

УДК 631.527:581.14:581.5

## Вплив природних гідрогелевих полісахаридів на ріст і розвиток рослин у культурі *in vitro*

 В. І. Войтовська<sup>1</sup>,  Л. І. Воєвода<sup>2</sup>,  О. В. Притула<sup>2</sup>,  Л. М. Кононенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, e-mail: vvojtovska6@gmail.com

<sup>2</sup>Уманський національний університет, вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна

**Мета.** Оцінити вплив різних природних гідрогелевих полісахаридів (агар-агару, карагенану та гелану) на ріст і розвиток рослин у культурі *in vitro*. **Методи.** Дослідження проводили на насінні та вегетативних експлантах *Lens culinaris*, *Fagopyrum esculentum*, *Sinapis alba*, *Sorghum bicolor*, *Sorghum oryzoidum* та *Arabidopsis thaliana* як тест-об'єкта. Культивування здійснювали на адаптованих середовищах за прописом Мурасіге – Скуга з використанням твердих, напіврідких і рідких форм полісахаридів. Контрольним варіантом було середовище на основі агар-агару. Поживні середовища готували з дотриманням стандартів ISO 11133:2014 та ISO 9001:2015. Культуру підтримували за температури  $24 \pm 2$  °C і фотоперіоду 16/8 год. Експерименти проводили у трьох повтореннях, по 10 рослин у кожному, з оцінкою появи перших коренів, швидкості росту пагонів, висоти рослин, кількості пагонів, початку розвитку нових пагонів та стійкості проти бактеріальних інфекцій. **Результати.** Дослідження показали, що фізико-хімічні властивості гелеутворювачів істотно впливають на ріст і морфогенез рослин. Найкращі показники спостерігалися на середовищах із геланом: перші корені з'являлися раніше (*Arabidopsis thaliana* – 8–10 діб; *Sorghum bicolor* – 11–12 діб; *Lens culinaris* – 13–14 діб), швидкість росту пагонів була максимальною (0,18–0,22 см/добу), висота рослин досягала 6,3–12,0 см, а кількість пагонів – 4–7 шт. Напіврідкі середовища також забезпечували високі показники росту та активність морфогенетичних процесів, тоді як рідкі форми дещо знижували швидкість росту, хоча зберігалася висока фітосанітарна стабільність. Карагенан демонстрував проміжні результати: прискорював коренеутворення порівняно з агар-агаром і підвищував стійкість проти бактеріальних інфекцій, особливо в напіврідкому стані. Агар-агар забезпечував базовий ріст і розвиток рослин, проте рідкі його форми характеризувалися повільним ростом і високою ймовірністю бактеріального зараження. Виявлено, що гелан та напіврідкі форми полісахаридних середовищ є оптимальними для швидкого коренеутворення, високого приросту пагонів і ефективного захисту від контамінації. **Висновки.** Гелан у твердому та напіврідкому стані є найефективнішим гелеутворювачем для культивування різних видів рослин *in vitro*, забезпечуючи інтенсивний ріст, високу продуктивність пагонів та надійний захист від бактеріальних інфекцій. Карагенан може використовуватися як проміжна альтернатива, а агар-агар залишає традиційне, але менш ефективне середовище для експериментів. Отримані дані мають практичне значення для оптимізації умов *in vitro*-культивування і підвищення фітосанітарної стабільності культур.

**Ключові слова:** гель; корені; пагін; поживне середовище; ризогенез.

### Вступ

В умовах сучасної біотехнології вирощування рослин *in vitro* є одним із ключових інструментів дослідження морфогенезу, фізіологічних процесів та стійкості рослин до біо- та абіотичних стресів. Важливим чинником ефективного росту й розвитку експлантів є фізико-хімічні властивості

**Як цитувати:** Войтовська В. І., Воєвода Л. І., Притула О. В., Кононенко Л. М. Вплив природних гідрогелевих полісахаридів на ріст і розвиток рослин у культурі *in vitro*. *Новітні агротехнології*. 2025. Т. 13, № 3. <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348431>



© The Author(s) 2025. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

поживного середовища, зокрема тип, склад і фізичний стан полісахаридних гелеутворювачів. Полісахариди, як-от агар-агар, гелан та карагенан, не лише забезпечують механічну стабільність експлантів, а й істотно впливають на доступність води та розчинених макро- і мікроелементів. Це, своєю чергою, визначає інтенсивність росту, ефективність коренеутворення та формування пагонів. Використання різних фізичних форм полісахаридів (твердих, напіврідких і рідких середовищ) є особливо актуальним для культур, що відрізняються морфологічними та фізіологічними особливостями.

Дослідження взаємодії між типом гелеутворювача та фізичним станом поживного середовища дає змогу оптимізувати умови культивування *in vitro* та поглибити уявлення про механізми коренеутворення, пагоногенезу й формування стійкості рослин проти патогенів. У культурі *in vitro* вибір гелеутворювача є одним із визначальних чинників, що зумовлює біодоступність поживних речовин і подальші морфогенетичні реакції експлантів [1].

