

ORIGINAL ARTICLE

The Study of the Effects of Surface Dielectric Barrier Discharge Low Temperature Plasma Products on Spring and Winter Wheat Germination

A.V. Lazukin¹, I.V. Lyubushkina^{2,3}, K.A. Kirichenko²,

O.I. Grabelnych^{2,3*}, S.A. Krivov¹, A.M. Nikitin¹

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Moscow, Russia;

² Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, Russia;

³ Irkutsk State University, 664033, Irkutsk, Russia

*E-Mail: grolga@sifibr.irk.ru

Received December 10, 2014

The use of ion-plasma technologies for treatment of seeds of different crop plants is particularly important for regions that exist in environment of risk farming. This is due to the lack of supplies in the treatment, durability, reliability and performance of these technologies. However, the mixed results of studies obtained for different species and varieties of seeds, make it necessary to detail compare the effects of the low-temperature plasma products for different cultures. This paper presents the results of experimental studies of the effects of plasma products of surface dielectric barrier discharge on the germination of spring and winter wheat. It has been shown that irrespective of time and the exposure intensity laboratory germination of spring wheat seeds reduced of 74% in the control group to 52% of the treated seeds, while the germination of wheat seeds is not reduced even at a relatively long exposure (20 min). The modes of treatment (3 min, 2.1-2.4 kV) at which germination of winter wheat seeds increase from 81% in the control group to 87% of the treated seeds have been selected. Resistance of winter wheat seed germination to the product of the discharge plasma can be used to form the conditions for safe suppression of a variety of pathogenic organisms on the surface of seeds.

Key words: laboratory germination, pre-sowing treatment, products gas discharge, surface dielectric barrier discharge, wheat

Применение электрических разрядов атмосферного давления для воздействия на различные биологические объекты с целью формирования последствий и ответных реакций (или взаимного влияния в развернутой системе разряд/объект) является бурно развивающимся направлением. При этом сформировалось несколько традиционных направлений исследований, подразделяющихся по виду электрического разряда, а в частности, по виду электродной системы для образования плазмы разряда. Во-первых, это исследования, в которых рабочим инструментом служит, так называемый плазменный факел («plasma torches») [Thiyagarajan *et al.*, 2013; Ermakov *et al.*, 2014]. Протягиваемые инертными газами и их смесями электродные системы в виде колец или иглы, заключенных в тонкостенные трубки, позволяют сформировать удлиненную зону плазмы. Эффект образования такого разряда применяется для уничтожения микроорганизмов [Kobzev *et al.*, 2013; Shmigel *et al.*, 1998], воздействия на предпосевные качества различных семян [Juldashev, 2013; Lyubushkina *et al.*, 2014]. Вторым широким направлением является применение сверхвысокочастотных разрядов [Azharanok *et al.*, 2009; Mazets *et al.*, 2008] и высокочастотных разрядов атмосферного давления на различных неоднородностях [Zahoranová *et al.*, 2014]. К последнему из перечисленных видов относится поверхностный диэлектрический барьерный разряд [Sokolova *et al.*, 2010; Lazukin *et al.*, 2014].

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования воздействия плазмы (продуктов плазмы) поверхностного диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления на биологические объекты (семена озимой и яровой пшеницы). При подготовке материала значительное внимание было уделено именно методическим проблемам формирования воздействия и технике эксперимента с применением высокого напряжения. Оценке, в значительной степени, подвергались не только результаты воздействия, но и технологические характеристики разряда, вызывающего наблюдаемые эффекты.

MATERIALS AND METHODS

Растительный материал. Обработке подвергались семена яровой пшеницы (*Triticum durum* L.) сорта Новосибирская 22 и озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Иркутская. Для определения всхожести семена после обработки плазмой поверхностного диэлектрического барьерного разряда без дополнительной обработки обеззараживающими агентами проращивали на влажной фильтровальной бумаге в темноте при 26 °С в течение 7 суток. Контрольная группа – семена, не обработанные плазмой. Всхожесть семян определяли по ГОСТ 12038-84. Проводили не менее 2-х независимых экспериментов. На диаграммах и в таблице всхожесть представлена в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения.

