

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.08:543.42:631.53.02

Э.А. СОСНИН^{1,2}, П.А. ГОЛЬЦОВА², В.А. ПАНАРИН¹, В.С. СКАКУН¹, В.Ф. ТАРАСЕНКО^{1,2}, М.В. ДИДЕНКО²ФОРМИРОВАНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА В ИСТОЧНИКЕ ПЛАЗМЫ
НА ОСНОВЕ АПОКАМПА *

Оптическими и химическими методами определён состав продуктов распада неравновесной плазмы атмосферного давления в импульсном высоковольтном разряде в режимах апокампа и коронного разряда. Показано, что продукты распада содержат преимущественно окислы азота NO_x , а в режиме коронного разряда – озон. Обсуждаются возможные приложения данного источника плазмы в задаче обработки семян сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: апокамп, импульсный разряд, коронный разряд, плазменная обработка, окислы азота.

Сегодня обработка неравновесной плазмой атмосферного давления и продуктами её распада находит многочисленные применения в биомедицине, пищевой промышленности и модификации материалов [1–3]. Сравнительно новое направление исследований – предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур, что, как показывают эксперименты, оказывает положительное влияние на прорастание, всхожесть и урожайность семян, а также способствует повышению устойчивости сельскохозяйственных культур к грибковым и бактериальным заболеваниям [3–7]. Для развития этого направления необходимы подробные исследования состава плазмы, создаваемой при импульсных и непрерывных разрядах, а также продуктов её распада, тем более что каждый источник плазмы обладает своим уникальным набором этих продуктов. Известно, что импульсные разряды в воздухе атмосферного давления служат источниками окислов азота [3, 8], но в каждом конкретном случае необходимо проводить паспортизацию источника, чтобы понять, насколько он соответствует той или иной задаче.

Цель настоящей работы – определение состава продуктов плазмы импульсно-периодического высоковольтного разряда в режиме апокампа, найденном и описанном в [9, 10]. Это новый источник плазмы, отличающийся от прочих импульсных разрядов тем, что на месте изгиба токового канала формируется одна или несколько плазменных струй (апокампы от греч. *αλό* – «от» и *καμπή* – «изгиб», «поворот»), которые распространяются перпендикулярно каналу разряда без прокачки газа и имеют длину до нескольких сантиметров.

Внешний вид феномена показан на рис. 1. Апокамп 4 формируется как продолжение яркого отростка 3, который образуется на месте изгиба канала разряда 1. Гало 2 – это разогретый газ, но в целом ориентация апокампа с процессами конвекции разогретых газов не связана [10].

В работах [10, 11] было показано, что спектр излучения апокампа и инициирующего его в воздухе разряда при нормальных условиях содержит больше полос и линий, чем спектр коронного разряда, и наибольшую интенсивность имеют полосы молекулы и молекулярного иона азота: $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u - \text{B}^3\Pi_g)$, $\text{N}_2^+(\text{B}^2\Sigma_u^+ - \text{X}^2\Sigma_g^+)$, $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g - \text{A}^3\Pi_u)$. Однако данных о составе продуктов распада плазмы в литературе нет.

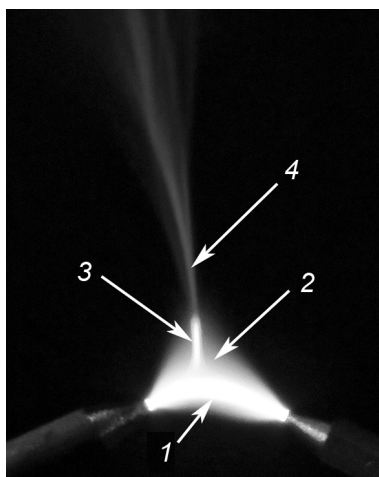


Рис. 1. Внешний вид высоковольтного импульсно-периодического разряда, инициирующего апокампа: 1 – канал разряда; 2 – «гало»; 3 – яркий отросток; 4 – апокамп (плазменная струя)

* Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3.