Попри те, що агар-агар традиційно використовується як основний гелеутворювач у поживних середовищах, нестабільність його хімічного складу та відносно висока вартість стимулюють пошук більш ефективних і економічно доцільних альтернатив [1, 2]. З хімічної точки зору агар є сумішшю агарози та агаропектину, які містять сульфатні та піруватні групи [3]. Наявність цих компонентів може негативно впливати на розвиток рослинних тканин, що було продемонстровано Calleberg та Johansson [4], які встановили вищу ефективність очищених агарів у культурі пиляків *Nicotiana tabacum*.

Значну увагу дослідників привертає гелланова камедь (Gelrite™) – мікробний полісахарид, що характеризується високою прозорістю та специфічними гідрофізичними властивостями поживного середовища. Shigeta et al. [5] показали, що використання геллану в концентрації 8 г/л у поєднанні з 20 г/л глюкози підвищує частоту укорінення спаржі (*Asparagus officinalis* L.) із 40 до 96 %, що більш ніж удвічі перевищує показники, отримані за застосування нижчих концентрацій (2 г/л). Подібний ефект гелланової камеді (1 %) виявлено і на етапі дозрівання соматичних ембріонів *Pinus strobus*, де підвищена міцність гелю сприяла синхронізації розвитку ембріонів незалежно від генотипу [6].

Ефективність культивування рослин *in vitro* на середовищах, затверділих Gelrite, перевищує показники агару за такими параметрами, як проліферація пагонів, енергія коренеутворення та інтенсивність розвитку калюсу. Водночас фізична жорсткість гелів на основі гелланової камеді істотно залежить від іонного та вуглеводного складу живильного середовища. Збільшення концентрації макросолей середовища MS, сахарози та підвищення рівня рН призводить до зростання твердості гелю Gelrite. Для агарових гелів встановлено протилежну закономірність – їхня жорсткість зростає зі зниженням концентрації солей MS [7]. Подальші дослідження в цьому напрямі були розширені й адаптовані для аналізу дії стресових чинників у культурі *in vitro* із застосуванням різних типів полісахаридів [8].

Іноземні дослідники зазначають, що вирощування рослин на карагенані має виражений біостимулювальний і захисний потенціал. Карагенани, отримані з червоних водоростей відділу *Rhodophyta*, виконують не лише опорну функцію, а й діють як біостимулятори. Вони активують фотосинтетичні процеси, синтез білків і захисні сигнальні шляхи, зокрема саліцилатний та жасмонатний, підвищуючи стійкість рослин до патогенів і абіотичних стресів [9]. Сучасні дані свідчать, що олігокарагенани здатні детоксикувати активні форми кисню, що робить їх перспективними компонентами поживних середовищ в умовах кліматичної мінливості [10].

Дослідження, спрямовані на пошук недорогих замінників агару та зниження собівартості поживних середовищ без втрати їх біологічної ефективності, засвідчили доцільність використання низки альтернативних полісахаридів. Зокрема, Bhattacharya et al. [11] показали, що саго та ізубгол є у 10–18 разів дешевшими за агар, забезпечуючи при цьому задовільний ріст хризантем.

Гуарова камедь у концентрації 2,8 % була визнана ефективним і наддешевим замінником агару (0,005 \$/л проти 1,17 \$/л для агару). Mateen A. et al. [12] установили, що серед багатьох досліджених полісахаридів саме гуарова камедь є перспективною альтернативою для агару. Середовище, затверділе 2,8 % гуарової камеді, залишалось прозорим і забезпечувало ріст трьох досліджуваних видів грибів (*Trichoderma harzianum*, *Alternaria alternata* та *A. solani*) на рівні, аналогічному агару.

Перспективним також є використання трагакантової камеді (*Astragalus gummifer*), яка є біорозкладною та економічно вигідною для мікроклонального розмноження троянд. Для підвищення стабільності середовищ застосовують комбінації агару (0,2–0,3 %) і трагаканту (2–3 %). В'язкість таких комбінованих середовищ була аналогічною контрольним середовищам, що

містили 0,8 % агару, тоді як продуктивність та ріст експлантів перевищували контрольні показники. З огляду на біологічну розкладність, екологічну безпечність і вартість, що вдесятеро нижча за агар, трагакантова камедь розглядається як доцільний компонент для зниження витрат у культурі тканин рослин [13].

Білинська О. В. і Дульнєв П. Г. відзначили позитивний вплив гелеутворювального компонента поживного середовища «Difco» (США) та модифікованого крохмалю (Д-5аМ) на ефективність андрогенезу ячменю [14].

На соматичний ембріогенез і регенерацію цукрової тростини суттєво впливала заміна гелеутворювача (агар або Gelrite) та зміна його концентрації. Найкращі результати отримано на середовищах, затверділих Gelrite, порівняно з агаром у концентрації 1,2 % [15].

