

## ВПЛИВ ЖИВИЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА УКОРІНЕННЯ РОСЛИН ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ОЗИМОЇ ЗА ВИКОРИСТАННЯ АЕРОГІДРОПОНІКИ

**Я. С. РЯБОВОЛ**, доктор сільськогосподарських наук

**М. В. ФЕСЬКО**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (доктор філософії)

Уманський національний університет

*У статті обґрунтовано доцільність використання аерогідропоніки для укорінення вихідного матеріалу пшениці м'якої озимої за перенесення рослин з ізолюваної культури in vitro в умови навколишнього природного середовища. Визначено оптимальний склад живильного середовища для індукції ризогенезу. Введення до субстрату половинної концентрації макро- і мікроелементів за прописом Мурасіге–Скуга, 1,0 мг/л нафтилоцтової кислоти, 0,5 мг/л гетероауксину, 0,3 мг/л 6-бензиламінопурину і 1,0 мг/л гіберелінової кислоти забезпечує стимуляцію та оптимальний розвиток кореневої системи рослин. Частка укорінення та інтенсивність розвитку біоматеріалу на аерогідропоніці істотно залежить від генотипу вихідної форми.*

**Ключові слова:** пшениця м'яка озима, вихідний матеріал, культура in vitro, генотип, аерогідропоніка, живильне середовище, регулятори росту, ризогенез, коренева система.

**Постановка проблеми.** Забезпечення оптимальних умов для росту і розвитку рослин, подібних до умов з реалізації їх генетично запрограмованого потенціалу продуктивності, доцільно реалізувати через системи контролю та регуляції. Найефективнішими в цьому контексті є аерогідропонні системи, оскільки вони можуть забезпечувати в широкому діапазоні регулювання факторів середовища, конструюючи компактні та економічно функціональні блоки вирощування біоматеріалу. Застосування таких систем створює стабільний мікроклімат, що сприяє реалізації генетичного потенціалу рослин, одночасно скорочуючи період отримання нового вихідного матеріалу [4, 5].

Аерогідропонні технології мають низку суттєвих переваг перед традиційним адаптаційним процесом за перенесення рослин з ізолюваної культури в природні ґрунтові умови вирощування. Насамперед, це можливість керування мінеральним живленням. Основною перевагою є повний контроль над процесом надходження поживних елементів до кореневої системи, оскільки разом із водним середовищем подається збалансований комплекс речовин заданих концентрацій і співвідношень. Кількісний та якісний склад живильного розчину можна корегувати та контролювати, що забезпечує оптимальні умови живлення. Завдяки цьому аерогідропоніку доцільно використовувати для проведення досліджень з фізіології рослин, генетики, селекції тощо.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Життєдіяльність рослинного організму характеризується циклічністю за чергування фаз мінерального живлення і дихання та добовими ритмами метаболічної активності, зумовлених зміною світлового й темного періодів. Інтенсивність і характер живлення істотно варіюють залежно від онтогенетичної стадії розвитку рослини. Живильний розчин у гідропонних системах повинен містити повний комплекс макро- та мікроелементів і функціонально стимулюючих речовин, що за типових умов культивування надходять до рослини з ґрунтового середовища через абсорбцію кореневої системи [1–3].

За урахування закономірностей фізіолого-біохімічних процесів у клітинах рослини аерогідропонні технології забезпечують можливість не лише формування збалансованих живильних середовищ, а й оперативного регулювання їх іонного та елементного складу для оптимізації продукційного процесу [7]. Тобто створюється керований режим кореневого живлення, що повністю відповідає фізіологічним потребам рослини у живильних елементах і сприяє реалізації їх генетичного потенціалу продуктивності.

Створення оптимальних умов культивування, за можливості програмованого керування основними абіотичними чинниками середовища, забезпечує одержання нового селекційного матеріалу з інтенсивним розвитком вегетативної маси та коренів. За використання аерогідропонної технології вирішальне значення має склад живильного розчину, що диференціюється залежно від виду рослини, періоду онтогенетичного розвитку та умов навколишнього природного середовища агроценозу, куди буде переноситись біоматеріал. До складу живильного середовища для культивування рослинного матеріалу, зазвичай входять макро- та мікроелементи, органічні доповнення, регулятори росту та інші життєво необхідні елементи, що в сукупності забезпечують оптимальний ріст і розвиток рослини та галуження її кореневої системи [8].