Методы и условия высоковольтного воздействия. Электродная система для формирования поверхностного диэлектрического барьерного разряда представляет собой два электрода разделенных диэлектриком (диэлектрическим барьером). Размеры электродов подбираются из соображений, чтобы создать усиление напряженности электрического поля около края одного из электродов. Таким образом, один из электродов значительно уже другого. На краях узкого электрода напряженность электрического поля значительно превышает среднюю напряженность в промежутке. Если электрическая прочность диэлектрического барьера достаточна, то при повышении напряжения на электродах вблизи края узкого электрода формируются условия для возникновения разряда. Стример развивается по силовым линиям в направлении барьера, который препятствует сквозному протеканию значительного тока проводимости. Заряд, осевший на поверхности барьера, удаляется на стадии обратного разряда – при смене полярности на электродах. Следовательно, частота следования подобного цикла зарядки-разрядки напрямую связана с частотой высоковольтного питания.

Питание. В системы электропитания применялся высоковольтный высокочастотный источник, специально разработанный для проведения данного исследования. Задача источника преобразовать напряжение промышленной частоты (220 В, 50 Гц) в высокое (2-5 кВ) высокочастотное (14 кГц) стабилизированное

выходное напряжение. Узел стабилизации позволяет избежать колебаний выходного сигнала, а, следовательно, получить длительный и стабильный режим. Для создания постоянного напряжения на высоковольтном коллекторе использовался источник питания на базе каскадного умножителя. Подбор компонентов, входящих в состав источника питания, определяется, в основном, мощностью, которую потребляет электродная система.

Материалы барьеров и электродов и их геометрия. В качестве плазмогенерирующих электродов (ПГЭ) использовались полосы никеля нанесенные на поверхность барьера шликерным методом, толщина электродов 10 мкм, ширина электрода 1 мм и полосы алюминия шириной 2 мм и толщиной 50 мкм. Диэлектрический барьер, на поверхность которого были нанесены электроды – корундовая керамика ВК-94 и поликарбонат, толщина барьеров 1 мм. Геометрическая емкость электродных систем составляет 45 и 60 пФ в случае корундовой керамики и 109 пФ для электродной системы на поликарбонате.

Ток на высоковольтный коллектор. Ионно-плазменные технологии, использующие потоки заряженных частиц для зарядки диспергированных материалов известны достаточно давно [Vereshagin et al., 1974]. В промежутке создается постоянное электрическое поле за счет внесения дополнительного электрода – высоковольтного коллектора [Sokolova et al., 2010]. Постоянное поле высоковольтного коллектора «вытягивает» из плазмы

поверхностного разряда заряженные частицы – ионы или электроны, в зависимости от полярности приложенного напряжения. Таким образом, можно создать поток положительных или отрицательных частиц на плоский электрод, на котором будут размещены обрабатываемые семена. Ток, вытягиваемый из плазмы разряда, измеряется в цепи высоковольтного питания электрода-коллектора.

Реакция посевного материала на электростатическое поле. Семена пшеницы представляют собой полуэллипсоид вращения, поверхность которого обладает относительной проводимостью благодаря наличию тонкой водяной пленки, образованной атмосферной влагой. Попадая в электростатическое поле высокой напряженности, превышающей напряженность минимальной реакции (зависит от массо-габаритных параметров и ряда других факторов), семя пшеницы разворачивается под действием сил поляризации и располагается острием по полю. При этом напряженность вблизи острия многократно возрастает по сравнению со средней напряженностью в промежутке. Это может приводить к возникновению пробоев и обратной короны в промежутке (промежуток сокращается, поле становится неоднородным), что нежелательно. Этот эффект ограничивает уровень допустимых напряженностей электростатического поля, которые можно использовать для формирования потока заряженных частиц от плазмы поверхностного разряда на высоковольтный коллектор, на

поверхности которого в экспериментах и располагаются проводящие семена. Фотография реакции посевного материала на воздействие электростатического поля приведено на Рис 1. Распределение реакции (Рис. 2) было получено по 105 приложениям напряжения. Выборка на определение реакции составила 11717 семян. Значение минимальной реакции для рассматриваемой электродной системы - 5,5 кВ/см.