Окремим напрямом досліджень є використання сумішей агару з гуаровою, ксантановою камедями та ізуболом як альтернативних гелеутворювачів у культурі тканин рослин. Найпридатнішою виявилася суміш ксантанової камеді з агаром у співвідношенні 6:4, яка забезпечувала морфогенез *Albizzia lebeck* на рівні або вище контролю та мала суттєві економічні переваги [16]. Також перспективним є створення комбінованих композицій, зокрема «xanthagar», що поєднують реологічні переваги агару з низькою вартістю альтернативних полісахаридів [17].

Таким чином, результати сучасних досліджень переконливо свідчать, що використання комбінованих природних полісахаридів дає змогу поєднати високу біологічну ефективність, керовані реологічні властивості та економічну доцільність, що робить їх перспективним напрямом оптимізації живильних середовищ у рослинній біотехнології.

*Мета досліджень* – оцінити вплив різних природних гідрогелевих полісахаридів (агар-агару, карагенану та гелану) на ріст і розвиток рослин у культурі *in vitro*.

### Матеріали та методика досліджень

Дослідження проведено в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН в умовах лабораторії біотехнології. Вихідним матеріалом слугувало насіння культурних рослин, якість якого (чистота, енергія проростання та схожість) відповідала вимогам чинних профільних стандартів: ДСТУ 4141-2002 (сориз), ДСТУ 4130-2002 (сочевиця), ДСТУ 4133-2002 (гречка) та ДСТУ 4134-2002 (гірчиця біла). Для роботи з вегетативними експлантами відбір і оцінювання стану вихідних донорних рослин здійснювали відповідно до положень ДСТУ 2808-95 [18–22].

У культуру *in vitro* вводили насіння таких культур: *Lens culinaris* Medik. (сочевиця, бобова культура, сорт 'Антоніна'), *Fagopyrum esculentum* Moench (гречка, псевдозлакова культура, сорт 'Українка'), *Sinapis alba* L. (гірчиця біла, олійна культура, сорт 'Талісман'), *Sorghum bicolor* (L.) Moench (сорго, злакова культура, сорт 'Лан 59'), *Sorghum oryoidum* (сориз, злакова культура, сорт 'Самаран 6') та *Arabidopsis thaliana* (L.) Heunh. як тест-об'єкт. Культивування здійснювали на різних варіантах поживних середовищ.

Контрольним варіантом було середовище на твердій основі з використанням агар-агару. Усі експериментальні варіанти закладали відповідно до загальноприйнятих методів і стандартних методик культури рослин *in vitro* [23].

Процеси приготування, зберігання та перевірки експлуатаційних характеристик поживних середовищ на основі агару, карагенану та гелану здійснювали з урахуванням вимог стандарту ISO 11133:2014. Контроль мікробіологічної чистоти водної фази середовищ проводили за методикою ISO 11731. Стандартизація роботи лабораторного обладнання, зокрема режимів стерилізації та функціонування чистих зон, базувалася на принципах систем управління якістю відповідно до ISO 9001:2015 та ISO 13485:2016 [24].

Рослини *in vitro* культивували на поживному середовищі за прописом Мурасіге – Скуга, адаптованим для кожного виду. Як гелеутворювачі використовували природні полісахариди – агар-агар, гелан і карагенан – у різних фізичних станах: твердих, напіврідких та рідких середовищах. Концентрації гелеутворювачів становили: агар-агар – 7 г/л, гелан – 2 г/л, карагенан – 5 г/л. Значення рН живильних середовищ регулювали до автоклавування в межах 5,7–5,8.

Перед використанням середовища стерилізували за температури 121 °С протягом 20 хв. Культивування здійснювали за температури 24 ± 2 °С та фотоперіоду 16/8 год (світло / темрява).

Тривалість експерименту становила від 30 до 90 діб залежно від виду рослин і досліджуваних ростових показників. Досліди проводили у трьох повтореннях із вибіркою по 10 рослин у кожному повторенні, що забезпечувало статистичну надійність отриманих даних.

Ростові та фізіологічні параметри оцінювали за такими показниками: поява перших коренів (діб), швидкість росту пагонів (см/доба), висота рослин (см), кількість пагонів (шт.), початок формування нових пагонів (діб), а також стійкість проти бактеріальних інфекцій (за наявністю або відсутністю симптомів ураження).

Отримані результати обробляли методами дисперсійного аналізу, а достовірність різниці між варіантами оцінювали за критерієм найменшої істотної різниці.

Як природні полісахариди використовували агар-агар, гелан і карагенан.

**Агар-агар.** Отримується з морських червоних водоростей родин *Gelidiaceae* та *Gracilariaceae*. Хімічно являє собою суміш агарози та агаропектину. За фізичними властивостями утворює тверді або напівтверді гелі за концентрації 6–8 г/л, добре утримує воду, є термостабільним і зберігає гелеву структуру після автоклавування. Прозорість агарових гелів забезпечує можливість візуального контролю росту коренів і пагонів. У культурі *in vitro* агар-агар забезпечує надійну механічну підтримку експлантів, є універсальним, відносно дешевим і легкодоступним гелеутворювачем. До його недоліків належить можливість наявності домішок у деяких комерційних зразках, що може сприяти бактеріальному росту, а також нижча стабільність рідких середовищ на його основі. Агар-агар є традиційним стандартом для більшості культур *in vitro*, зокрема у твердих і напіврідких середовищах.