Для их выявления были использованы спектральные методы (абсорбционная УФ- и ИК-фурье-спектроскопия) и химический анализ. Установка для абсорбционной УФ-спектроскопии показана на рис. 2.

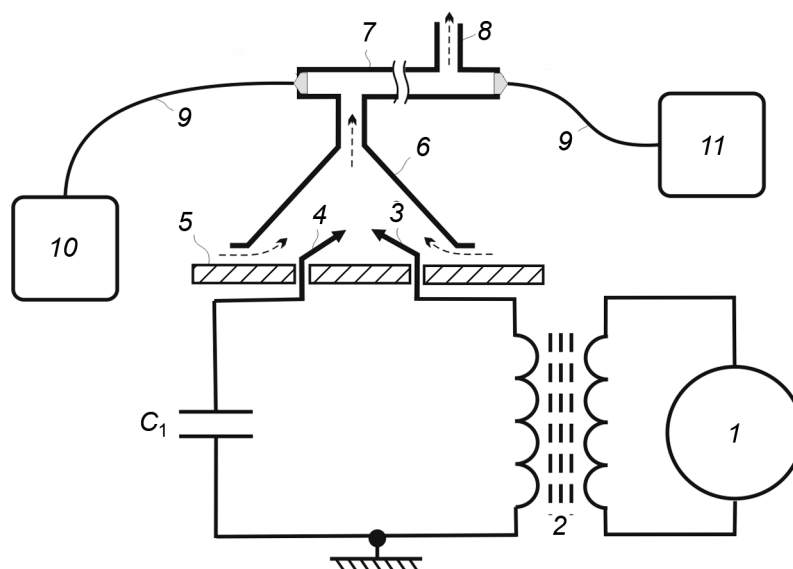


Рис. 2. Установка для абсорбционной спектроскопии продуктов распада плазмы: 1 – источник питания; 2 – повышающий трансформатор; 3 – высоковольтный электрод; 4 – электрод, находящийся под плавающим потенциалом; 5 – диэлектрическая пластина; 6 – воронка; 7 – оптическая кювета; 8 – патрубок для откачки газовой смеси; 9 – световоды; 10 – опорный источник излучения; 11 – спектрофотометр. Пунктирные стрелки показывают направление движения воздуха через установку

Источник высоковольтных импульсов 1 и повышающий трансформатор 2 обеспечивали на выходе на холостом ходу импульсы напряжения положительной полярности с частотой $f = 53$ кГц, длительность импульса $\tau = 1.5\text{--}2.5$ мкс и амплитуду напряжения до 13 кВ. Импульсы подавались на разрядный промежуток длиной $d = 0.9$ см, образованный двумя острыми электродами 3 и 4 из стали диаметром 3 мм. Электрод 3 был соединен с высоковольтным выходом импульсного трансформатора, а электрод 4 имел емкостную развязку с заземлением через конденсатор C_1 (с номиналами от 1 до 20 пФ). При зажигании разряда между электродами 3 и 4 продукты плазмы увлекались в стеклянную воронку 6 и попадали в оптическую кювету длиной 15 см и диаметром 10 мм. Плотность смеси в кювете регулировалась изменением скорости прокачки газа через патрубок 8, соединенный с мембранным насосом, обеспечивающим скорости прокачки от 0.1 до 2 л/мин (на рисунке не показан). На вход через световод 9 с коллимирующей линзой кюветы подавался опорный сигнал от источника 10 (SL5 UV-VIS на основе дейтериевой и накаливающей лампы, диапазон 200–850 нм). Спектры поглощения регистрировали спектрометром 11 StellarNet EPP2000-C25 (StellarNet Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony ILX511 (рабочий диапазон 200–850 нм, спектральная полуширина аппаратной функции не превышает 1.5 нм).

