

Розділ 5

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 621.3.031

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕМІСІЄЮ ФОТОНІВ ЕЛЕКТРОСТИМУЛЬОВАНОГО НАСІННЯ ОЗИМОГО РІПАКУ ТА ЙОГО ПОСІВНИМИ ЯКОСТЯМИ

Степан Ковалишин¹, к. т. н., Богдан Нестер¹, аспірант, Вадим Пташник¹, к. т. н.,
Олексій Швець¹, к. т. н., Павел Келбаса², д. т. н., Анна Мернік², аспірант,
Ярослав Сало³

¹Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
stkovalyshyn@gmail.com

²Краківський рільничий університет ім. Г. Коллонтая,
алея Міцкевича, 21, 31-120, м. Краків, Польща,
pawel.kielbasa@urk.edu.pl

³Львівська філія УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого,
вул. Л. Мартовича, 15, смт Магерів, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.107>

Ковалишин С., Нестер Б., Пташник В., Швець О., Келбаса П., Мернік А., Сало Я. Дослідження взаємозв'язку між емісією фотонів електростимульованого насіння озимого ріпаку та його посівними якостями

Стаття присвячена підвищенню посівних та врожайних якостей насіннєвого матеріалу озимого ріпаку завдяки його передпосівній стимуляції в електричному полі коронного розряду. Для розкриття причинно-наслідкового зв'язку між режимами передпосівної обробки насіння та його посівними і врожайними якостями, оптимізації параметрів обробки та розширення знань про механізм перебігу біологічних процесів у простимульованому насінні запропоновано використати методи фотолумінесценції та час-корельованого підрахунку одиничних фотонів TCSPC, які випромінює оброблене насіння у видимому діапазоні спектра.

У результаті проведених досліджень встановлено, що поглинання та перетворення енергії зовнішнього електричного поля під час електростимуляції насіння відбувається нелінійно. Основні перетворення відбуваються впродовж перших 15 с незалежно від напруженості електричного поля. Виявлено релаксаційні процеси, які набувають домінуючого характеру після 15 с електростимуляції.

Доведено, що передпосівна електростимуляція забезпечила покращання посівних властивостей насіння озимого ріпаку. Отримані результати корелюються з результатами емісії фотонів, які випромінює оброблене насіння. Найвищі значення енергії проростання та лабораторної схожості, які становили 87 та 96 %, що відповідно на 9 і 8 % перевищили контроль, отримано за режиму обробки $E = 2$ кВ/см, $t = 30$ с. За цього режиму обробки спостерігалось максимальне підвищення наднизької емісії фотонів порівняно з контрольним зразком – 287 проти 125. На підставі цього можна зробити попередні висновки, що найефективнішим режимом обробки посівного матеріалу можна вважати той, за якого емісія випромінюваних ним одиничних фотонів є найбільшою.

Ключові слова: насіння озимого ріпаку, електростимуляція, режими електрообробки, одиничні фотони, емісія, енергія проростання, лабораторна схожість.

Kovalyshyn S., Nester B., Ptashnyk V., Shvets O., Kielbasa P., Miernik A., Salo J. Investigation of the relationship between emission of photons of the electro-stimulated winter rape seeds and its sowing qualities

The article is devoted to the increase of sowing and yield qualities of winter rape seed material due to its pre-sowing stimulation in the electric field of corona discharge.

To reveal the causal relationship between pre-sowing seed treatment modes and its sowing and yield qualities, to optimize treatment parameters and to expand knowledge about the mechanism of biological processes in stimulated seeds, it is proposed to use photoluminescence and time-correlated counting of single photons TCSPC emitted by the seeds in the visible range of the spectrum.

As a result of the conducted researches it is established that absorption and conversion of energy of an external electric field during electro-stimulation of seeds occurs nonlinearly. The main transformations take place during the first 15 s, regardless of the electric field strength. Relaxation processes, which become dominant after 15 s of electrical stimulation, have been identified.

It is proved that pre-sowing electrical stimulation causes improvement of the sowing properties of winter rapeseed. The highest value of germination energy, which was 87 % and exceeded the control by 9 %, was obtained in the treatment mode $E = 2 \text{ kV/cm}$, $t = 30 \text{ s}$. The results of the determination of laboratory similarity show that under such conditions its value was about 98 against 91 % in the control, exceeding its value by 7 %.