**Метою досліджень** була розробка живильного середовища для аерогідропонних систем за інтенсифікації індукції ризогенезу й адаптації рослинного матеріалу пшениці м'якої озимої при перенесенні рослин з ізольованої культури *in vitro* в умови навколишнього природного середовища.

**Методика досліджень.** Дослідження проводили впродовж 2023–2026 років у навчально-науковій лабораторії біотехнології Уманського національного університету. Вихідним матеріалом використовували розмножені *in vitro* гібридні зразки пшениці м'якої озимої, отримані за культури ізольованих незрілих і зрілих зародків, що забезпечує підтримання генетичної гомогенності та редукції рівня соматональної варіабельності. Мікророслини мали сформованих 2–3 первинних корінців, що є індикатором індукованого процесу ризогенезу.

Отримані рослини переносили у посадкові касетні стрічки аерогідропонної установки, функціональна схема якої передбачає дозоване надходження живильного розчину безпосередньо в зону кореневої системи, забезпечуючи оптимізований газообмін та створення регульованого мікросередовища, сприятливого для морфогенезу і подальшої диференціації корневих структур.

На початковому етапі розвитку в умовах аерогідропонного культивування (перша половина вегетаційного періоду) матеріал вирощували за контрольованих параметрів мікроклімату: температурний режим – 20–22 °С, фотоперіод – 16 год, інтенсивність освітлення – 3–4 клк, відносна вологість повітря – 75 %. На кінцевому етапі вегетації з метою адаптації та підвищення екологічної пластичності рослин температурний режим поступово знижували до 12–16 °С, що сприяло їх акліматизації до умов *ex vitro*.

Основу живильного середовища складала половинна концентрація макро- та мікроелементів за прописом Мурасіге–Скуга [6]. Модифікували субстрат регуляторами росту ауксинової природи та гібереліновою кислотою. Зазначені сполуки ініціювали морфогенетичні процеси, зокрема активацію ризогенезу та спрямовану диференціацію клітин з формуванням галуженої кореневої системи.

**Результати досліджень.** У процесі досліджень підтверджено, що регулятори росту ауксинової природи, зокрема нафтилоцтова кислота і гетероауксин істотно впливають на вкорінення та інтенсивність розвитку кореневої системи пшениці м'якої озимої за використання аерогідропонної системи. Доведено, що за введення до середовища різної концентрації НОК змінюється частка вкорінених матеріалів. Найвищий відсоток індукції ризогенезу з високою інтенсивністю наростання корінців зафіксовано у варіанті з модифікацією середовища 1,5 мг/л нафтилоцтової кислоти та 0,5 мг/л гетероауксину ( $78,4 \pm 0,5$ – $89,5 \pm 0,2$  %) (табл. 1).

Не істотно нищу кількість вкорінених рослин отримано за введення до розчину 1,0 мг/л нафтилоцтової кислоти та 0,5 мг/л гетероауксину ( $77,1 \pm 0,9$ – $88,9 \pm 1,1$  %). Проте у варіанті дослідження за використання 1,0 мг/л НОК, в базальній частині рослини закладалась найбільша кількість коренів.

Формування галуженої мичкуватої кореневої системи за впливу вказаних складових живильного середовища сприяло інтенсивному розвитку вегетативної маси та закладання генеративних пагонів (рис.).