**Гелан (Gelrite™).** Бактеріальний полісахарид, який продукується *Sphingomonas elodea*. Хімічний склад представлений глюкозними та глюкуроновими залишками, що зумовлює високий ступінь чистоти препарату. Гелан утворює прозорий, однорідний гель за концентрації 1,5–2,0 г/л, є термостабільним і зберігає структуру після автоклавування. Характеризується високою механічною міцністю навіть у рідких і напіврідких середовищах. У культурі *in vitro* гелан сприяє активному росту коренів і пагонів, відзначається підвищеною стійкістю проти бактеріального зараження та дає змогу формувати середовища різної щільності без втрати структурної стабільності. Серед недоліків – вища вартість порівняно з агар-агаром і потенційна чутливість деяких видів рослин до надмірної жорсткості гелю. Застосовується переважно у високоточних експериментах і дослідженнях морфогенезу чутливих культур.

**Карагенан.** Отримується з морських червоних водоростей родини *Gigartinales*. Хімічно представлений сульфатованими галактанами, серед яких розрізняють κ-, ι- та λ-форми. Залежно від типу та концентрації карагенан утворює тверді, напіврідкі або рідкі середовища. За гелевими властивостями він подібний до агар-агару, проте характеризується нижчою прозорістю. Карагенан є термостабільним і зберігає властивості після автоклавування. У культурі *in vitro* карагенан підвищує вологість середовища, дає змогу регулювати щільність гелю та може проявляти антимікробну активність. До недоліків належить менша прозорість гелів, що ускладнює візуальний контроль коренеутворення, а також потреба в додаткових заходах стерилізації для рідких середовищ. Карагенан застосовують переважно для досліджень впливу фізико-хімічних властивостей гелю на ріст і розвиток експлантів.

У дослідженнях використовували препарати виробництва фірми «Хімлаборектив», характеристику та вартість яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна цінова оцінка полісахаридів залежно від стану середовища			
Полісахарид	Тип середовища	Ціна за 1 кг (USD)	Особливості
Агар-агар	Твердий	30–50	Поширений у біотехнології, використовується для підтримки росту рослин у культурі <i>in vitro</i> . Зазвичай продається у вигляді порошку.
	Рідкий	70–120	Може бути рідким, якщо використовуються розчини агар-агару. Високі ціни через специфічну обробку.
	Напіврідкий	50–80	Середній стан, можливе використання для додаткових умов середовища для культур.
Карагенан	Твердий	20–45	Використовується для покращення консистенції середовища, дешевший, ніж агар.
	Рідкий	50–100	Має вищу вартість, коли використовується в рідкому вигляді для покращення гелеутворення.
	Напіврідкий	35–70	Дешевший, ніж у рідкому вигляді, але іноді використовується для специфічних потреб у гелеутворенні.

Полісахарид	Тип середовища	Ціна за 1 кг (USD)	Особливості
Гелан	Твердий	40–70	Високоякісна альтернатива агар-агару, використовується для високопродуктивних культур, дорогий порівняно з карагеном.
	Рідкий	80–150	Продукти гелану в рідкому вигляді використовуються для специфічних застосувань в індустрії.
	Напіврідкий	60–100	Часто використовується для специфічних додатків, коли потрібен гель або часткове зберігання рідкої консистенції.

Дослідження підтвердило, що рідкі форми поживних середовищ є найбільш уразливими до вторинної контамінації. Варіанти з рідким агар-агаром характеризувалися найнижчою стійкістю проти бактеріальних інфекцій. Водночас використання карагеному та гелану у напіврідкому і твердому станах дозволяло повністю нівелювати ризик розвитку патогенної мікрофлори, що свідчить про кращі адсорбційні та бар'єрні властивості цих полісахаридів щодо потенційних контамінантів.

Загалом гелан виявився найбільш релевантним субстратом для культивування *Arabidopsis thaliana*, оскільки забезпечував найкоротший перехід до ризогенезу та формування нових пагонів, які відбувалися на 18–19 добу культивування. Використання напіврідких форм полісахаридних середовищ сприяло інтенсифікації метаболічних процесів, однак для досягнення максимальної висоти рослин доцільнішим було застосування твердих форм гелану.

За показником імунологічної стійкості культури *in vitro* гелан і напіврідкий карагеном суттєво перевершували традиційний агар-агар, що дає змогу рекомендувати ці гелеутворювачі для тривалих пасажів культури (табл. 2).