The obtained data correlate with the results of photon emission by the treated seed. At the specified treatment mode $E = 2 \text{ kV/cm}$, $t = 30 \text{ s}$, the maximum increase of ultra-low emission of photons, emitted by the treated winter rape seeds was observed. Its value was 287 against 125 in the control. Based on this, it is possible to draw preliminary conclusions that the most efficient mode of pre-sowing electric treatment of seed can be considered the one in which the emission of single photons, emitted by it, is the largest.

Key words: winter rape seeds, electrical stimulation, electric treatment modes, single photons, emission, germination energy, laboratory germination.

Постановка проблеми. З метою інтенсифікації рослинництва в практику сільського господарства почали апробувати різні способи передпосівної обробки насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур, зокрема обробку електростатичним або магнітним полем, опромінення ультрафіолетовим, інфрачервоним або лазерним випромінюванням різної довжини хвилі, стимуляцію струмом високих і надвисоких частот, обробку ультразвуком. Реакція насіннєвого матеріалу на вказані способи передпосівної обробки неоднозначна. Вона залежить як від параметрів конкретного виду стимуляції, так і від сорту насіння. Це спонукає до проведення додаткових досліджень з виявлення механізмів перебігу біологічних процесів та результатів дії різного роду передпосівних обробок на насіннєвий матеріал.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед фізичних методів передпосівної обробки насіння найпопулярнішим виявилась обробка електромагнітним полем. У роботі [9] досліджено вплив електромагнітних полів на рослини помідорів протягом усього вегетаційного періоду. Встановлено, що під їхнім впливом саджанці швидше розвивались, утворювали більшу загальну площу листя та відрізнялись вищим ростом. У ході інших досліджень [6] встановлено, що піддане впливу поля коронного розряду насіння проростає швидше і вирізняється підвищеною динамікою. Завдяки стимулюючому впливу життєздатність насіння моркви зросла на 24 %, редьки та буряка – на 12 %, ячменю – на 9 %. Позитивний вплив стимуляції в електромагнітному полі, що проявляється в зростанні енергії проростання та врожайності, виявлено для насіння низки досліджуваних гібридів кукурудзи [4; 8] і нуту [7]. У праці [3] досліджено вплив електричного поля коронного розряду на посівні якості насіння проса під час обробки в полі додатного та від'ємного коронного розряду. Встановлено, що найвищі значення посівних якостей спостерігались у насінні, яке було піддано обробці

в полі від'ємного коронного розряду. Показники схожості насіння проса, обробленого полем від'ємного коронного розряду за напруги 12 кВ, зросли на 32,1 %. Також відомо, що за тієї самої напруги електростимуляції електропровідність фільтратів насіння проса залежить від напрямленості коронного розряду. Для від'ємного розряду вона є нижчою, ніж для позитивного, що дозволяє опосередковано охарактеризувати ефективність відновлення клітинної мембрани.

Також відомий [1] позитивний вплив електрообробки насіння олійних культур на вихід олії, який зростає на 4,9 % в обробленому насінні.

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що завдяки передпосівній обробці насіннєвого матеріалу зростають його енергія проростання та схожість, урожайність підвищується на 10–30 %, деякі види рослин збільшують уміст сухої речовини, асиміляційну поверхню листя та розгалуженість кореневої системи. Завдяки такій обробці підвищується ефективність функціонування клітини та активізуються внутрішньоклітинні обмінні процеси.

Проте на сьогодні немає достатніх теоретичних і експериментальних даних, які б розкривали причинно-наслідковий зв'язок між режимами передпосівної обробки насіння та його посівними і врожайними якостями. Тому існує необхідність проведення поглиблених досліджень для оптимізації параметрів обробки та розширення знань про механізм перебігу біологічних процесів у простимульованому насінні.

Для розв'язання поставленої задачі запропоновано використати методи фотолюмінесценції та час-корельованого підрахунку одиничних фотонів TCSPC, які випромінює оброблене насіння, у видимому діапазоні спектра та використати їх для визначення залишкового впливу передпосівної обробки на насіннєвий матеріал окремих сільськогосподарських культур.