**Рис. Закладання генеративних пагонів рослин пшениці м'якої озимої (зразок 41–7/17) (цифровий мікроскоп ОХ-2000Х).**

**Табл. 1. Вплив регуляторів росту ауксинової природи на укорінення клонованих рослин пшениці м'якої озимої за використання аерогідропонної установки**

Селекційний матеріал	Зразок	Модифікація живильного середовища регуляторами росту, мг/л		Кількість укорінених рослин, %	Кількість сформованих первинних корінців на рослину, шт.	Інтенсивність наростання кореневої системи, мм (15-та доба культивування)
		гетероауксин	НОК			
Патрас	St	0,0	0,0	48,3 ± 0,4	1,3 ± 0,2	6,6 ± 0,2
		0,5	0,5	64,1 ± 0,7	1,9 ± 0,4	10,5 ± 0,8
			1,0	77,1 ± 0,9	2,2 ± 0,9	23,4 ± 0,5
			1,5	78,4 ± 0,5	2,8 ± 0,5	25,1 ± 0,2
Золотоколоса (IAL/IRS) × Патрас	41–7/17	0,0	0,0	59,4 ± 0,8	2,0 ± 0,3	9,1 ± 0,8
		0,5	0,5	71,2 ± 0,4	2,9 ± 0,4	14,0 ± 0,3
			1,0	86,0 ± 1,7	3,6 ± 0,4	26,9 ± 1,1
			1,5	87,9 ± 1,1	3,4 ± 0,2	28,5 ± 0,8
Щедрість одеська (IAL/IRS) × Патрас	29–1/48	0,0	0,0	64,2 ± 0,5	1,8 ± 0,2	10,2 ± 0,5
		0,5	0,5	78,7 ± 0,8	3,4 ± 0,5	12,7 ± 1,2
			1,0	88,9 ± 1,1	4,3 ± 0,8	26,4 ± 1,0
			1,5	89,5 ± 0,2	4,8 ± 0,3	28,5 ± 0,5
Фаворитка (IBL/IRS) × Патрас	64–6/1	0,0	0,0	54,3 ± 0,6	1,9 ± 0,5	8,4 ± 0,6
		0,5	0,5	68,2 ± 0,5	3,7 ± 0,6	16,4 ± 0,4
			1,0	75,5 ± 1,0	4,5 ± 0,3	35,4 ± 1,0
			1,5	78,3 ± 0,6	4,6 ± 1,1	36,5 ± 0,7
Фрея (IBL/IRS) × Патрас	12–4/2	0,0	0,0	55,4 ± 0,8	1,8 ± 0,3	8,7 ± 0,5
		0,5	0,5	74,2 ± 1,4	4,3 ± 0,7	15,2 ± 0,6
			1,0	78,9 ± 2,1	5,2 ± 0,2	34,7 ± 0,5
			1,5	80,0 ± 0,8	5,2 ± 1,0	35,2 ± 0,7
<i>HIP<sub>01</sub></i>				1,2	0,6	1,0

З'ясовано, що введення до субстрату гіберелінової кислоти стимулює процес ризогенезу та впливає на інтенсивність розвитку кореневої системи біоматеріалу (табл. 2). Найвищу частку вкорінених рослин пшениці м'якої озимої отримано за введення до живильного середовища 1,5 мг/л гіберелінової кислоти. Проте на цьому варіанті спостерігали формування невеликої кількості корінців ( $2,8 \pm 0,5$ – $5,2 \pm 0,2$  шт./рослину) порівняно з варіантами середовищ до склад яких вводили 1,0 мг/л ГК ( $3,2 \pm 0,9$ – $6,6 \pm 0,5$ ). Модифікація середовища високою концентрацією ГК (1,5 мг/л) сприяла утворенню довгих коренів ( $38,4 \pm 0,7$ – $53,4 \pm 0,7$  мм). Оптимальним середовищем для укорінення клонованих рослин визначено живильний розчин до складу якого вводили 1,0 мг/л гіберелінової кислоти. Частка укоріненого матеріалу залежала від генотипу і варіювала від 67,3 % до 93,5 %. Рослини формували галужену кореневу систему ( $3,2$ – $6,6$  шт./рослину) довжиною ( $35,7 \pm 0,4$ – $52,3 \pm 0,5$  мм) оптимальною для розвитку культури.

