

О возможности применения коронного разряда в сельском хозяйстве

П. А. Горячкин,* Д. Е. Сороковых†

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физической электроники*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 20.05.2022; подписана в печать 23.06.2022)

В работе мы исследовали механизмы воздействия коронного разряда на поверхности слабопроводящих сред и провели эксперименты по изучению эффективности приложений коронного разряда в сельском хозяйстве и животноводстве. В частности, мы провели эксперименты по воздействию коронного разряда для удаления паров аммиака в воздухе и удалении плесени с поверхности зараженных зерен твердых и мягких сортов озимой пшеницы. Полученные результаты показали, что коронный разряд эффективен в устранении аммиака в воздухе до 2.5 раз за промежуток времени 15 мин. В экспериментах по исследованию удаления грибка с поверхности зерен сельскохозяйственных культур при помощи коронного разряда достигались результаты практически полного его удаления с поверхности зерен при временах обработки до 3 часов.

PACS: 52.80.Hc.

УДК: 537.523.3

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, коронный разряд, зерна сельскохозяйственных культур, аммиак.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению воздействия плазмы на поверхности различных диэлектрических материалов в воздухе носит практический характер. Он связан с исследованием поведения электрических процессов на поверхности Земли в различных условиях: под действием электрического поля во время грозы, а также в поле действия различных устройств, предназначенных для передачи электрической энергии. Подобные исследования представляют интерес также для решения проблем экологического характера: обеззараживания жидкостей и порошков, изменения их проводимости, химического состава, генерации активных частиц в жидкостях и в поверхностных слоях дисперсных материалов, диспергирования порошков с помощью электрических разрядов в плазмохимии, также и активирующих горючих веществ [1–8].

Применение плазмы позволяет оказывать влияние на такие сложные системы, как грибы, бактерии и вирусы. Например, грибковые заболевания сельскохозяйственных культур оказывают серьезное влияние на продовольственную безопасность и наносят значительный экономический ущерб. Грибы способны расти на всех видах сельскохозяйственной и пищевой продукции, приводя к порче и образованию в них микотоксинов. Большинство грибковых инвазий, как только они начинаются, трудно поддаются дезинфекции и являются дорогостоящими, так как грибковые клетки и споры характеризуются довольно стабильными структурами. Для предотвращения грибковой, бактериальной и вирусной порчи семян, зерна и других продуктов используются химикаты — фунгициды и пестициды. Их использование приводит к серьезным эко-

логическим проблемам — ухудшению здоровья людей, загрязнению окружающей среды, связанному с вредными химическими остатками или распространением патогенных устойчивых штаммов. Даже в органических культурах часто обнаруживаются микотоксины, приводящие к отравлению людей и животных. Растущая тенденция к органическому производству привела к использованию натуральных антимикотиков, которые, как правило, дороги и сильно удорожают продукт. Последнее время химический метод по объему применения занимает одно из ведущих мест в системе защиты растений. Однако он имеет существенные недостатки. В первую очередь это опасность загрязнения окружающей среды и растительной продукции. Поэтому приемы химической защиты должны сопровождаться строгим санитарно-эпидемиологическим контролем за продукцией растениеводства. Так остаточные количества препаратов в обработанных растениях и получаемой продукции не должны превышать предельно допустимые. Поэтому использование каждого препарата регламентируется периодом ожидания в днях от последней обработки до уборки урожая. Совершенствование системы защиты растений направлено на поиск путей, позволяющих сократить использование химических средств защиты растений.