Пілотні дослідження харчових продуктів методами час-корельованого підрахунку одинич-

них фотонів виявили випромінювання фотонів у багатьох мікроскопічних та макроскопічних системах, зокрема у ліпідних системах, бактеріях, дріжджах, лейкоцитах, нервових клітинах, мітохондріях, хлоропластах, ракових клітинах тощо. Останні дослідження також свідчать про те, що надслабка емісія фотонів є ефективним методом аналізу взаємодії наночастинок із різними біологічними об'єктами [5; 10].

Завдяки методу час-корельованого підрахунку одиничних фотонів TCSPC та його адаптації для досліджуваних видів насіння можна розкрити причинно-наслідковий зв'язок передпосівної обробки з посівними та врожайними якостями, визначити її оптимальні параметри, підтвердити ефективність обробки.

Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення посівних та врожайних властивостей насінневого матеріалу озимого ріпаку, покращання якісних характеристик отриманої з нього продукції завдяки коригуванню та оптимізації режимів його передпосівної електростимуляції на підставі вивчення випромінювання одиничних фотонів простимульованим насінням.

Виклад основного матеріалу. Методика проведення досліджень. Для дослідження використано насіннєвий матеріал гібрида озимого ріпаку MAXIMUS PR44D06. Відбір проб проведено за стандартизованою методикою. Кількість повторень є репрезентативною для умов випадкової зміни контрольованих параметрів насіння.

Електростимуляцію в постійному електромагнітному полі проведено на електрокоронному сепараторі. Її здійснено за різних комбінацій напруженості електричного поля $E = 1,0; 1,5; 2,0$ та $3,0$ кВ/см і таких значень тривалості обробки: $t = 5; 10; 15; 20; 25$ та 30 с. Час відлежування становив 1 добу.

Для реєстрації фотонів, які випромінювали зразки досліджуваного насіння, використано фотопомножувач HAMAMATSU R4220. Експериментальна установка забезпечувала довготривалу термостабілізацію зразка. Світлонепроникну камеру, в якій перебували досліджувані зразки, оснащено системою екранів для періодичного переривання реєстрації фотонів, внаслідок чого шум і корисний сигнал вимірювались по чергово, що дозволяло отримувати достовірні результати навіть за низької інтенсивності сигналу. Тривалість реєстрації випромінювання фотонів становила не менше 30 хвилин для кожного зразка

[2]. Результатом вимірювання наднизького фотонного випромінювання є абсолютна різниця між кількістю фотонів, зареєстрованих фотопомножувачем у світлонепроникній камері з простимульованим посівним матеріалом ріпаку, та кількістю фотонів, зареєстрованих фотопомножувачем у цій камері без насіння, відповідно до виразу

$$L = A - B, \quad (1)$$

де L – кількість фотонів, випромінених досліджуваним зразком; A – кількість фотонів, випромінених досліджуваним зразком, розміщеним у світлонепроникній камері; B – кількість фотонів, створених порожньою світлонепроникною камерою.

Калібрування датчика проводилося щоразу в день вимірювань і полягало у визначенні відношення реакції системи до стандартної дози випромінювання відповідно до виразу

$$K = (A_0 - B) / D, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт калібрування (система вимірювання вважалася ефективною і готовою до вимірювання, якщо $K = 0,8 \dots 1$); A_0 – кількість фотонів в інтервалі 500 с з еталонним збудженням; B – кількість фотонів, зареєстрованих у порожній камері; D – відома доза, що використовується для калібрування (400 фотонів).

Після запуску вимірювальної системи на першій фазі з часовим інтервалом 120 с відбувається стабілізація системи, щоб запобігти завадам, що виникають унаслідок тимчасової дестабілізації стандартних умов. Після початкової фази розпочинається основна (вимірювальна) фаза тривалістю 500 с. Частота запису становить 4 Гц, тобто кожен записаний результат є сумою фотонів, підрахованих упродовж 0,25 с. Ці параметри були визначені, як згадувалося вище, попередніми експериментами, але вони також включали мінімальний час експозиції, необхідний для спостережень, щоб привести до статистично значущих результатів випробувань. На завершальній фазі вимірювання відбувається зупинка, але не дія послідовності вимірювань. Увесь процес вимірювання контролюється в режимі реального часу за допомогою оригінальної програми, зробленої в середовищі LabView.