**Табл. 2. Вплив гіберелінової кислоти на укорінення клонованих рослин пшениці м'якої озимої за використання аерогідропонної установки**

Селекційний матеріал	Зразок	Модифікація живильного середовища регуляторами росту*, мг/л		Кількість укорінених рослин, %	Кількість сформованих первинних корінців на рослину, шт.	Інтенсивність наростання кореневої системи, мм (15-та доба культивування)
		6-БАП	ГК			
Патрас	St	0,3	0,5	67,3 ± 0,8	2,9 ± 0,4	18,5 ± 0,5
			1,0	79,1 ± 1,0	3,2 ± 0,9	35,7 ± 0,4
			1,5	80,4 ± 0,5	2,8 ± 0,7	38,4 ± 0,7
Золотоколоса (IAL/IRS) × Патрас	41–7/17	0,3	0,5	74,1 ± 0,6	3,9 ± 0,3	20,0 ± 0,5
			1,0	92,0 ± 1,4	4,8 ± 0,5	36,9 ± 1,0
			1,5	92,8 ± 1,0	3,4 ± 0,4	40,5 ± 0,4
Щедрість одеська (IAL/IRS) × Патрас	29–1/48	0,3	0,5	82,2 ± 0,6	4,7 ± 0,6	22,1 ± 0,9
			1,0	93,5 ± 1,5	5,3 ± 0,4	37,5 ± 1,0
			1,5	94,0 ± 0,4	4,6 ± 0,6	42,8 ± 0,5
Фаворитка (IBL/IRS) × Патрас	64–6/1	0,3	0,5	71,2 ± 0,7	4,7 ± 0,6	26,7 ± 0,4
			1,0	81,8 ± 1,8	6,0 ± 0,4	45,7 ± 0,7
			1,5	82,3 ± 0,4	4,6 ± 0,9	52,3 ± 0,8
Фрея (IBL/IRS) × Патрас	12–4/2	0,3	0,5	76,1 ± 1,0	5,3 ± 0,7	25,5 ± 0,6
			1,0	82,2 ± 2,2	6,6 ± 0,5	52,3 ± 0,5
			1,5	83,0 ± 1,2	5,2 ± 0,2	53,4 ± 0,7
<i>НІР<sub>01</sub></i>				<i>1,4</i>	<i>0,8</i>	<i>1,1</i>

Примітка. \* Базове живильне середовище: ½ MS; 1,0 мг/л НОК; 0,5 мг/л гетероауксин.

За концентрації 0,5 мг/л ГК спостерігали істотно нижчу енергію наростання кореневої системи рослини (18,5 ± 0,5–26,7 ± 0,4 мм). Введення до живильного середовища вищої концентрації цитокініну (0,6 мг/л 6-БАП) призводило до формування в базальній частині рослини ущільненої тканини або калюсних структур, що уповільнювало процеси ризогенної активності матеріалу. Відсутність цитокініну в середовищі на укорінення уповільнювало розвиток вегетативної маси рослин. Утворювалась менша кількість листків (1–2 шт.). Листкова пластинка була вузької видовженої форми.

**Висновки.** Підібрано склад живильного середовища для укорінення рослин пшениці м'якої озимої за використання аерогідропоніки. Введення до субстрату половинної концентрації макро- і мікроелементів за прописом середовища Мурасіге–Скуга, 1,0 мг/л нафтилоцтової кислоти, 0,5 мг/л гетероауксину, 0,3 мг/л 6-бензиламінопурину і 1,0 мг/л гіберелінової кислоти забезпечує стимуляцію ризогенезу та оптимальний розвиток кореневої системи рослин. Частка укорінення та інтенсивність розвитку рослини в умовах аерогідропоніки істотно залежить від генотипу вихідного матеріалу.

### Література:

1. Рябовол Я. С., Рябовол Л. О. Використання аерогідропонних технологій для укорінення рослин жита озимого. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції *Національне виробництво й економіка в умовах реформування: стан і перспективи інноваційного розвитку та міжрегіональної інтеграції*. Кам'янець-Подільський, 2015. С. 70–71.
2. Рябовол Я. С., Рябовол Л. О. Адаптація клонованого матеріалу жита озимого за перенесення в польові умови вирощування. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції *Національне виробництво й економіка в умовах реформування: стан і перспективи інноваційного розвитку та міжрегіональної інтеграції*. Кам'янець-Подільський, 2016. С. 52–54.
3. Asao T. Hydroponics. A Standard Methodology for Plant Biological Researches. 2012, Intech.
4. Benton J. Jones Jr. Hydroponics. A Practical Guide for the Soilless Grower. CRC Press, 2004. 440 p.
5. Howard M. Resh. Hydroponic Food Production. A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. CRC Press, 2012.
6. Murashige T. Skoog F. A revised media for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture. *Physiology Plant*. 1962. № 15. P. 473–497.
7. Soffer H., Burger David W. Studies on plant propagation using the aero-hydroponic method. *Acta Hort*. 1988. 230. 261–270.
8. Teale W. D., Paponov I. A., Palme K. Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol*. 2006. V. 7. № 1. P. 847–859.

