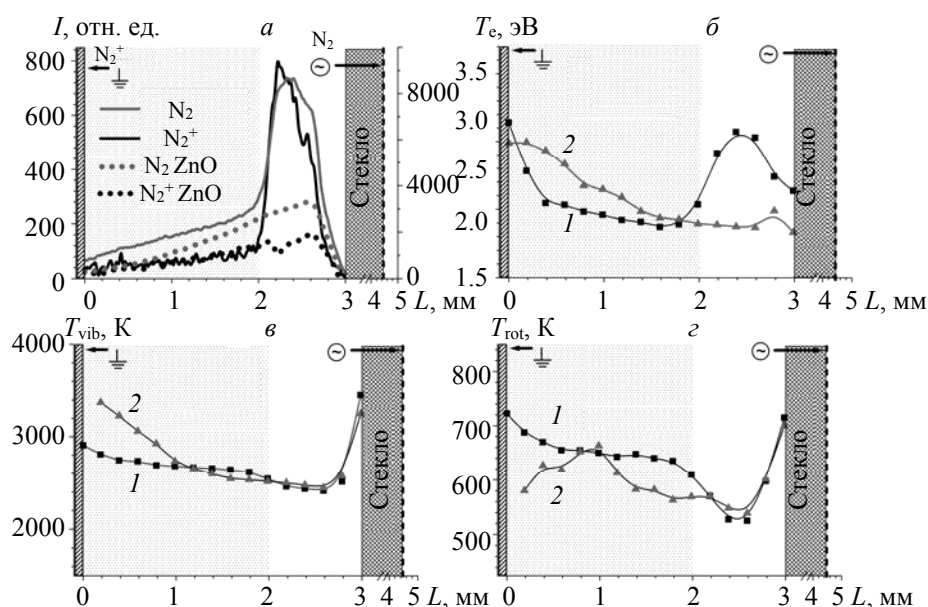


Рис. 6. Распределение интенсивности излучения в полосах (2+) N_2 и (1–) N_2^+ (*а*), электронной (*б*), колебательной (*в*), вращательной (*г*) температур по высоте разрядного промежутка L в отсутствие наполнителя (1) и в процессе обработки порошка ZnO (2)

Наблюдаемое на осциллограммах тока $i(t)$ снижение амплитуды пиков отдельных микрозарядов с одновременным увеличением количества низкоинтенсивных микрозарядов в присутствии образцов связано, по-видимому, со снижением напряженности электрического поля в газовом промежутке между диэлектриком и наполнителем при одновременном увеличении его локальных значений в точках контакта между частицами наполнителя (рис. 3).

Изменение локальных значений электрического поля в межэлектродном промежутке в присутствии наполнителя проявлялось в изменении характера распределения интенсивности излучения $I(L)$ в молекулярных полосах N_2 (2+) и N_2^+ (1–), а также электронной и колебательной температур плазмы (рис. 6). Максимальные интенсивности $I^{391}(L)$ и $I^{394}(L)$ и электронной температуры $T_e(L)$ в отсутствие обрабатываемых образцов (порошка ZnO) зарегистрированы в области высоковольтного электрода, что, по-видимому, связано с накоплением зарядов на диэлектрике и образованием высокоэнергетических электронов в этой зоне, способных возбуждать электронные состояния молекул азота. Распределения колебательной $T_{vib}(L)$ и вращательной $T_{tot}(L)$ температур практически однородны в межэлек-

тродном промежутке с незначительным повышением в окрестности диэлектрика. При помещении на нижний электрод порошка ZnO значения $T_e(L)$ и $\bar{P}^{91}(L)$, $\bar{P}^{94}(L)$ в окрестности диэлектрика снижались, оставаясь практически неизменными в зоне, примыкающей к слою порошка. Колебательная и вращательная температуры, напротив, несколько увеличиваются вблизи обрабатываемого образца (рис. 6, в). Как известно, скорость возбуждения колебательных уровней молекул пропорциональна концентрации электронов, а электроны с энергией $\sim 1\text{--}3$ эВ эффективно возбуждают колебательные уровни молекул азота в основном электронном состоянии $N_2(X^1\Sigma_g^+)$. Таким образом, можно предположить, что присутствие в плазме катализатора ZnO способствует увеличению концентрации высокоэнергетических электронов за счет усиления электрического поля в локальных зонах между частицами порошка и приводит к образованию химически активных частиц, участвующих в плазмохимических реакциях на поверхности материала и обеспечивающих более эффективную его обработку. О влиянии присутствия в плазме ДБР наполнителя — катализатора TiO_2 — на функцию распределения электронов по энергиям и повышению колебательной температуры молекул азота $N_2(X^1\Sigma_g^+)$ сообщалось в [39].