Для визначення ефекту електростимуляції в обробленому і контрольному зразках визначали посівні якості – енергію проростання та лабораторну схожість насіння. Для цього його пророщували в чашках Петрі. Енергію проростання визначали на 3-й день, а лабораторну схожість – на 7-й день пророщування. Оброблене насіння та контрольну групу в кількості 100 шт. відповідно

розміщували на паперовому ложі в чашці Петрі як одне повторення. Кожен процес повторювався 4 рази. Тест на схожість проводили з використанням термостата за температури 25 °С, яка в ньому підтримувалася автоматично. Щодня під час пророщування для підтримки вологості поверхні фільтрувального паперу його обприскували відповідною кількістю води.

Результати і обговорення. За результатами літературного огляду та враховуючи технологічні особливості процесу електростимуляції, обрано декілька режимів передпосівної електростимуляції насіння ріпаку, які дозволять оцінити ефективність поглинання насінням зовнішньої енергії залежно від тривалості та інтенсивності опромінення. Експериментальні результати спостере-

ження наднизької емісії фотонів після електростимуляції наведено на рис. 1.

Аналіз отриманих залежностей показав, що основне накопичення енергії електростатичного поля насінням відбувається впродовж перших 15 с електростимуляції незалежно від напруженості поля. Зі збільшенням тривалості обробки значний ріст позитивної динаміки не спостерігається.

Водночас максимальне підвищення наднизької емісії фотонів порівняно з контрольним зразком виявлено за напруженості електричного поля $E = 2$ кВ/см, що разом із попередніми результатами вказує на наявність релаксаційних процесів і нелінійний характер поглинання та перетворення енергії насінням ріпаку. Узагальнений результат вимірювання наведено в таблиці.