Полученные спектры приведены на рис. 3. Они соответствуют спектрам поглощения газов NO_2 и N_2O_4 [12]. Было отмечено, что интенсивность образования продуктов плазмы в случае $C_1 = 20$ пФ (рис. 3, кривая 2) была в несколько раз выше, чем при $C_1 = 1.65$ пФ (рис. 3, кривая 1). Соответственно в первом случае в разряде рассеивалась мощность около 7 Вт, а во втором ~ 2.5 Вт, т.е. выход окислов азота в установке можно регулировать.

Спектр на рис. 3, кривая 3 отвечает режиму коронного разряда, при котором на электрод 3 (рис. 2) подаётся импульсное высоковольтное напряжение, но межэлектродный промежуток увеличен до $d = 14$ мм. В результате разрядный канал не образуется, а на электроде 3 зажигается корона. Этот спектр поглощения соответствует интенсивной генерации озона в нормальных условиях на воздухе (см., например, [13]).

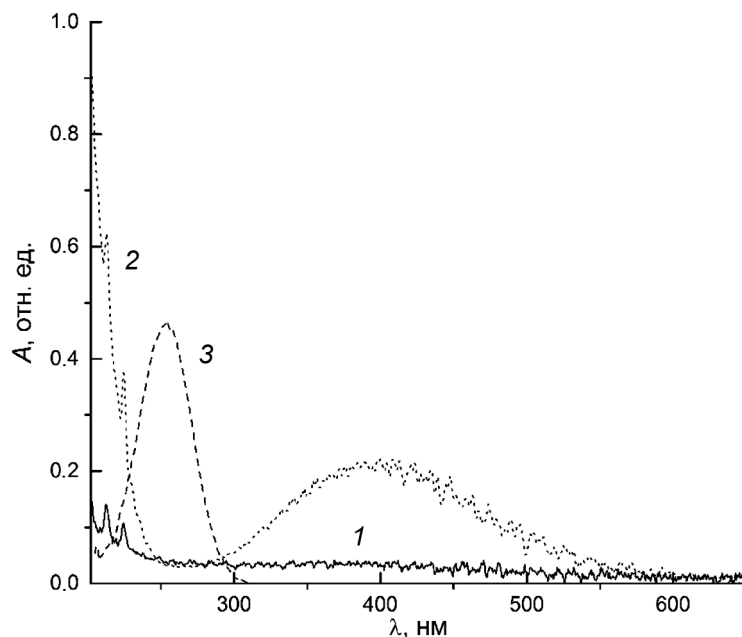


Рис. 3. Спектры поглощения продуктов плазмы: кр. 1, 2 – в режиме с апокампом; кр. 3 – в режиме коронного разряда

Если в режиме разряда с апокампом собирать образующийся газ в стеклянной колбе объемом 5 л, то спустя уже 1 мин работы в колбе накапливается коричневый газ. По [14] известно, что NO_2 – коричневый, ядовитый и вызывающий коррозию газ. Газообразный NO_2 при 100°C и 760 мм рт. ст. содержит 90 % NO_2 и 10 % N_2O_4 .

Далее были сделаны эксперименты, в которых продукты плазмы от разряда в режиме апокампа и коронного разряда улавливались дистиллированной водой, налитой в чашки Петри (по 5 мл на чашку), которые размещались под 5-литровым стеклянным колпаком, закрывающим разрядный промежуток, и который плотно прижимался к диэлектрической пластине 5 (рис. 2). Вода улавливала продукты распада плазмы. Как результат:

- Изменялась её кислотность. Пятиминутная обработка воды приводила к снижению pH в разряде с апокампом с 6.8 до 2.1 ($C_1 = 1.65$ пФ) и с 6 до 4.6 в коронном разряде ($C_1 = 10$ пФ).

- Изменялись спектры поглощения воды, что показано на рис. 4. Согласно справочным данным [15], спектр поглощения воды, выдержанной в среде продуктов распада плазмы разряда с апокампом (рис. 4, кривая 1), соответствует водному раствору азотистой кислоты HONO . Под действием продуктов распада коронного разряда образуется водный раствор перекиси водорода H_2O_2 (рис. 4, кривая 2).