Усредненные по ширине разрядного промежутка значения вращательной температуры составляют ~ 600 К, что соответствует T_{rot} в центральной зоне отдельных микроразрядов (~ 700 К [40]), тогда как в диффузной области ДБР обычно $T_{rot} \leq 350$ К [41]. Температура семян, оцененная с помощью тепловизора в процессе их обработки в течение 5 мин, не превышает 323 К, что свидетельствует о незначительном нагреве материалов при обработке в плазме ДБР и подтверждает данные о том, что усредненные по пространству значения газовой температуры ДБР близки к комнатной температуре [42]. Значительная разница между колебательной и вращательной температурами свидетельствует о неравновесности плазмы ДБР и диссипации основной части вкладываемой мощности в колебательные степени свободы молекул.

В присутствии образцов форма фигур Лиссажу существенно изменяется (рис. 2, в). Максимальная мощность наблюдается при внесении в РК порошка ZnO, семян мака, NaCl, для которых оценена максимальная емкость в активной фазе $C_{акт}$ (табл. 1). Увеличение мощности можно объяснить образованием дополнительных микроразрядов в окрестности точек контакта между частицами наполнителя, где напряженность электрического поля намного выше, чем среднее значение в реакторе, и наличием поверхностных разрядов. По мере увеличения размера частиц количество точек контакта уменьшается, изменяется плотность упаковки и могут работать другие критерии преимущественного образования плазмы в некоторых междоузлиях наполнителя, в частности семя—электрод—плазмообразующий газ, что может приводить к увеличению преимущественного возникновения поверхностного разряда и снижению доли объемного, как это наблюдалось в присутствии семян клевера и пшеницы (рис. 2, б, в). Уменьшение размера частиц упаковки вызывает увеличение количества переносимого заряда [43], что способствует более эффективной генерации электронов и химически активных веществ. Кроме того, диэлектрические барьеры с более развитой (рифленой) поверхностью характеризуются большей емкостью в барьерном разряде, так как накопленные на диэлектрике заряды распределяются по большей площади [44]. Поскольку диэлектрические свойства всех исследуемых семян различаются незначительно (относительная диэлектрическая проницаемость пшеницы, мака и клевера $\epsilon = 2.03, 2.97$ и 3.1 соответственно), разницу в мощности ДБР в присутствии этих образцов можно объяснить различием их размера. Так, в реакторе ДБР в присутствии слоя семян мака с наименьшими размерами формируется более развитая поверхность наполнителя с большей емкостью. Это объясняет существенное увеличение потребляемой мощности. Однако диэлектрические свойства зерновых культур могут изменяться в зависимости от плотности зерновой смеси, сорта, наличия предварительной обработки (сушки, обеззараживания и т. д.), влажности, присутствия примесей и влияния других факторов. Диэлектрические проницаемости семян возрастают при повышении температуры, а при большем содержании влаги в зерне эти процессы ускоряются [45]. Изменение мощности в процессе обработки семян (рис. 2, в) может быть связано с изменением их электрофизических свойств, которые существенно зависят от влажности и температуры.

Закключение. Исследованы изменения режима горения, электрических характеристик и параметров плазмы планарного диэлектрического барьерного разряда, возбуждаемого на частоте $f \approx 1$ кГц в разрядном промежутке миллиметрового диапазона (~ 3 мм) в воздухе при атмосферном давлении, в зависимости от электрофизических свойств обрабатываемых в плазме гранулированных материалов (катализатора ZnO, морской соли NaCl) и семян растений (клевера, пшеницы, мака).