Контрольний варіант із твердим агар-агаром характеризувався відносно низькою стійкістю проти бактеріальних інфекцій. Появу перших коренів у цьому варіанті спостерігали на 12-ту добу, висота рослин становила в середньому 5,5 см, кількість коренів не перевищувала трьох, а формування нових пагонів розпочиналося лише на 22-гу добу культивування (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив різних форм полісахаридів на ріст *Arabidopsis thaliana* у культурі *in vitro*, діб

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/доба	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стойкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий К	12 ± 2	0,12 ± 0,03	5,5 ± 0,3	3 ± 1	22 ± 3	Слабка
	Рідкий	14 ± 3	0,08 ± 0,02	4,8 ± 0,2	2 ± 1	24 ± 4	(можливі інфекції)
	Напіврідкий	11 ± 2	0,10 ± 0,03	5,0 ± 0,4	3 ± 1	21 ± 2	Помірна (деякі ураж.)
Карагеном	Твердий	13 ± 2	0,15 ± 0,04	6,0 ± 0,3	4 ± 1	20 ± 3	Помірна
	Рідкий	16 ± 3	0,10 ± 0,03	5,2 ± 0,2	3 ± 1	23 ± 4	(рідкісні інфекції)
	Напіврідкий	12 ± 2	0,13 ± 0,02	5,5 ± 0,3	3 ± 1	22 ± 3	Висока (відсут. інф.)
Гелан	Твердий	9 ± 1	0,18 ± 0,03	6,5 ± 0,4	5 ± 1	19 ± 2	Висока (відсутність інфекцій)
	Рідкий	10 ± 2	0,16 ± 0,04	6,2 ± 0,3	4 ± 1	21 ± 3	
	Напіврідкий	8 ± 1	0,17 ± 0,02	6,3 ± 0,3	5 ± 1	18 ± 2	

У проведених дослідженнях у *Sorghum bicolor* спостерігалися виразні відмінності у рості й розвитку експлантів залежно від типу полісахаридного гелеутворювача та фізичного стану поживного середовища. Поява перших коренів на твердому агар-агаровому середовищі, яке слугувало контрольним варіантом, відбувалася через 15 ± 3 доби, тоді як у рідкому середовищі цей процес затримувався до 18 ± 4 доби. Напіврідке середовище на основі агар-агару сприяло дещо швидшому коренеутворенню (14 ± 3 доби) та забезпечувало помірну стійкість рослин проти бактеріальних інфекцій (табл. 3).

Застосування карагеному зумовлювало інтенсивніший ріст експлантів. На твердому карагеновому середовищі проростання відбувалося через 16 ± 3 доби, швидкість росту пагонів становила 0,17 ± 0,03 см/добу, а висота рослин досягала 7,8 ± 0,6 см. Напіврідкий карагеном стимулював формування більшої кількості пагонів (5 ± 1 шт.) і характеризувався високою стійкістю проти бактеріального ураження. Водночас рідке середовище з карагеномом забезпечувало повільніший ріст і середній рівень резистентності до інфекцій.

Ріст і розвиток *Sorghum bicolor* у культурі *in vitro* за дії досліджуваних чинників, діб

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/доба	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стійкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий К	15 ± 3	0,14 ± 0,02	7,2 ± 0,5	4 ± 1	26 ± 3	Слабка
	Рідкий	18 ± 4	0,09 ± 0,02	6,3 ± 0,4	3 ± 1	28 ± 4	(можливі інфекції)
	Напіврідкий	14 ± 3	0,12 ± 0,03	6,8 ± 0,4	3 ± 1	25 ± 3	Помірна (деякі ураж.)
Карагенан	Твердий	16 ± 3	0,17 ± 0,03	7,8 ± 0,6	5 ± 1	24 ± 2	Помірна
	Рідкий	20 ± 4	0,10 ± 0,02	6,5 ± 0,3	4 ± 1	27 ± 4	(рідкісні інфекції)
	Напіврідкий	15 ± 3	0,14 ± 0,02	7,0 ± 0,5	5 ± 1	26 ± 3	Висока (відсут. інфек.)
Гелан	Твердий	12 ± 2	0,20 ± 0,03	8,5 ± 0,7	6 ± 1	23 ± 2	Висока
	Рідкий	14 ± 3	0,18 ± 0,04	8,2 ± 0,6	5 ± 1	25 ± 3	(відсутність інфекцій)
	Напіврідкий	11 ± 2	0,19 ± 0,03	8,0 ± 0,5	6 ± 1	22 ± 2	

Найбільш швидке коренеутворення та інтенсивний розвиток пагонів спостерігалися на середовищах із геланом. Зокрема, на твердому гелановому середовищі перші корені з'являлися вже на 12 ± 2 добу, швидкість росту пагонів досягала 0,20 ± 0,03 см/добу, а висота рослин становила 8,5 ± 0,7 см.

Установлено, що напіврідке середовище на основі гелану забезпечувало показники росту, співставні з твердими формами: період появи коренів становив 11 ± 2 доби, висота рослин – 8,0 ± 0,5 см, кількість пагонів – 6 ± 1, при цьому рівень стійкості проти бактеріальних інфекцій залишався високим.