Технологические характеристики поверхностного разряда. К технологическим характеристикам поверхностного диэлектрического барьерного разряда, представляющим интерес с точки зрения воздействия на посевной материал, относятся: синтез озона, абсолютная интенсивность УФ-излучения и ток на высоковольтный коллектор. Синтез озона в зависимости от приложенного к плазмогенерирующему электроду (ПГЭ) для полосы длиной 60 мм, измеренный в тракте герметичного плазмохимического реактора при протоке атмосферного воздуха 1 л/мин, приведен на Рис. 3.

Абсолютная интенсивность УФ-излучения по трем диапазонам УФ-А, УФ-В и УФ-С в зависимости от напряжения, приложенного к ПГЭ для электродной системы с барьером из поликарбоната и керамики, приведены на Рис 4. и на Рис. 5, соответственно. Измерения проводились на расстоянии 10 мм от поверхности барьера по трем точкам УФ-радиометром ТКА-ПКМ-12.

Установка. Схема экспериментального стенда приведена на Рис. 6. В его состав входят

электродная система с поверхностным разрядом (1) и электрод коллектор (2), на поверхности которого и находится обрабатываемый материал. Расстояние между поверхностью диэлектрического барьера и плоскостью коллектора выдерживается тремя изоляторами и составляет 10 мм. Коллектор может быть заземлен, либо подключен к источнику высокого постоянного напряжения (положительного или отрицательного). Высокое высокочастотное напряжение

подключается к ПГЭ (3), электрод-подложка (4) заземлен. Электродная система охлаждается пассивно – на электроде-подложке установлен набор массивных радиаторов (5). Проток воздуха через зону обработки отсутствует, влажность атмосферного воздуха 50%. Температура электродов измеряется термопарой в условиях отсутствия напряжения. Во всех экспериментах поверхность барьера не разогревалась выше 42 °С.

Таблица 1. Режимы обработки и всхожесть семян яровой пшеницы.

	5	10	15	20	Минуты экспозиции материала
2,1	82±3* ВК-94				
2,4		74			
2,5		53±5		52±3	
		68±8		65±13	
2,7			58	63±1	
3	60±6	67±12 ВК-94	66 ±10	57±8	54±10
	64	75 ±1 * ВК-94	62	64±1	62±7
	62	56	54	60±4	60±6
кВ					

Таблица 2. Режимы обработки и всхожесть семян озимой пшеницы.

	5	10	15	20	Минуты экспозиции материала
2,1	75±4 ВК-94				
	78±3 ВК-94				
	87±4* ВК-94				
	71±3 ВК-94				
2,5				79±9	
3	69±7 ВК-94	82	78	72±6	
	71±4 ВК-94	64	68	72	
	64	80		54	
	78				
кВ					



Figure 1. Фотография реакции семени яровой пшеницы на воздействие электростатического поля.

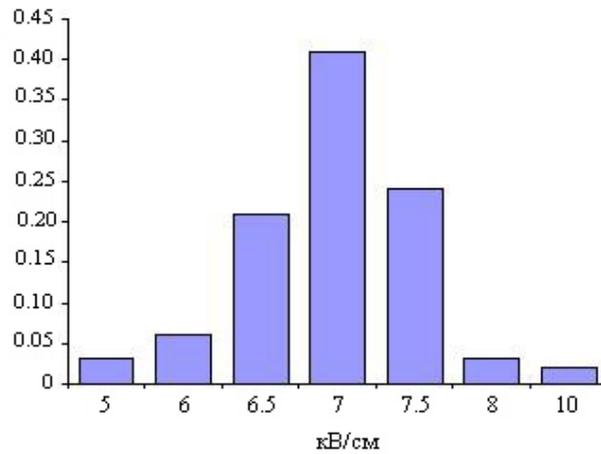


Figure 2. Функция распределения реакции посевного материала на воздействие электростатического поля.