Наличие образцов в разрядном промежутке способствует переходу от филаментарного режима горения диэлектрического барьерного разряда к комбинации филаментарного и поверхностного разрядов, что связано с увеличением локальных значений напряженности электрического поля между гранулами наполнителя, сопровождающимся снижением интенсивности отдельных микроразрядов в газовом промежутке и увеличением количества низкоинтенсивных микроразрядов в окрестности точек контакта между частицами наполнителя. Такое изменение режима горения диэлектрического барьерного разряда сопровождается существенным увеличением потребляемой мощности, которая зависит от диэлектрических свойств, плотности упаковки и размера частиц наполнителя. Наибольшая однородность распределения электрического поля и однородность обработки в плазме достигаются для образцов с большей диэлектрической проницаемостью (семена мака, ZnO) и меньшими размерами частиц. Увеличение локальных значений напряженности электрического поля в окрестности обрабатываемых образцов приводит к росту колебательной температуры плазмы в этой зоне, что свидетельствует о перераспределении каналов вкладываемой в разряд энергии и увеличении доли энергии, поступающей в колебательные степени свободы молекул и активных частиц, участвующих в плазмохимических реакциях на поверхности материала и обеспечивающих более эффективную его обработку. Выявленные особенности влияния свойств обрабатываемых биологических объектов и каталитических материалов на режимы горения диэлектрического барьерного разряда важны для прогнозирования изменения характеристик обрабатываемых образцов.

Авторы выражают благодарность В. В. Ажаронку за полезные обсуждения и ценные рекомендации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф21МС-016), а также в рамках задания 2.2.02 ГПНИ “Конвергенция-2025” на 2021—2025 гг. (НИР 1 “Разработка основ комбинированного воздействия плазмы, электромагнитных полей и бихроматического лазерного излучения на материалы и биологические объекты для использования в новых технологиях”).

- [1] C. Z. Liu, N. Y. Cui, N. M. Brown. *Surface and Coating Technol.*, **185** (2004) 311e320
- [2] H.-E. Wagner, R. Brandenburg, K. V. Kozlov, A. Sonnenfeld, P. Michel, J. F. Behnke. *Vacuum*, **71**, N 3 (2003) 417—436
- [3] M. M. M. Bilek, M. Vandrovcová, A. Shelemin, A. Kuzminova, O. Kylián, H. Biederman, L. Bačáková, A. S. Weiss. *Appl. Surface Sci.*, **518** (2020) 146128
- [4] K. Zdunek. *Surface and Coatings Technol.*, **201** (2007) 4813—4816
- [5] Y.-R. Zhang, K. Van Laer, E. C. Neyts, A. Bogaerts. *Appl. Catal. B: Environ.*, **185** (2016) 56—67
- [6] M. Ansari, M. Sharifian, M. H. Ehrampoush, A. H. Mahvi, M. H. Salmani, H. Fallahzadeh. *Chemosphere*, **263** (2021) 128065
- [7] J. Li, C. Ma, S. Zhu, F. Yu, B. Dai, D. Yang. *Nanomaterials*, **9**, N 3–4 (2019) 11428—11462
- [8] K. Ollegott, P. Wirth, C. Oberste-Beulmann, P. Awakowicz, M. Muhler. *Chem. Ing. Tech.*, **92**, N 10 (2020) 1542—1558
- [9] S. H. Liu, M. Neiger. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34** (2001) 1632—1638
- [10] E. Wagenaar, R. Brandenburg, W. J. M. Brok, M. D. Bowden, H.-E. Wagner. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, N 4 (2006) 700—711
- [11] I. H. Bang, E. S. Lee, H. S. Lee, S. C. Min. *Postharvest Biol. Technol.*, **162** (2020) 111102
- [12] K. Puprasit, D. Wongsawaeng, K. Ngaosuwana, W. Kiatkittipong, S. Assabumrungrat. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **66** (2020) 102511
- [13] N. Wannicke, R. Wagner, J. Stachowiak, T. M. C. Nishime, J. Ehlbeck, K. Weltmann, H. Brust. *Plasma Process Polym.*, **18** (2021) e2000207
- [14] S. Chaple, C. Sarangapani, J. Jones, E. Carey, L. Causeret, A. Genson, B. Duffy, P. Bourke. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **66** (2020) 102529
- [15] Y. Lee, Y. Y. Lee, Y. S. Kim, K. Balaraju, Y. S. Mok, S. J. Yoo, Y. Jeon. *J. Ginseng Res.*, **45**, N 4 (2021) 519—526
- [16] V. Sirgedaitė-Šežienė, V. Mildažienė, P. Žemaitis, A. Ivankov, K. Koga, M. Shiratani, V. Baliuckas. *Plasma Process Polym.*, **18** (2020) e2000159
- [17] M. Kuchenbecker, N. Bibinov, A. Kaemling, D. Wandke, P. Awakowicz, W. Viol. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42** (2009) 045212
- [18] T. Tanino, M. Matsui, K. Uehara, T. Ohshima. *Food Control*, **109** (2020) 106890