Застосування рідкого геланового середовища призводило до певного зниження швидкості росту пагонів (0,18 ± 0,04 см/добу), однак водночас забезпечувало високу фітосанітарну стабільність культури.

Стійкість *Sorghum bicolor* проти бактеріальних інфекцій істотно залежала як від типу гелеутворювача, так і від фізичного стану живильного середовища. На традиційному агар-агаровому середовищі твердий і рідкий варіанти характеризувалися низькою стійкістю з проявами бактеріального ураження, тоді як напіврідке середовище забезпечувало лише помірну резистентність із частковими інфекціями.

Використання карагенану сприяло підвищенню фітосанітарної стабільності культури: у твердому та рідкому станах спостерігалася помірна стійкість, тоді як напіврідкий карагенан забезпечував високий рівень резистентності, що проявлялося відсутністю інфекцій у всіх експлантів (табл. 3).

Найвищу стійкість проти бактеріальних інфекцій забезпечував гелан. У твердому та напіврідкому геланових середовищах бактеріального ураження не зафіксовано, а в рідкому стані також спостерігалася висока фітосанітарна стабільність без проявів інфекцій. Отже, застосування гелану, особливо у твердому та напіврідкому станах, забезпечує максимальний рівень захисту експлантів *Sorghum bicolor* від бактеріальних інфекцій, карагенан характеризується проміжними показниками, тоді як агар-агар є найменш стійким проти бактеріального ураження (табл. 3).

Таким чином, отримані дані свідчать, що гелан та напіврідкі полісахаридні середовища є найбільш сприятливими для росту й розвитку *Sorghum bicolor* у культурі *in vitro*, забезпечуючи швидке коренеутворення, високий приріст пагонів та надійний захист від бактеріальних інфекцій. Водночас культура сорго має певні особливості, зокрема високий вміст фенольних сполук, що потребує проведення додаткових субкультивувань для стабільного росту.

*Sorghum oryzoidum* продемонстрував дещо інші показники росту й розвитку. На твердому агар-агаровому середовищі (контроль) перші корені з'являлися через 20 ± 4 доби, тоді як у рідкому середовищі цей процес затримувався до 22 ± 5 доби. Напіврідке середовище сприяло прискореному коренеутворенню (18 ± 3 доби) та забезпечувало помірну стійкість рослин до бактеріальних інфекцій.

Швидкість росту пагонів варіювала від 0,08 ± 0,01 см/добу у рідкому агар-агарі до 0,12 ± 0,02 см/добу у твердому та напіврідкому середовищах. Висота рослин на твердому агар-агарі досягала 9,3 ± 0,5 см, а кількість пагонів – 5 ± 1 шт., що свідчить про помірний розвиток за використання традиційного твердого гелю.

Середовище на основі карагенану забезпечувало активніший ріст експлантів. На твердому карагенановому середовищі перші корені з'являлися через  $22 \pm 4$  доби, швидкість росту пагонів становила  $0,14 \pm 0,03$  см/добу, висота рослин –  $9,0 \pm 0,6$  см, а кількість пагонів –  $6 \pm 1$ . Напіврідке карагенанове середовище сприяло утворенню такої ж кількості пагонів ( $6 \pm 1$ ) за висоти рослин  $8,9 \pm 0,5$  см та забезпечувало високу стійкість проти бактеріальних інфекцій. Рідке середовище демонструвало дещо повільніший ріст і помірну фітосанітарну стабільність.

Найефективнішим полісахаридом для росту *Sorghum oryzoidum* виявився гелан. На твердому гелановому середовищі перші корені утворювалися через  $19 \pm 4$  доби, швидкість росту досягала  $0,16 \pm 0,03$  см/добу, висота рослин становила  $9,5 \pm 0,7$  см, а кількість пагонів –  $7 \pm 1$ . Напіврідке геланове середовище забезпечувало аналогічні показники (корені –  $17 \pm 3$  доби, висота –  $9,4 \pm 0,6$  см,  $7 \pm 1$  пагонів) при високій стійкості до бактеріальних інфекцій. Рідке середовище на основі гелану дещо знижувало швидкість росту ( $0,14 \pm 0,02$  см/добу) і висоту рослин ( $9,2 \pm 0,6$  см), але також забезпечувало високу фітосанітарну стабільність.

Таким чином, результати свідчать, що гелан у твердому та напіврідкому стані є найбільш сприятливим середовищем для росту та розвитку *Sorghum oryzoidum* у культурі *in vitro*, забезпечуючи швидке коренеутворення, високу кількість пагонів та надійний захист від бактеріальних уражень (табл. 4).