Одним из путей, позволяющих сократить использование химических средств защиты является применение низкотемпературной плазмы. Низкотемпературная плазма газовых разрядов содержит различные заряженные (ионы и электроны), нейтральные (молекулы, атомы, колебательно и электронно возбужденные состояния) частицы и продукты активации плазмохимических реакций, рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Плазма может окислять различные микроорганизмы и разрушать не только их мембраны, но и ДНК вирусов и бактерий. Оставаясь холодной, такая плазма не разрушает термочувствительные материалы, что позволяет широко использовать ее в ка-

* mystereo@mail.ru

† sorokovykh.de19@physics.msu.ru

честве сильного стерилизатора. Использование холодной плазмы в растениеводстве для обеззараживания семян, продовольственного и фуражного зерна является экологически чистым, поскольку не наносит серьезного вреда окружающей среде, людям, животным и является более экономически выгодным, чем использование химических или природных фунгицидов и пестицидов. В частности, использование коронного разряда оказывается перспективным для воздействия на грибки, бактерии и вирусы, на семена, но и на почву [9–11]. В этом случае плазма разрядов разного типа приводит к различному воздействию на биологические компоненты и почву. Влияние зависит от времени воздействия и типа разряда. В целом улучшается электропроводность, появляются новые компоненты на основе азота и другие эффекты, полезные с точки зрения улучшения роста растений, поскольку плазменная область под разрядом содержит ионы, электроны, возбужденные молекулярные состояния, активные радикалы и озон. Накопленный опыт исследования воздействия коронных разрядов на сложную биологическую систему [9, 10], жидкие и дисперсные материалы [11, 12] позволяет сформулировать новые подходы к применению плазмы разрядов для обработки зерна при заранее определенных условиях и параметрах генерации плазмы. Поскольку электрическая энергия, идущая на создание плазмы невелика, то стоимость плазменных методов оказывается существенно дешевле (в 10–100 раз), чем химических протравителей.

Другим перспективным направлением в применении плазмы является решение важных проблем животноводства — утилизация отходов ферм и подавление токсичных газов в этих отходах. Например, концентрация аммиака в воздухе над стоками свиноферм достигает величины $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что сравнимо с предельно допустимой концентрацией озона в воздухе.

Применение плазменных и ударно-волновых технологий перспективно в связи с тем, что при их использовании возникает много электронно-возбужденных молекул, атомов кислорода, радикалов, озона и др. активных частиц. Эти компоненты при относительно невысоких температурах в плазме приводят к разрушению токсичных и дурно пахнущих компонентов.

1. КОРОННЫЙ РАЗРЯД НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТЕЙ

Простейшим в применении к перечисленным приложениям является коронный разряд. Простота устройства и возможность облучения различных материалов делают его перспективным в приложениях.

Коронный разряд — это слабосветящийся разряд, который возникает вблизи кончика проводника. Коронные разряды в настоящее время хорошо изучены. Коронный разряд в воздухе происходит при комнатной температуре и атмосферном давлении при напряжении 5–25 кВ между электродами на рас-

стоянии нескольких сантиметров. При повышении напряжения корона переходит в искровой или дуговой разряд с образованием ярко светящегося канала. Коронный разряд в воздухе сопровождается так называемым ионным, или электрическим, ветром. Электрическое поле на кончике электрода увеличивается. В сильном поле фоновые электроны, образующиеся при замедлении космических лучей в атмосфере и при распаде радона в почве Земли, ускоряются и ионизируют воздух на некотором расстоянии от кончика электрода. Появляется плазма. Из закона сохранения количества заряда и большого количества генерируемых заряженных частиц следует, что плазма квазинейтральна, то есть количество отрицательно заряженных частиц в ней примерно равно количеству положительно заряженных частиц [12, 13].

Если острие (иглы) заряжено положительно, то в соответствии с законом кулона, к острию притягиваются O^- и нейтрализуются на её поверхности. Положительные ионы O_2^+ отталкиваются от острия и распространяются из зоны их формирования.

Также и в случае отрицательно заряженного электрода с острием, ионный ветер появляется из ионов O^- которые двигаются от острия. Электроны же почти не участвуют в передаче импульса, так как их масса гораздо меньше чем у ионов, и при такой же скорости движения как и у ионов, импульс который они передают гораздо меньше. Ионный ветер механически воздействует на объекты на пути своего распространения [14, 15].

На рис. 1 представлена схема коронного разряда над поверхностью жидкости.