- [19] C. Zhang, T. Shao, K. Long, Y. Yu, J. Wang, D. Zhang, P. Yan, Y. Zhou. *IEEE Transact. Plasma Sci.*, **38**, N 6 (2010) 1517—1526
- [20] M. Govaert, C. Smet, L. Vergauwen, B. Ećimović, J. L. Walsh, M. Baka, J. V. Impe. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **52** (2019) 376—386
- [21] A. Ozkan, T. Dufour, A. Bogaerts, F. Reniers. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **25**, N 4 (2016) 045016
- [22] T. Butterworth, R. W. K. Allen. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **26** (2017) 065008
- [23] K. Van Laer, A. Bogaerts. *Energy Technol.*, **3** (2015) 1038—1044
- [24] H. Luo, K. Liu, J. Ran, Y. Yue, X. Wang, S. Yap, C. S. Wong. *IEEE Transact. Plasma Sci.*, **42**, N 5 (2014) 1211—1215
- [25] Е. В. Барабанова, К. М. Заборовский, Е. М. Посадова, Р. А. Кастро. *Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена*, **157** (2013) 79—83
- [26] S. K. P. Veerapandian, C. Leys, N. De Geyter, R. Morent. *Catalysts*, **7** (2017) 113
- [27] A. Bogaerts, Q. Zhang, Y. Zhang, K. V. Laer, W. Wang. *Catalysis Today*, **337** (2019) 3—14
- [28] K. Takaki, J.-S. Chang, K. G. Kostov. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **11**, N 3 (2004) 281—290
- [29] F. Judée, T. Dufour. *J. Appl. Phys.*, **128** (2020) 044901
- [30] N. A. Savastenko, I. I. Filatova, V. A. Lyushkevich, N. I. Chubrik, S. V. Goncharik, S. A. Maskevich. *High Temp. Mater. Proc.*, **21**, N 2 (2017) 127—142
- [31] I. I. Filatova, V. A. Lyushkevich, S. V. Goncharik, N. I. Chubrik, A. G. Zhukovsky, N. A. Krupenko, N. G. Poplavskaya, Najeeb-ur-Rehman. *IX Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-9)*, September 17—21, 2018, Minsk, Kovcheg (2018) 437—440
- [32] Д. А. Сорокин, М. И. Ломаев, Т. И. Банокина, В. Ф. Тарасенко. *ЖТФ*, **84**, № 8 (2014) 13—20
- [33] N. Britun, M. Gaillard, A. Ricard, Y. M. Kim, J. G. Han. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, N 4 (2007) 1022—1029
- [34] <http://www.specair-radiation.net>
- [35] В. В. Ажаронок, И. И. Филатова, В. Д. Шиманович, Л. Н. Орлов. *Журн. прикл. спектр.*, **68**, № 5 (2001) 634—638 [V. V. Azharonok, I. I. Filatova, V. D. Shimanovich, L. N. Orlov. *J. Appl. Spectr.*, **68** (2001) 831—837]
- [36] F. J. J. Peeters, T. Butterworth. *Atmospheric Pressure Plasma – From Diagnostics to Applications*. In *Tech. Open*. (2019) 144
- [37] J. Kriegseis, B. Möller, S. Grundmann, C. Trope. *J. Electrostatics*, **69**, N 4 (2011) 302—312
- [38] D. Mei, X. Zhu, Y. He, J. D. Yan, X. Tu. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24**, N 1 (2015) 015011
- [39] X. Tu, H.J. Gallon, J. C. Whitehead. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (2011) 482003
- [40] Z. Ye, S. K. P. Veerapandian, I. Onyshchenko, A. Nikiforov, N. De Geyter, J. Giraudon, J. Lamonier, R. Morent. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, N 37 (2017) 10215—10226
- [41] J. Cecha, P. Stahel, Z. Navratil. *Eur. Phys. J. D*, **54** (2009) 259—264
- [42] N. Jidenko, E. Bourgeois, J.-P. Borra. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43** (2010) 295203
- [43] J. Li, S. Zhu, K. Lu, C. Ma, D. Yang, F. Yu. *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**, N 1 (2020) 104654
- [44] K. Takaki, Y. Hatanaka, K. Arima, S. Mukaigawa, T. Fujiwara. *Vacuum*, **83** (2009) 128—132
- [45] Р. А. Булгаков, Н. Н. Барышева. *Ползуновский альманах*, № 4 (2018) 205—207