Таблиця 4

Впливу різних форм полісахаридів на ріст і розвиток *Sorghum oryzoidum*

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/день	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стійкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий К	$20 \pm 4$	$0,12 \pm 0,02$	$9,3 \pm 0,5$	$5 \pm 1$	$33 \pm 4$	Слабка
	Рідкий	$22 \pm 5$	$0,08 \pm 0,01$	$8,1 \pm 0,4$	$4 \pm 1$	$35 \pm 4$	(можливі інфекції)
	Напіврідкий	$18 \pm 3$	$0,10 \pm 0,02$	$8,5 \pm 0,5$	$5 \pm 1$	$30 \pm 3$	Помірна (деякі ураж.)
Карагенан	Твердий	$22 \pm 4$	$0,14 \pm 0,03$	$9,0 \pm 0,6$	$6 \pm 1$	$32 \pm 4$	Помірна
	Рідкий	$25 \pm 6$	$0,10 \pm 0,02$	$8,3 \pm 0,5$	$5 \pm 1$	$34 \pm 4$	(рідкісні інфекції)
	Напіврідкий	$21 \pm 3$	$0,12 \pm 0,02$	$8,9 \pm 0,5$	$6 \pm 1$	$31 \pm 3$	Висока (відсут. інфек.)
Гелан	Твердий	$19 \pm 4$	$0,16 \pm 0,03$	$9,5 \pm 0,7$	$7 \pm 1$	$29 \pm 3$	Висока (відсутність інфекцій)
	Рідкий	$21 \pm 4$	$0,14 \pm 0,02$	$9,2 \pm 0,6$	$6 \pm 1$	$31 \pm 3$	
	Напіврідкий	$17 \pm 3$	$0,15 \pm 0,03$	$9,4 \pm 0,6$	$7 \pm 1$	$28 \pm 3$	

Результати досліджень росту й розвитку *Lens culinaris* показали, що на контрольному твердому агар-агаровому середовищі перші корені з'являлися через  $16 \pm 3$  доби, швидкість росту пагонів становила  $0,18 \pm 0,03$  см/добу, а висота рослин досягала  $10,5 \pm 0,6$  см (табл. 5).

Рідке агар-агарове середовище дещо сповільнювало ріст (корені –  $18 \pm 4$  доби; швидкість росту –  $0,14 \pm 0,02$  см/добу) та знижувало висоту рослин до  $9,6 \pm 0,5$  см. Напіврідке агар-агарове середовище сприяло помірному росту: поява коренів –  $15 \pm 3$  доби, висота –  $10,0 \pm 0,6$  см, стійкість проти бактеріальних інфекцій – помірна.

Середовище на основі карагенану забезпечувало більш активний ріст і розвиток пагонів. На твердому середовищі перші корені з'являлися на  $17 \pm 3$  добу, швидкість росту –  $0,20 \pm 0,03$  см/добу, висота рослин –  $10,8 \pm 0,7$  см, кількість пагонів –  $4 \pm 1$ . Напіврідке карагенанове середовище формувало таку ж кількість пагонів при висоті  $10,6 \pm 0,6$  см і відзначалося високою стійкістю проти бактеріальних уражень, тоді як рідке середовище дещо сповільнювало розвиток.

Найсприятливішим середовищем для росту *Lens culinaris* виявився гелан. На твердому гелановому середовищі перші корені утворювалися на  $14 \pm 3$  добу, швидкість росту –  $0,22 \pm 0,04$  см/добу, висота рослин –  $11,3 \pm 0,7$  см, кількість пагонів –  $4 \pm 1$ , а стійкість проти бактеріальних інфекцій була високою. Напіврідке геланове середовище забезпечувало аналогічні показники (корені –  $13 \pm 2$  доби, висота –  $11,2 \pm 0,7$  см,  $5 \pm 1$  пагонів) та відзначалося високою фітосанітарною стабільністю. Рідке середовище дещо знижувало швидкість росту і висоту рослин (корені –  $15 \pm 3$  доби, висота –  $11,0 \pm 0,6$  см), але також підтримувало високу стійкість проти бактеріальних уражень.

Загалом, рідке середовище забезпечує пізніше коренеутворення (15–19 діб) та нижчу швидкість росту ( $0,14$ – $0,20$  см/добу) за стійкості проти бактеріальних інфекцій 70–80 %. Напіврідке середовище демонструє проміжні показники (корені – 13–16 діб, швидкість росту –  $0,16$ –

0,21 см/добу) із високою стійкістю для гелану (0 %) і помірною для карагенану (5–10 %) та агар-агару (10–15 %). Твердий субстрат забезпечує раннє коренеутворення (13–17 діб), максимальну швидкість росту (0,20–0,22 см/добу) та високу фітосанітарну стабільність (0–5 % для гелану та карагенану, до 20–25 % для агар-агару) (табл. 5).

Таким чином, результати свідчать, що гелан у твердому та напіврідкому стані є оптимальним середовищем для росту й розвитку *Lens culinaris* у культурі *in vitro*, забезпечуючи швидке коренеутворення, високу кількість пагонів та надійний захист від бактеріальних інфекцій (табл. 5).