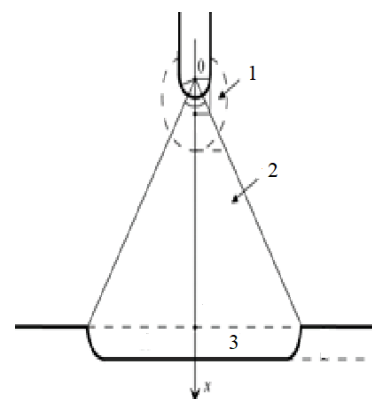


Рис. 1. Схема коронного разряда над поверхностью жидкости: 0 — игла, 1 — зона ионизации, 2 — зона распространения ионов, 3 — воронка

1.1. Эксперименты

На рис. 2 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Она состоит из кюветы, заполненной жидкостью (вода, спирт, и др.) или другим

изучаемым веществом, и электрической цепи. Верхний электрод или набор электродов диаметром 0.9 мм (с радиусом кончика 0.2 мм) или 2 мм (с радиусом кончика 0.4 мм) располагался на высоте 5–15 мм над поверхностью жидкости. Расстояние между электродами в верхней многоэлектродной композиции составляло 11 мм. Электроды находились под положительным или отрицательным напряжением. Кюветы были либо металлическими, либо диэлектрическими. Металлические кюветы были: цилиндрические, диаметр 130 мм, высота 18 мм, кювета из диэлектрического пластика была: прямоугольной 64x58x85 мм. Ток в разряде измерялся миллиамперметром A_1 , напряжение измерялось цепью, состоящей из сопротивления R_1 и миллиамперметра A_2 .

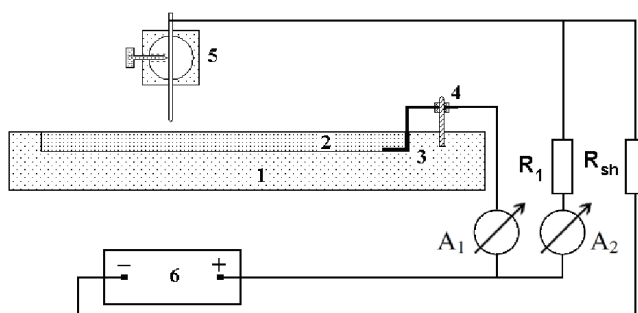


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментов. 1 — кювета, 2 — образец (вода, спирт, почва), 3 — анод, 4 — крепление, 5 — катод, 6 — источник питания

Мы создали коронные разряды над водопроводной водой, спиртом и керосином. Эти эксперименты помогли уточнить режимы реализации разрядов и их связь с появлением воронок на поверхностях жидкостей и колонн для спирта. Эксперименты с керосином показали, что при применении нижних металлических электродов позволяет реализовать коронный разряд над этой жидкостью. Также была обнаружена неизвестная форма поведения жидкого керосина в виде пузырьковой структуры при воздействии внешнего электрического поля. При использовании новой схемы многоэлектродного (два и четыре верхних электрода) коронного разряда над поверхностью жидкости эксперименты с коронным разрядом над водой и спиртом показали появление гидродинамических неустойчивостей в случае нескольких электродов, которые имеют несколько новый характер по сравнению с коронным разрядом с одним верхним электродом. Природа этих гидродинамических эффектов обсуждалась в [18].

На рис.3 для примера представлены фотографии структур над бутилгликолем (подобные структуры в случае спирта представлены в [18]). Так же отметим что наблюдалось изменение температуры на поверхности жидкости в процессе обработки её коронным разрядом.

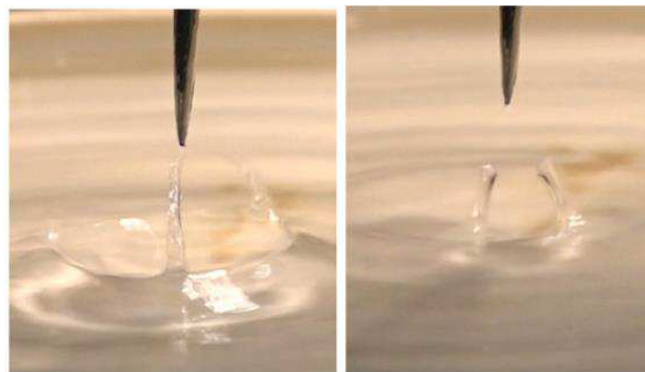


Рис. 3. Столбики, воронка и волны над поверхностью бутилгликоля. Отрицательная корона. Расстояние от конца иглы до поверхности жидкости 7 мм. Напряжение 10 кВ