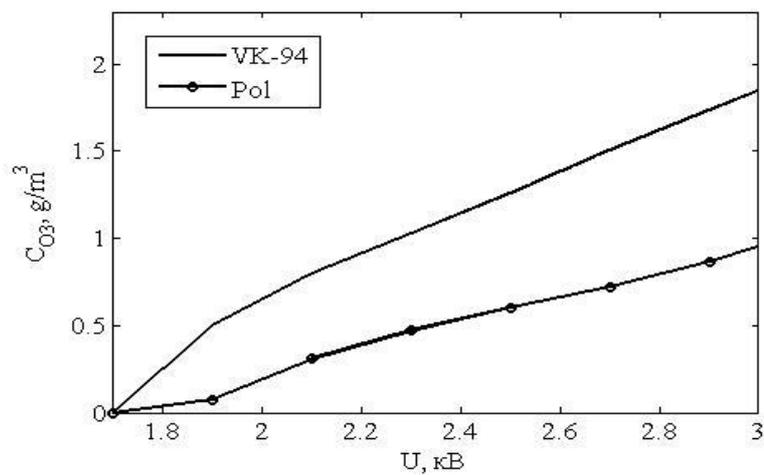


Figure 3. Концентрация озона (г/м^3) на выходе герметичного плазмохимического реактора в зависимости от приложенного напряжения.
Обозначения: VK-94 - для барьера из керамики VK-94; Pol - для барьера из поликарбоната.

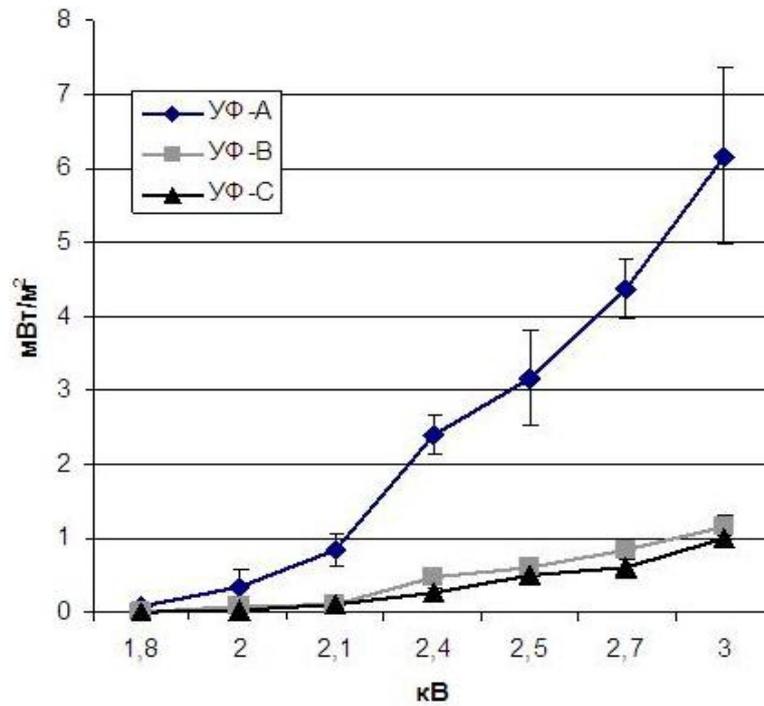


Figure 4. Зависимость абсолютной (в мВт/м²) интенсивности УФ-излучения по диапазонам УФ-А, УФ-В и УФ-С от напряжения на ПГЭ для барьера из поликарбоната.