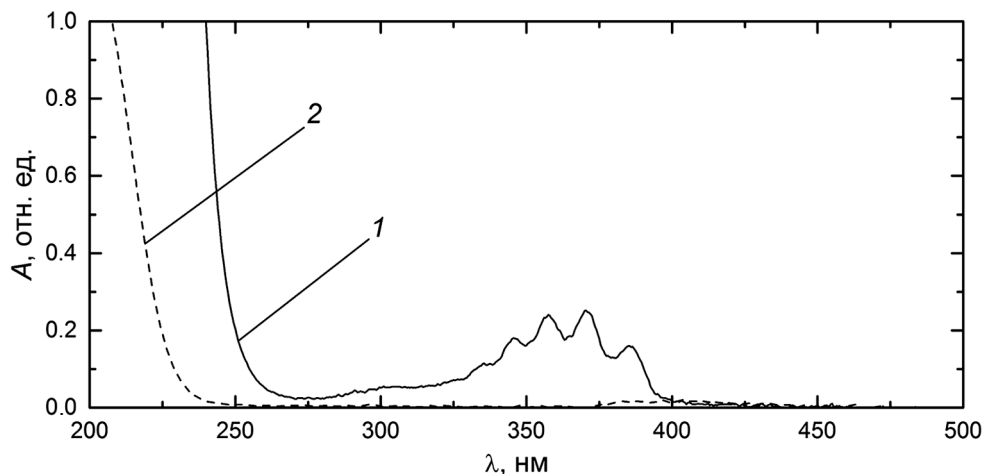


Рис. 4. Спектры поглощения воды, абсорбировавшей продукты распада плазмы разряда с апокампом (кр. 1) и коронного разряда (кр. 2)

Также были получены фурье-спектры поглощения продуктов разряда с апокампом. Как показано в [8], они дают детальную картину газового состава плазмы, формируемой в воздухе атмосферного давления искровых разрядов. Для этого поток газа через воронку б (рис. 2) направляли в кювету объёмом 125 см³ с длиной оптического пути 10 см и окнами из КВг (диаметром 40 мм) и далее – на ИК-фурье-спектрометр (ФТ-801, диапазон длин волн 2–18 мкм). Типичный спектр представлен на рис. 5. Он получен после 15 мин прокачки газов через кювету с расходом газа 0.1 л/мин. Полученные пики соответствуют (по мере убывания их концентрации) следующим окислам: NO₂, N₂O₄ и NO.