2. ОБРАБОТКА ЗАРАЖЕННЫХ ЗЕРЕН ПРИ ПОМОЩИ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Мы проводили эксперименты по обработке семян пшеницы, время действия до 2–3 ч., $U = 15 - 20$ кВ. $I = 20 - 100$ мкА. На рис. 4 приведены фотографии и схема экспериментальной установки. Зерно помещалось в кювету 3, на многоэлектродную композицию 4 подавалось постоянное напряжение, которое изменялось в ходе экспериментов от 15 кВ до 20 кВ (полярность изменялась для разных экспериментов), второй электрод был помещен на дно кюветы, или, как в случае рис. 4, кювета была металлической и являлась электродом. Для равномерной обработки поверхности зерен в кювете создавались вибрации с помощью электрического моторчика 2, так что содержимое на протяжении эксперимента перемешивалось.

В зависимости от типа грибка плазма уменьшает их концентрацию от нескольких процентов до нуля в зависимости от интенсивности разряда и времени обработки зерна. Этот эффект открывает новый способ уменьшения количества экологически вредных протравителей при обработке Зерна.

На рис. 5 показан эффект обработки поверхности твердой озимой пшеницы коронным разрядом отрицательной полярности. Видно, что поверхность изменяется, становится более «гладкой», то есть происходит разрушение поверхности зерен. Можно предположить, что это разрушение происходит при столкновении потока относительно быстрых ионов, озона и радикалов возникающих в воздухе под действием коронного разряда при которых возможно протекание химических реакций на поверхности.

Облучение семян холодной плазмой не оказало существенного влияния на их всхожесть и энергию прорастания.

Для достижения сопоставимого с использованием отрицательной короны обеззараживающего эффекта плазмой положительной короны при обеззараживании семян необходимо затратить в три раза больше вре-

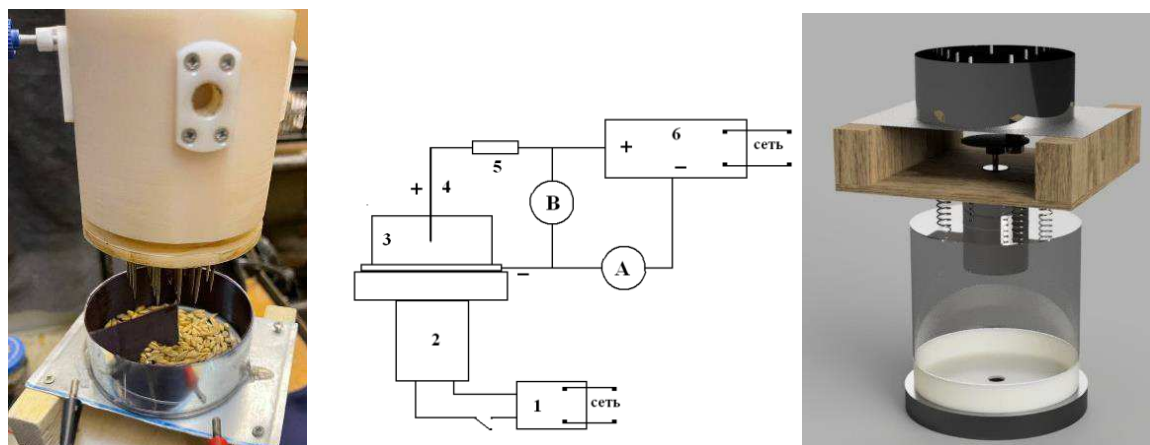


Рис. 4. Фотографии и схема установки для обработки зерна. Обозначения схемы: 1 — источник питания, 2 — электрический моторчик, создающий вибрации, 3 — кювета, 4 — многоэлектродная композиция, 5 — балластное сопротивление, 6 — источник высоковольтного напряжения (5–30 кВ)