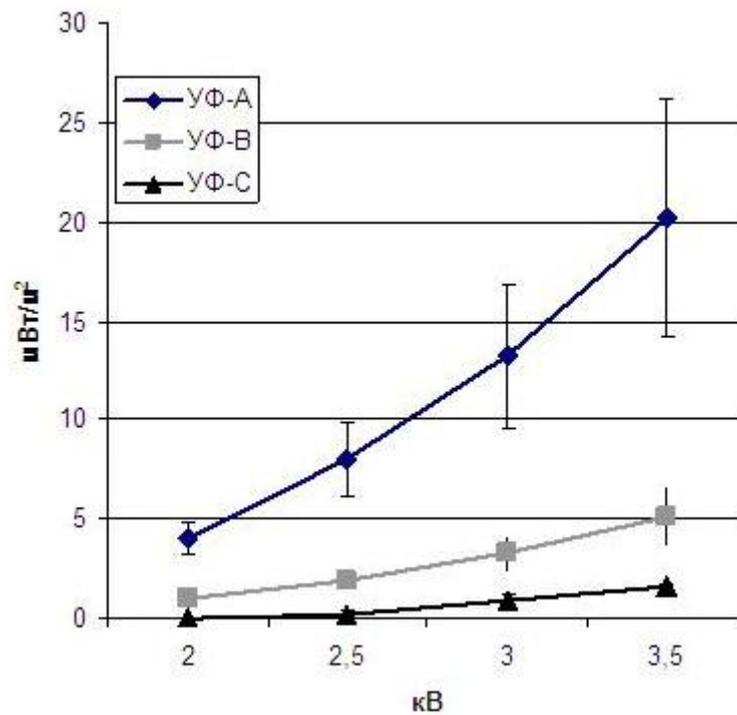


Figure 5. Зависимость абсолютной (в мВт/м²) интенсивности УФ-излучения по диапазонам УФ-А, УФ-В и УФ-С от напряжения на ПГЭ для барьера из корундовой керамики ВК-94.

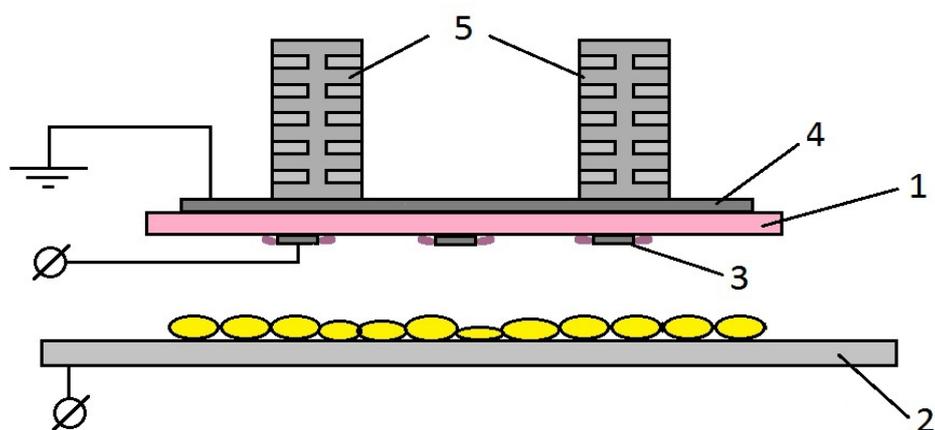


Figure 6. Схема экспериментального стенда по обработке посевного материала.

Обозначения: 1 - электродная система; 2 - электрод коллектор; 3 - ПГЭ; 4 - электрод подложка; 5 - радиаторы охлаждения.