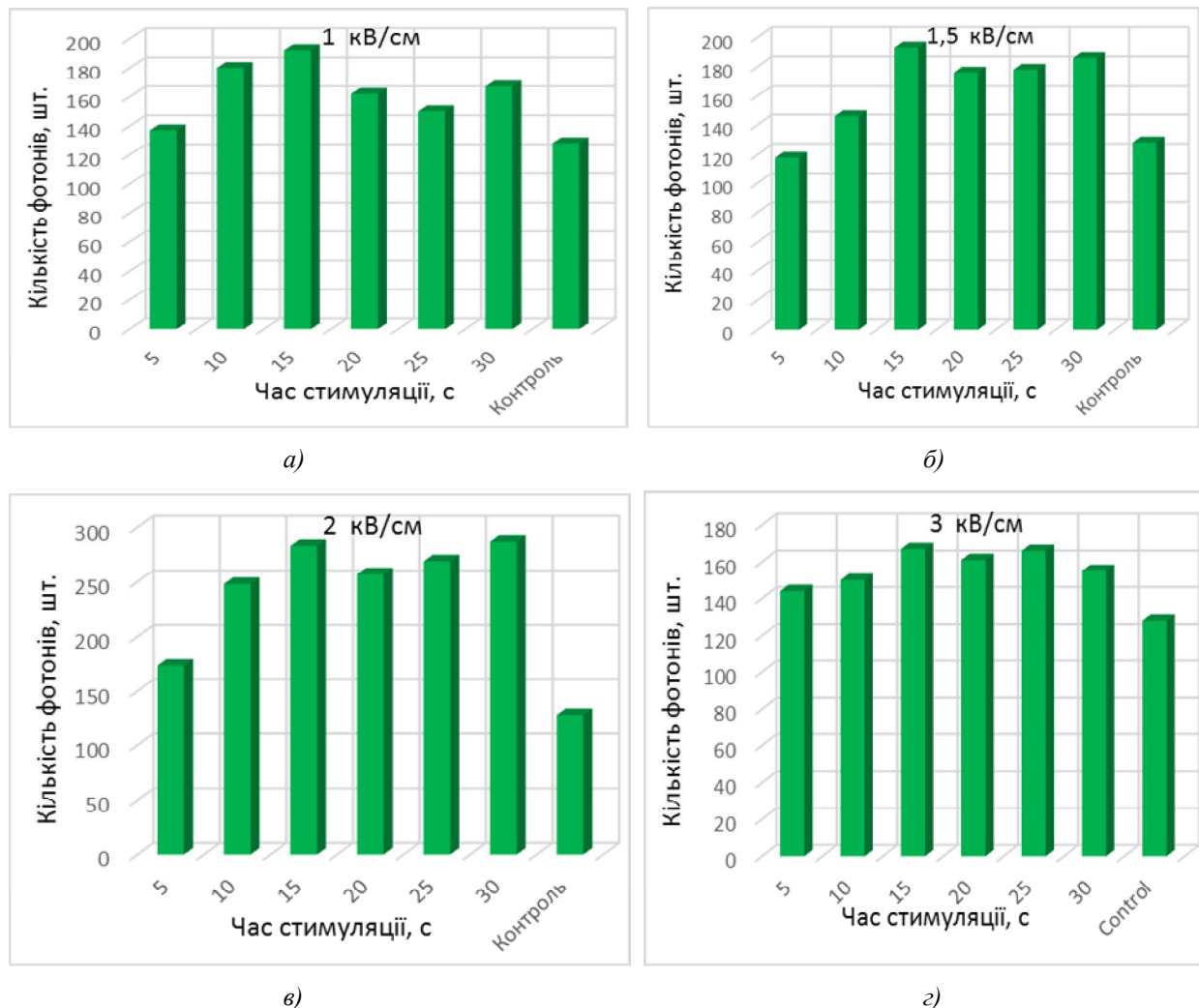


Рис. 1. Гістограми емісії фотонів насінням ріпаку після електростимуляції: 1 кВ/см (а); 1,5 кВ/см (б); 2 кВ/см (в); 3 кВ/см (з)

Fig. 1. Histograms of photon emission by rapeseed after electrical stimulation: 1 kV/cm (a); 1.5 kV/cm (б); 2 kV/cm (в); 3 kV/cm (z)

Таблиця. Узагальнені результати спостереження наднизької емісії фотонів
Table. The generalized results of observation of ultralow photon emission

Напруженість, кВ/см	Час обробки, с						Контроль
	5	10	15	20	25	30	
1	137	180	192	162	150	167	128
1,5	118	146	193	176	178	186	128
2	173	248	283	257	269	287	128
3	144	150	167	161	166	155	128

Оскільки під час електростимуляції часовий та просторовий розподіли електричного поля є рівномірними, то очікувано, що в зразках з однаковою поглинутою енергією повинні проявлятися подібні залежності емісії фотонів. Як видно з табл., для зразків $E = 2$ кВ/см, $t = 5$ с та $E = 1$ кВ/см, $t = 10$ с кількість фотонів становить 173–180 шт., для зразків $E = 1,5$ кВ/см, $t = 10$ с та $E = 3$ кВ/см, $t = 5$ с кількість фотонів становить 144–146 шт., що відповідає висунутій гіпотезі. Натомість для зразків із більшою тривалістю електростимуляції подібних залежностей не виявлено, наприклад, для зразка $E = 3$ кВ/см, $t = 10$ с кількість фотонів становить 150, а для зразка $E = 2$ кВ/см, $t = 15$ с кількість фотонів зростає до 193. Ці результати додатково підтверджують наявність певних релаксаційних процесів у насінні зі збільшенням тривалості електростимуляції.

Отримані результати емісії фотонів насінням ріпаку після електростимуляції значною мірою корелюються з результатами, отриманими під час визначення його посівних якостей. Наведені на рис. 2 дані енергії проростання простикульованого насіння свідчать, що за всіх режимів обробки цей показник перевищує контроль.