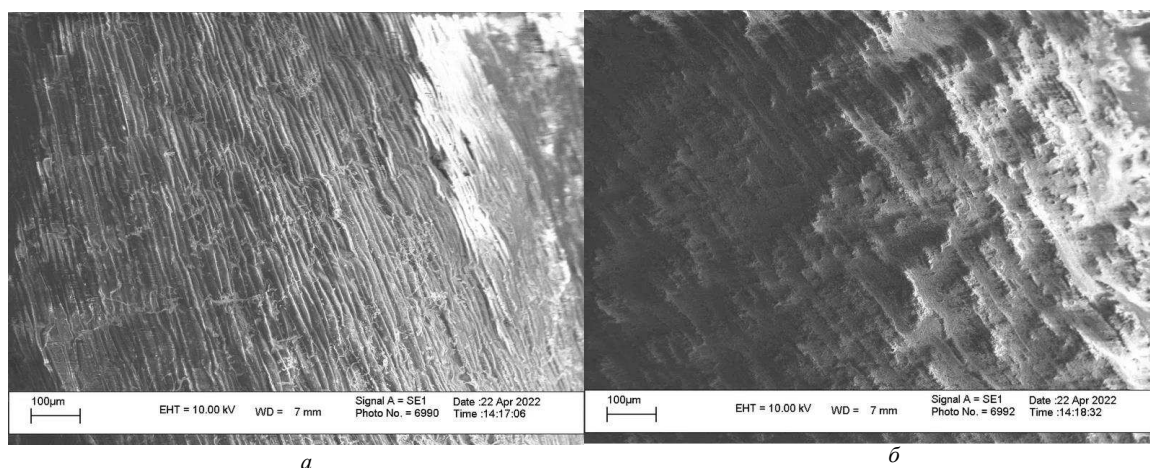


Рис. 5. Фотографии поверхности твердой озимой пшеницы с электронного микроскопа (масштаб 100 мкм) до (а) и после (б) обработки поверхности. (в данном случае отрицательным коронным разрядом с длительностью обработки 2 ч)

мени. Это может быть связано с тем, что в условиях положительной короны реализуется больше озона, чем в случае отрицательной кроны, но недостаточно для полного обеззараживания семян озимой пшеницы и озимого ячменя.

Улучшение временных характеристик требует увеличения подводимой мощности, что не сильно повлияет на стоимость затрат на электричество.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПАРЫ АММИАКА

Рассмотрим возможность применения коронного разряда на пары аммиака с целью уменьшения их концентрации. Как известно именно молекулы аммиака над стоками свиноферм и птицеферм обуславливают появление неприятного запаха.

Для исследования воздействия плазмы на пары ам-

миака нами был использован коронный разряд над поверхностью аммиачно-водного раствора.

Таблица. Коронный разряд отрицательной полярности в воздухе над 10% раствором аммиака в воде. Параметры разряда и время его воздействия на пары аммиака

t, мин	Относ. объемная конц. NH ₃	U, кВ	I, мкА
0	270	0	0
0,5	230	7.5	22
0,8	210	11.9	30
1	180	11.9	30
4	150	11.9	25
5	127	12.0	23
9	105	12.0	23