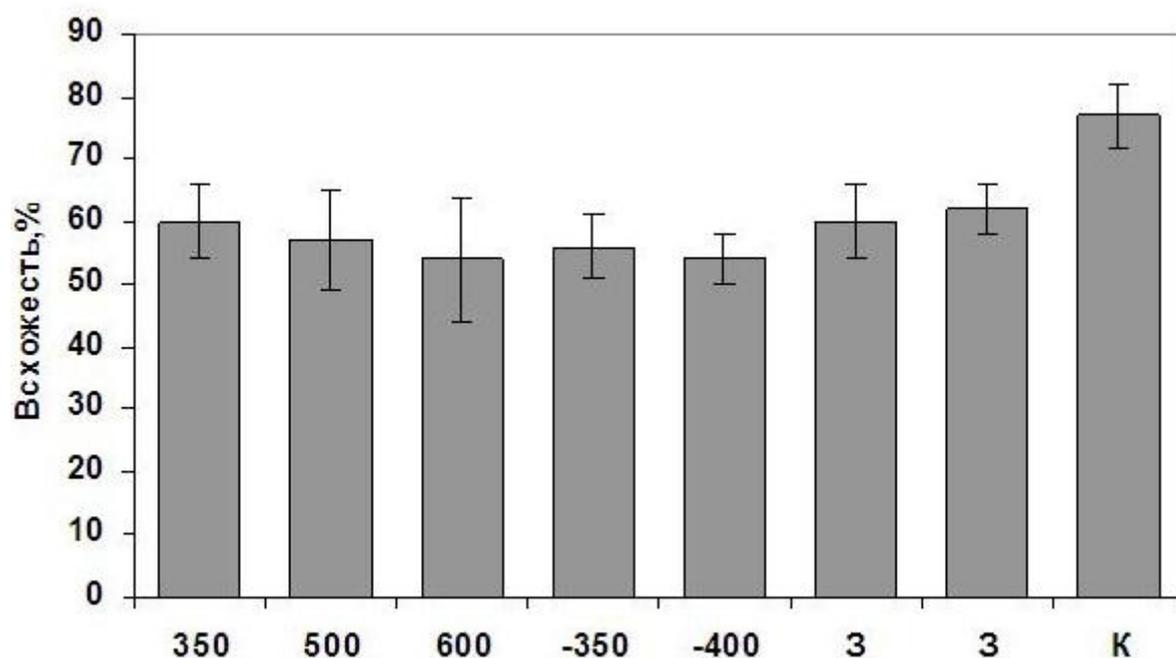


Figure 7. Зависимость всхожести семян яровой пшеницы от тока на коллектор.

Обозначения: 350, 500, 600 – мкА, положительный ток на коллектор, -350, -400 – мкА, отрицательный ток на коллектор, 3 – коллектор заземлен, K – контроль.

RESULTS AND DISCUSSION

Принимая во внимание длительность развития плазмохимических процессов, скорости ионов в

электрическом поле и диффузии химически активных соединений, а также опыт других исследовательских коллективов, время экспозиции

посевного материала было определено в диапазоне 5-20 мин. Диапазон высокочастотных напряжений связан с обеспечением надежной работы диэлектрического барьера (рабочая прочность примерно 10 кВ/см) и начальными напряжениями зажигания поверхностного разряда в рассматриваемой геометрии (1,6-1,8 кВ).

Кроме времени действия и рабочего напряжения электродной системы учитывались и особенности действия электрода коллектора, который либо находился под постоянным высоким напряжением, либо был заземлен. Результаты реакции всхожести семян на питание коллектора и интенсивность ионного потока на коллектор приведены на Рис. 7. Из рисунка видно, что полярность высоковольтного коллектора или его заземление одинаково негативно влияют на всхожесть семян яровой пшеницы, независимо от значения тока. Таким образом, дальнейший анализ данных будет проводиться по двум ключевым параметрам: времени экспозиции и напряжении высоковольтного питания ПГЭ. Результаты экспериментов представлены в виде графических блоков в таблицах 1 (сводка по яровой пшенице) и 2 (сводка по озимой пшенице). В режимах, отмеченных как «ВК-94», семена обработаны в электродных системах с диэлектрическим барьером из корундовой керамики ВК-94, остальные – обработаны в системах с барьером из поликарбоната. Видно, что изменение всхожести семян озимой и яровой пшеницы не зависит от времени экспозиции (в рассматриваемых пределах от 5 до 20 мин) и от приложенного напряжения (от

2,4 до 3 кВ). Однако, сравнение между всхожестью обработанных семян озимой и яровой пшеницы показывает, что семена яровой пшеницы отвечают более выраженным снижением посевных качеств, чем семена озимой пшеницы. Можно предполагать, что постоянная времени процесса воздействия продуктов плазмы поверхностного разряда составляет менее 3 мин и этот процесс имеет насыщающийся характер. Подобный эффект важен с точки зрения технологического использования полученных результатов.

При минимальных временах экспозиции (3 мин) и низкой интенсивности воздействия (2,1 кВ) удалось получить статистически значимое повышение всхожести семян яровой и озимой пшеницы (Табл. 1, 2, отмечено «*»). Подобные результаты для другой формы разряда (компланарный поверхностный диэлектрический барьерный разряд, «DCSBD») были получены в работе Zahoranová с соавт. (2014) при кратковременной обработке семян озимой пшеницы, гороха и кукурузы. Авторами было выявлено, что обработка семян низкотемпературной плазмой значительно ингибирует рост грибов на поверхности семян озимой пшеницы, причем чувствительность различных видов возбудителей к продуктам низкотемпературной плазмы различается, особенно эффективной была обработка в отношении *Fusarium nivale* [Zahoranová et al., 2014].