Найвище значення енергії проростання, яке становило 87 %, що на 9 % перевищило контроль, отримане за режиму обробки $E = 2$ кВ/см, $t = 30$ с. Слід зазначити, що за цього режиму обробки спостерігалось максимальне підвищення наднизької емісії фотонів порівняно з контрольним зразком – 287 проти 128. Водночас за напруженості поля $E = 2$ кВ/см та всіх досліджуваних значень тривалості обробки як енергія проростання обробленого насіння озимого ріпаку, так і емісія випромінюваних ним фотонів були найвищими за $t = 30$ с. На підставі цього можна зробити попередні висновки, що ефективність випромінюваних фотонів може слугувати одним із показників для визначення ефективності передпосівної електростимуляції досліджуваного посівного матеріалу.

Результати визначення лабораторної схожості (рис. 3) також засвідчують позитивний вплив електрообробки на досліджуваний насінневий матеріал. Найвища лабораторна схожість насіння була за режиму обробки, в якому напруженість електричного поля $E = 2$ кВ/см, $t = 30$ с. За таких умов її значення становили близько 98 % проти 91 % на контролі, тобто на 7 % більше.

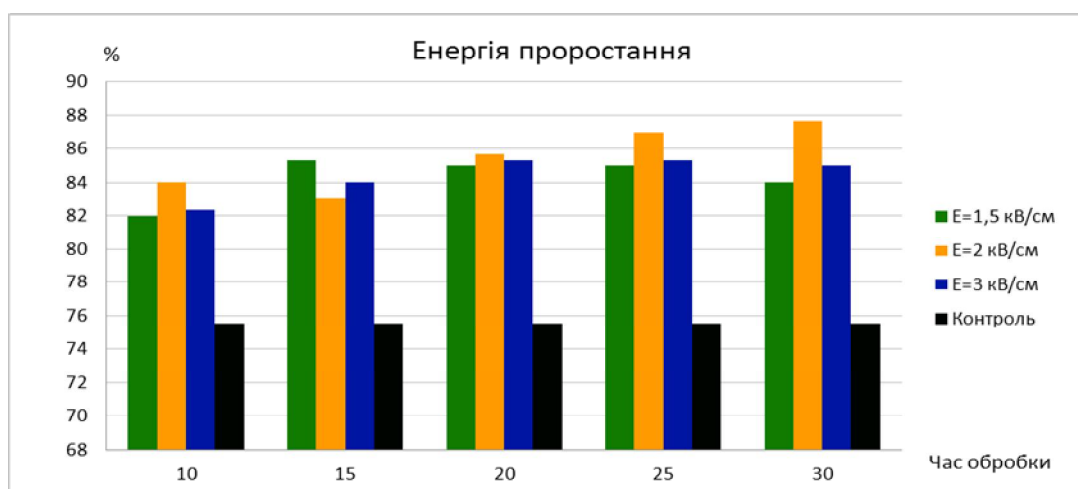


Рис. 2. Вплив режимів передпосівної електростимуляції на енергію проростання насіння озимого ріпаку
Fig. 2. Influence of pre-sowing electrical stimulation modes on germination energy of winter rapeseed

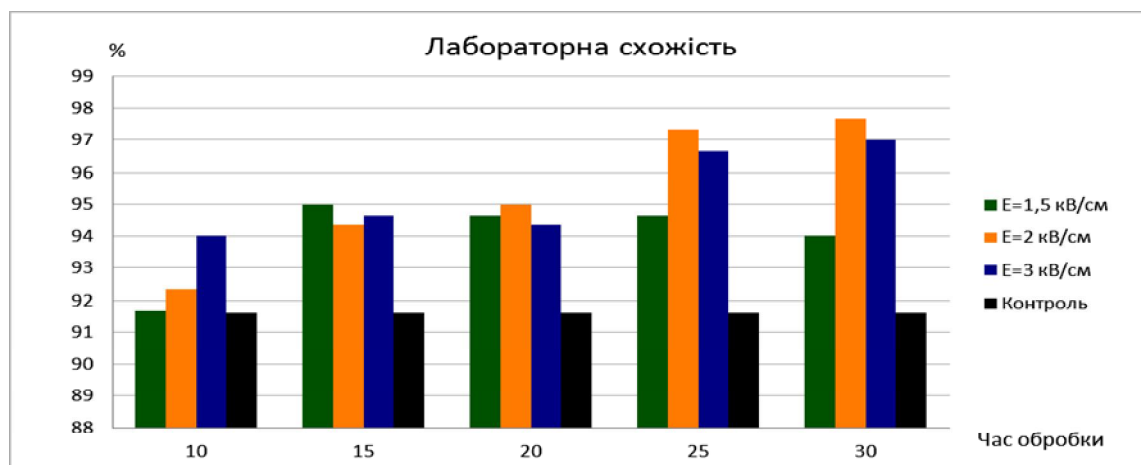


Рис. 3. Вплив режимів передпосівної електростимуляції на лабораторну схожість насіння озимого ріпаку
Fig. 3. Influence of pre-sowing electrical stimulation regimes on laboratory germination of winter rape seeds