### References:

1. Riabovol, Ya. S., Riabovol, L. O. (2015). Use of aeroponic technologies for rooting winter rye plants. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "National Production and Economy in the Context of Reform: Status and Prospects of Innovative Development and Interregional Integration"* (pp. 70–71). Kamianets-Podilskyi. [in Ukrainian].
2. Riabovol, Ya. S., Riabovol, L. O. (2016). Adaptation of cloned winter rye material after transfer to field growing conditions. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "National Production and Economy in the Context of Reform: Status and Prospects of Innovative Development and Interregional Integration"* (pp. 52–54). Kamianets-Podilskyi. [in Ukrainian].
3. Asao, T. (2012). *Hydroponics: A standard methodology for plant biological researches*. Intech.
4. Jones, B. J., Jr. (2004). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower*. CRC Press.
5. Resh, H. M. (2012). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press.
6. Murashige, T., Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15, 473–497.
7. Soffer, H., Burger, D. W. (1988). Studies on plant propagation using the aero-hydroponic method. *Acta Horticulturae*, 230, 261–270.

8. Teale, W. D., Paponov, I. A., Palme, K. (2006). Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11), 847–859.

### **Annotation**

**Riabovol I. S., Fesko M. V.**

#### ***Influence of nutrient medium on rooting of plants of soft winter wheat using aeroponics***

*Ensuring optimal conditions for the growth and development of plants, similar to the conditions for realizing their genetically programmed productivity potential, should be implemented through control and regulation systems. Aeroponic systems are the most effective in this context, as they can provide a wide range of regulation of environmental factors, making it possible to design compact and economically functional units for growing biomaterial. The use of such systems creates a stable microclimate that contributes to the realization of the genetic potential of plants, while at the same time shortening the period of obtaining new starting material. The creation of optimized cultivation conditions, with the possibility of programmed control of the main abiotic factors of the environment, ensures the production of new breeding material with intensive development of vegetative mass and roots. When using aeroponic technology, the composition of the nutrient solution is of crucial importance, which differs depending on the type of plant, the period of ontogenetic development and the environmental conditions of the agroecosystem, where the biomaterial will be transferred.*

*The purpose of the research was to develop a nutrient medium for aeroponic systems with intensification of rhizogenesis induction and adaptation of plant material of soft winter wheat when transferring plants from an isolated in vitro culture to natural environmental conditions.*

*The research was conducted during 2023–2026 in the educational and scientific laboratory of biotechnology of the Uman National University. The starting material was propagated in vitro hybrid samples of soft winter wheat, obtained by culturing isolated immature and mature embryos, which ensures maintenance of genetic homogeneity and reduction of the level of somaclonal variability.*

*In the process of research, the composition of the nutrient medium for the rooting of soft winter wheat plants using aeroponics was selected. It has been confirmed that growth regulators of auxin nature, in particular naphthylacetic acid and heteroauxin, significantly affect rooting and the intensity of root system development of soft winter wheat using an aeroponic system. The introduction into the substrate of half the concentration of macro- and microelements according to the Murasige-Skug prescription, 1.0 mg/l of naphthylacetic acid, 0.5 mg/l of heteroauxin, 0.3 mg/l of 6-benzylaminopurine and 1.0 mg/l of gibberellic acid provides stimulation of rhizogenesis and optimal development of the plant root system. The rate of rooting and the intensity of plant development in the conditions of aeroponics significantly depends on the genotype of the source material.*

**Key words:** *soft winter wheat, initial material, in vitro culture, genotype, aeroponics, nutrient medium, growth regulators, rhizogenesis, root system.*