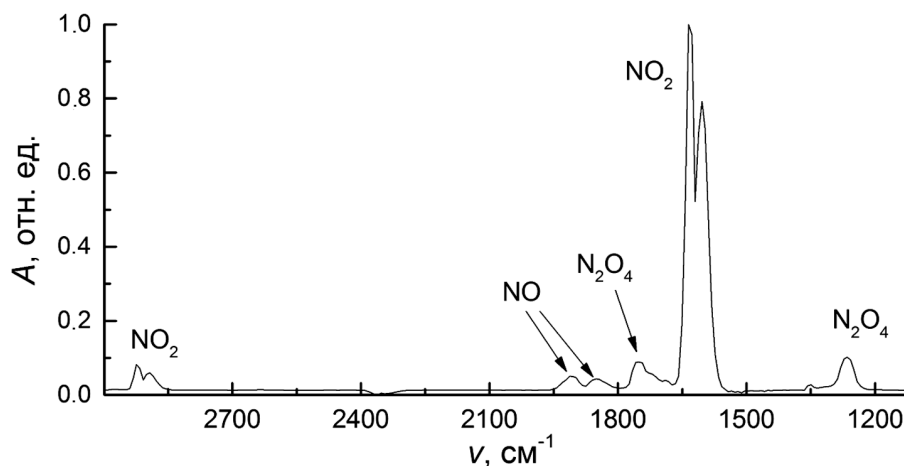


Рис. 5. ИК-фурье-спектры продуктов плазмы разряда с апокампом

Итак, проведенные эксперименты выявили преобладающие продукты распада плазмы в двух режимах разряда. Это диоксид азота NO₂ в режиме с апокампом и озон O₃ в условиях коронного разряда. Оба газа хорошо сохраняются в стеклянных сосудах. В водной среде соответственно образуются слабые растворы азотистой кислоты и перекиси водорода. Все эти реагенты обладают свойствами «травителей», что позволяет сделать вывод о том, что изученная плазменная установка полезна для проведения экспериментов по исследованию бактерицидной и фунгицидной обработки семян, а также для увеличения их энергии прорастания. Примечательно, что воздействовать можно и на сухие, и на мокрые семена, что дает различные эффекты. Важным является то, что изученная плазменная установка создаёт активные химические вещества непосредственно из воздуха.

При воздействии на семена необходимо будет учесть и то, что помимо продуктов распада плазмы источник оказывает дополнительное действие за счёт УФ- и видимого излучения на переходах азота и, возможно, является источником мягкого рентгеновского излучения, второе предстоит ещё проверить.

Авторы выражают благодарность Д.С. Печеницину за помощь в настройке источника питания плазменной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low Temperature Plasma Technology: Methods and Applications / eds. P.K. Chu, X.P. Lu. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – XII. – 481 p.
2. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., et al. // Phys. Rep. – 2016. – V. 630. – No. 4. – P. 1–84. DOI: 10.1088/0963-0252/12/1/307.
3. Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security / eds. Z. Machala, K. Hensel, Yu. Akishev. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. –Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012. – 479 p.
4. Гордеев Ю.А. Методологические и агробиологические основы предпосевной биоактивации семян сельскохозяйственных культур потоком низкотемпературной плазмы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Смоленск, 2012. – 46 с.
5. Sera B., Spatenka P., Sery M., et al. // IEEE Trans Plasma. – 2010. – V. 38. – No. 10. – P. 2963–2968. DOI: 10.1109/TPS.2010.2060728.
6. Jiang J.F., Lu Y.F., Li J.G., et al. // PLOS ONE. – 2014. – V. 9. – No. 5. – P. e97753. DOI: 10.1371/journal.pone.0097753.
7. Park D.P., Davis K., Gilani S., et al. // Current Appl. Phys. – 2013. – No. 13. – P. 19–29. DOI: 10.1016/j.cap.2012.12.019.

8. Pavlovich M.J., Ono T., Galleher C., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2014. – V. 47. – No. 50. – P. 505202. DOI: 10.1088/0022-3727/47/50/505202.
9. Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 92–95.
10. Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., et al. // JETP Lett. – 2016. – V. 103. – No. 12. – P. 761–764. DOI: 10.1134/S0021364016120146.
11. Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. – 2017. – Т. 122. – № 2. – С. 15–22.
12. Hall Jr. T.C. and Blacet F.E. // J. Chem. Phys. – 1952. – V. 20. – No. 11. – P. 1745–1949. DOI: 10.1063/1.1700281.
13. Ellerweg D., von Keudell A., and Benedikt J. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2012. – V. 21. – No. 3. – P. 034019. DOI: 10.1088/0963-0252/21/3/034019.
14. Руководство по неорганическому синтезу: в 6 т. Т. 2: пер с нем. / под ред. Г. Брауэра. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
15. Oppenländer T. Photochemical Purification of Water and Air. – Weinheim: Wiley – Vch Verlag, 2003. – 368 p.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 17.01.17.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Соснин Эдуард Анатольевич, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр., профессор, e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru;

Гольцова Полина Андреевна, магистрантка, e-mail: polyana1335@yandex.ru;

Панарин Виктор Александрович, инженер, аспирант, e-mail: panarin.ya.ru;

Скакун Виктор Семёнович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: skakun@loi.hcei.tsc.ru;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лаб., профессор, e-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru;

Диденко Мария Валерьевна, магистрантка, e-mail mari.dm28@mail.ru.