Дослідивши вплив передпосівної обробки насіння озимого ріпаку на його посівні якості, а також результати спостереження наднизької емісії ним фотонів бачимо, що енергія проростання та лабораторна схожість є найвищими за тих режимів обробки, за яких кількість випромінюваних фотонів є найбільшою. На підставі цього можна зробити попередній висновок, що найвища ефективність передпосівної електростимуляції досліджуваного посівного матеріалу досягається за режимів, за яких емісія фотонів обробленого в електричному полі насіння є найбільшою.

Висновки

1. Поглинання та перетворення енергії зовнішнього електричного поля під час електростимуляції насіння відбувається нелінійно. Встановлено, що основні перетворення відбуваються впродовж перших 15 с незалежно від напруженості електричного поля. Виявлено релаксаційні процеси, які набувають домінуючого характеру після 15 с електростимуляції.

2. Передпосівна електростимуляція зумовила покращання посівних властивостей насіння озимого ріпаку. Найвищі значення енергії проростання та лабораторної схожості, які становили 87 і 96 %, що на 9 і 8 % більше, ніж на контролі, отримано за режиму обробки $E = 2$ кВ/см, $t = 30$ с. За цього режиму обробки спостерігалось максимальне підвищення наднизької емісії фотонів порівняно з контрольним зразком – 287 проти 125.

3. Результати емісії фотонів насінням ріпаку після електростимуляції значною мірою корелюються з даними, отриманими під час визначення його посівних якостей. На підставі цього можна зробити попередні висновки, що найефективнішим

режимом обробки посівного матеріалу можна вважати той, за якого емісія випромінюваних ним одиничних фотонів є найбільшою.

Бібліографічний список

1. Application of pulsed electric fields and high voltage electrical discharges for oil extraction from sesame seeds / J. Sarkis et al. *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 153. P. 20–27.
2. Effect of laser and variable magnetic field simulation on amaranth seeds germination / A. Dziwulska-Hunek et al. *Int. Agrophys.*, 2009. Vol. 23(3). P. 229–235.
3. Effect of positive and negative corona discharge field on vigor of millet seeds / J. Wang et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 50268–50275. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979288.
4. Electromagnetic field and seed vigour of corn hybrids / R. Zepeda-Bautista et al. *Int. Agrophys.* 2010. Vol. 24(3). P. 329–332.
5. Kiełbasa P., Drózd T., Nawara P., Drózd M. Wykorzystanie emisji biofotonów do parametryzacji jakościowej produktów spożywczych. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. Vol. 93 (1). S. 153–156.
6. Lynikiene S., Pozeliene A., Rutkauskas G. Influence of corona discharge field on seed viability and dynamics of germination. *Int. Agrophys.* 2006. Vol. 20(3). P. 195–200.
7. Mahajan T., Pandey O. Effect of electric field (at different temperatures) on germination of chickpea seed. *African Journal of Biotechnology*. 2014. Vol. 13(1). P. 61–67.
8. Physical characteristics of maize grain and tortilla exposed to electromagnetic field / R. Zepeda et al. *Int. Agrophys.* 2011. Vol. 25(4). P. 389–393.
9. Stašelis A., Duchovskis P., Brazaityte A. Impact of electromagnetic fields on morphogenesis and physiological indices of tomato. *Int. Agrophys.* 2004. Vol. 18(3). P. 277–283.
10. Ultra słaba luminescencja (USL) jako potencjalna metoda oceny jakości żywności tradycyjnej / M. Oziębłowski et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. Vol. 93 (12). P. 131–135.

Стаття надійшла 05.09.2021