Можно предполагать, что одним из факторов, улучшающих посевные качества семян озимой и яровой пшеницы при воздействии

низкотемпературной плазмы поверхностного диэлектрического барьерного разряда, является фунгицидный эффект данной обработки. Для выявления других физиолого-биохимических факторов, способствующих улучшению посевных качеств семян зерновых культур, требуется проведение комплексных исследований с применением чистых культур возбудителей грибных заболеваний злаков. Такой подход к предпосевной подготовке семян представляется экономически эффективным и технологически совершенным по сравнению с распространенными в настоящее время методами.

ACKNOWLEDGMENT

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-34-50203 мол_нр).

REFERENCES

- Azharanok V.V., Goncharik S.V., Filatova I.I., Shik A.S., Antonyuk A.S. (2009) Vliyanie vysochastotnoy elektromagnitnoy obrabotki semennogo materiala zernobovyyih kultur na ih posevnyie kachestva i produktivnost. *Elektronnaya obrabotka materialov* [In Russian], **4**, 76-86.
- Ermakov A.M., Ermakova O.N., Maevskii E.I. (2014) Rol' nekotoryih vnutrikletchnyyih signalnyih kaskadov v aktivatsii regeneratsii planariy pri obluchenii nizkotemperaturnoy argonovoy plazmoy. *Biofizika* [In Russian], **59(3)**, 552-557.
- Juldashev R.Z. (2011) Issledovanie ekologicheskii chistyyih i energosberegayuschih UF i plazmennyyih tehnologiy dlya predposevnoy obrabotki semyan. *Izvestiya SPbGAU* [In Russian], **25**, 343-348.
- Kobzev E.N., Kireev G.V., Rakitskiy Yu.A., Martovetskaya I.I., Chugunov V.A., Holodenko V.P., Hramov M.V., Akishev Yu.S., Trushkin N.I., Grushin M.E. (2013) Vozdeystvie holodnoy plazmy na kletochnyuyu stenku i tsitoplazmaticheskuyu membranu *E. coli*. *Prikl. biohim. mikrobiol.* [In Russian], **49(2)**, 164-170.
- Lazukin A.V., Mihalevskiy V.A., Novodvorskiy O.A., Krivov S.A. (2014) Issledovanie opticheskiih karakteristik poverhnostnogo dielektricheskogo bar'ernogo razryada v elektrodnyih sistemah s nanorazmernym pokrytiem TiO₂. *Vestnik nauki Sibiri* [In Russian], **2**, 12.
- Lyubushkina I., Lazukin A., Kirichenko K. and Krivov S. (2014) Some aspects of respiratory metabolism of winter wheat seedlings treated by atmospheric surface dielectric barrier discharge plasma. *FEBS J.*, **281** (Suppl. 1), 599
- Mazets Zh.E., Komarova M.N., Spiridovich E.V., Gorbatshevich V.I., Gorodetskaya E.A., Azharanok V.V., Karpovich V.A., Ermolovich A.A. (2008) Peroksidaznaya aktivnost rasteniy *Lupinus angustifolis*, podvergnutyih plazmennoy i elektromagnitnoy obrabotke. *Vesti BDPU* [In Russian], **4**, Seryiya 3, 26-29.
- Shmigel V.V., Neznamskaya I.I., Niyazov A.M. (1998) Sposob obezzarazhivaniya tolstogo sloya semyan v elektrostaticheskome pole. *Vestnik RASHN* [In Russian], **3**, 73-74.

- Sokolova M.V., Krivov S.A., Skuratov M.V. (2010) Poverhnostnyiy razryad pri povyishennyih temperaturah vozduha. *Pisma v ZhTF* [In Russian], **36(11)**, 24-31.
- Thiyagarajan M., Sarani A. and Gonzales X.F. (2013) Characterization of an atmospheric pressure plasma jet and its applications for disinfection and cancer treatment. *Stud. Health Technol. Inform.*, **184**, 443-449.
- Vereschagin I.P., Livitov V.I., Mirzabekyan G.Z., Pashin M.M. (1974) *Osnovyi elektrogazodinamiki dispersnyih sistem*. M.: Energiya [In Russian], 280 s.
- Zahoranová A., Henselová M., Hudecová D., Kalináková B., Kovacik D., Medvecká V. and Cernak M. (2014) Study of low temperature plasma treatment of plant seeds. *International symposium on high pressure low temperature plasma chemistry (HAKONE XIV)*, Zinnowitz Germany, 21-26 sep., P3-08-09.