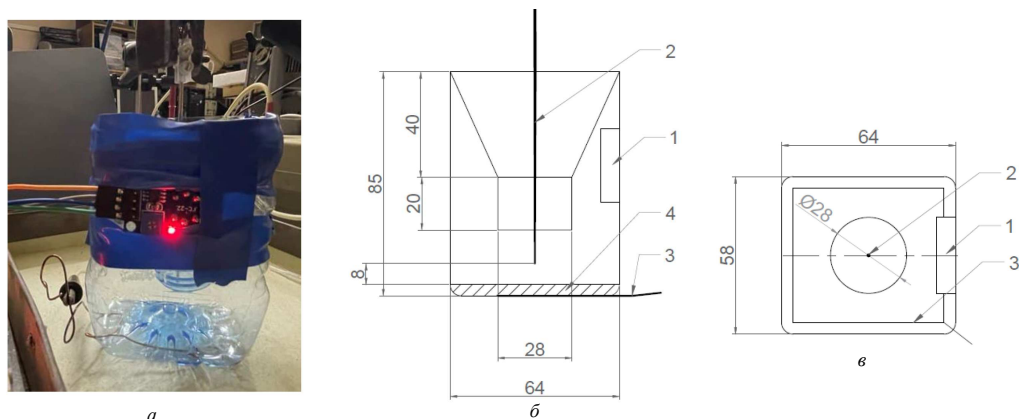


Рис. 6. *а* – Фотография установки, *б, в* схема установки: вид сбоку (*б*) и вид сверху (*в*), величины указаны в миллиметрах. 1 – датчик измерения аммиака; 2 – игла (катод); 3 – медная проволока (анод); 4 – водный раствор аммиака;

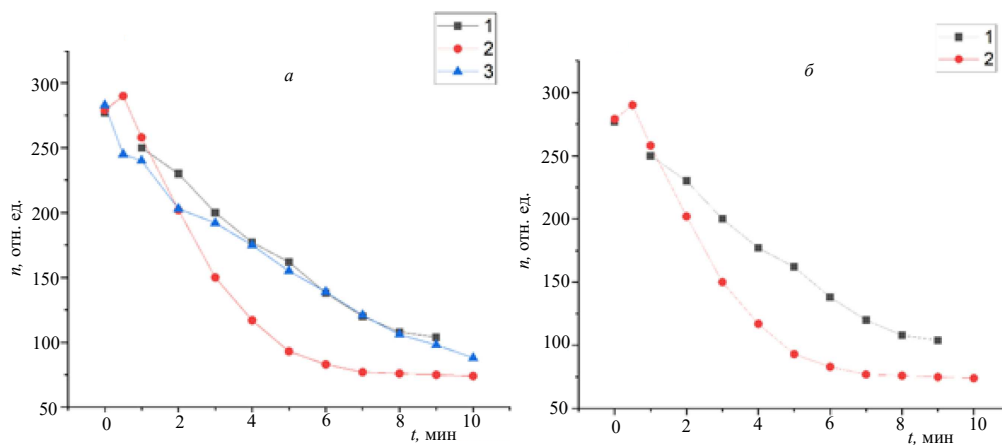


Рис. 7. Зависимость изменения концентрации аммиака от времени: 1 – заземленный электрод не касается поверхности раствора, 2 – заземленный электрод касается поверхности раствора (ток такой же как и в случае 1), 3 – касается (ток в два раза меньше, чем во втором). Температура в комнате 23.5°C, влажность в комнате 18%

На рис. 6 показаны фотография и схема установки коронного разряда, снабженного датчиком концентрации аммиака.

В таблице представлены параметры разряда и время его воздействия на пары аммиака. На рис. 7 представлены графики зависимости концентрации паров аммиака от времени обработки.

Из таблицы и графиков видна высокая активность плазмы разряда при малых токах, она приводит к 2.5 кратному уменьшению концентрации аммиака за 10 мин воздействия плазмы. Простота установки и её малая мощность показывает перспективность использования коронного разряда для удаления токсичных газов при помощи плазмы.

Проделанные нами расчеты показывают, что высокая эффективность разрушения молекул аммиака происходит при температурах 500–1000 К. Такие условия могут быть реализованы при использовании электрогидродинамического метода, при котором создаются

ударные волны электрическими разрядами в жидкости. В этом случае будут происходить одновременно разрушение токсичных отходов и дурно пахнущих, токсичных газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены опыты с применением плазмы коронного разряда по влиянию на пораженные различными грибковыми заболеваниями семена озимой пшеницы. Время воздействия находилось в диапазоне от часа до трех часов.

В проведенных опытах установлено обеззараживающее действие холодной плазмы на грибковые заболевания семян твердых и мягких сортов пшеницы.

Были проведены эксперименты воздействия коронного разряда на пары аммиака, и была показана высокая эффективность его уничтожения.

-
- [1] Encyclopedia of Low Temperature Plasma. Applied Plasma Chemistry. Ed. by Yu.A. Lebedev, N.A. Plate, and V.E. Fortov (Yanus-K, Moscow, 2008), V. 9–5 [in Russian].
- [2] Lacoste D.A., Pai D.Z., Laux C.O. Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibition, Reno, Nevada, USA, AIAA-2004-354 (AIAA Publ., 2004).
- [3] Colas D.F., Ferret A., Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O. // J. Appl. Phys. 2010. **108**. 103306
- [4] Mitsugi F., Ebihara K., Horibe N., Aoqui S.-I., Nagahama K. // IEEE Trans. Plasma Sci. Dec. 2017. **45**, N 12. P. 3082.
- [5] Ghernaout D., Elboughdiri N. // Open Access Library J. 2020. **7**, N 4. P. 1.
- [6] Sheng-ying, YeXian-liang, Song J. et al. // Biosystems Engineering. 2012. **113**, N 2. P. 112.
- [7] Dors M., Metel E., Mizeraczyk J., Marotta E. // Int. J. Plasma Envir. Sci. and Technol. 2008. **2**, N 1. P. 34.
- [8] Hartmann W., Roemheld M., Rohde K.-D., Spiess F.J. // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. **16**, N 4. P. 1061.
- [9] Bychkov V.L., Chernikov V.A., Deshko K.I., Zaitsev F.S., Mikhailovskaya T.O., Shvarov A.P., Izotov A.M., Tarasenko B.A., Dudarev D.P. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. **49**, N 3. P. 1034.
- [10] Bychkov V.L., Chernikov V.A., Deshko K.I., Zaitsev F.S., Esakov I.I., Vysikaylo P.I. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. **49**, N 3. P. 1028.
- [11] Bychkov V. L., Bikmukhametova A.R., Chernikov V.A., Deshko K.I., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A.P. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. **48**, N 2. P. 350.
- [12] Бычков В. Л., Бикмухаметова А. Р., Дешко К. И., Михайловская Т. О., Черников В. А., Шваров А. П. Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 4 С. 77.
- [13] Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1987.
- [14] Lacoste D.A., Pai D., Laux C.O. / Ion wind effects in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air. AIAA-2004-354. 42-nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 5-8 January 2004, Reno, Nevada.
- [15] Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kosmachevskii K.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. **45**, N 12. P. 3118.
- [16] Alexandrov A.F., Bychkov V.L., Bychkov D.V. et.al. Mosc. Univ. Phys. Bull. 2011. N 4, P. 71.
- [17] MacDaniel I., Maison E. Mobility and diffusion of ions in gases. Moscow.: Mir, 1976.
- [18] Kozlov B.A., Solovyov V.I. // Zh. Technich. Fiziki. 2007. **77**, N 7, P. 70.
-

On the possibility of using corona discharge in the agriculture

P.A. Goriachkin^a, D.E. Sorokovykh^b

¹Department of General Physics and Molecular Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^amystereo@mail.ru, ^bsorokovykh.de19@physics.msu.ru

In this work, we investigated the mechanisms of corona discharge impact on the surfaces of weakly conductive media and conducted experiments to study the effectiveness of corona discharge applications in agriculture and animal husbandry. In particular, we have carried out experiments on the effects of corona discharge to remove ammonia vapors in the air, and to remove mold from the surface of infected grains. The results obtained showed that the corona discharge was effective in eliminating ammonia in the air, up to 2.5 times over a period of 15 minutes. In experiments to study the removal of the fungus from the surface of the grains of agricultural crops using a corona discharge, the results of its almost complete removal from the surface of the grains were achieved with processing times up to 3 hours.

PACS: 52.80.Hc.

Keywords: low temperature plasma, corona discharge, crop grains, ammonia.

Received 20 May 2022.

Сведения об авторах

- Горячкин Павел Алексеевич — аспирант; e-mail: mystereo@mail.ru.
 - Сороковых Дмитрий Евгеньевич — студент, e-mail: sorokovykh.de19@physics.msu.ru.
-