Таблиця 5

Ріст *Lens culinaris in vitro* залежно від природних полісахаридів, діб

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/добу	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стійкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий К	16 ± 3	0,18 ± 0,03	10,5 ± 0,6	3 ± 1	26 ± 3	Слабка
	Рідкий	18 ± 4	0,14 ± 0,02	9,6 ± 0,5	2 ± 1	28 ± 4	(можливі інфекції)
	Напіврідкий	15 ± 3	0,16 ± 0,03	10,0 ± 0,6	3 ± 1	25 ± 3	Помірна (деякі ураж.)
Карагенан	Твердий	17 ± 3	0,20 ± 0,03	10,8 ± 0,7	4 ± 1	27 ± 3	Помірна
	Рідкий	19 ± 4	0,16 ± 0,02	9,9 ± 0,6	3 ± 1	29 ± 4	(рідкісні інфекції)
	Напіврідкий	16 ± 3	0,18 ± 0,03	10,6 ± 0,6	4 ± 1	26 ± 3	Висока (поодин. випад.)
Гелан	Твердий	14 ± 3	0,22 ± 0,04	11,3 ± 0,7	4 ± 1	24 ± 3	Висока (відсутність інфекцій)
	Рідкий	15 ± 3	0,20 ± 0,03	11,0 ± 0,6	4 ± 1	25 ± 3	
	Напіврідкий	13 ± 2	0,21 ± 0,03	11,2 ± 0,7	5 ± 1	23 ± 3	

Дослідження росту й розвитку *Fagopyrum esculentum* показали подібні закономірності, що й у інших культур. На контрольному твердому агар-агаровому середовищі перші корені з'являлися через 14 ± 3 доби, швидкість росту пагонів становила 0,20 ± 0,03 см/добу, а висота рослин досягала 11,2 ± 0,6 см (табл. 6).

Рідке агар-агарове середовище дещо сповільнювало розвиток (корені – 16 ± 4 доби, швидкість росту – 0,16 ± 0,02 см/добу) і зменшувало висоту рослин до 10,3 ± 0,5 см. Напіврідке агар-агарове середовище забезпечувало помірний ріст: поява коренів – 13 ± 2 доби, висота – 10,8 ± 0,6 см, стійкість до бактеріальних інфекцій – помірна.

Середовище на основі карагенану сприяло більш активному росту. На твердому середовищі перші корені з'являлися через 15 ± 3 доби, швидкість росту – 0,22 ± 0,03 см/добу, висота рослин – 11,5 ± 0,7 см, кількість пагонів – 3 ± 1. Напіврідке карагенанове середовище прискорювало коренеутворення (11–12 ± 3 доби), забезпечувало висоту 11,2 ± 0,6 см та високу стійкість проти бактеріальних інфекцій, тоді як рідке середовище карагенану дещо сповільнювало ріст і формування пагонів.

Дослідження показали, що на твердому агар-агарі кількість пагонів становила 3 ± 1 шт., на напіврідкому – 3–4 ± 1 шт., що відповідає проміжному рівню продуктивності. На твердому карагенановому середовищі формувалося 3–4 ± 1 пагонів, на напіврідкому – 4 ± 1 за збільшеної швидкості росту до 0,22 ± 0,03 см/добу.

Для гелану кількість пагонів на твердому та напіврідкому середовищах становила 3–4 ± 1 та 4–5 ± 1 відповідно, що вказує на підвищену продуктивність порівняно з агар-агаром. Максимальна висота рослин на гелані сягала 12,0 ± 0,7 см, на карагенані – 11,5 ± 0,7 см, на агарі – 11,2 ± 0,6 см.

Висока стійкість проти бактеріальних інфекцій спостерігалася на твердому та напіврідкому гелановому середовищі та напіврідкому карагенановому (≈ 90–100 %), тоді як на агарі вона не перевищувала 60–70 %. Ці дані підтверджують, що фізичний стан та тип полісахариду суттєво впливають на швидкість росту, кількість пагонів та фітосанітарний стан експлантів (табл. 6).

Найбільш ефективним середовищем для росту *Fagopyrum esculentum* виявився гелан. На твердому гелановому середовищі перші корені з'являлися через 12 ± 2 доби, швидкість росту – 0,24 ± 0,04 см/добу, висота рослин – 12,0 ± 0,7 см, кількість пагонів – 3 ± 1 за високої стійкості проти бактеріальних інфекцій. Напіврідке геланове середовище забезпечувало аналогічні показники (корені – 11 ± 2 доби, висота – 11,8 ± 0,7 см) та високу фітосанітарну стабільність. Рідке геланове середовище дещо знижувало швидкість росту та висоту рослин (корені – 13 ± 3 доби, висота – 11,6 ± 0,6 см), але зберігало високий рівень захисту від інфекцій (табл. 6).

Таблиця 6

Вплив різних форм полісахаридів на ріст *Fagopyrum esculentum (in vitro)*

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/добу	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стійкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий	14 ± 3	0,20 ± 0,03	11,2 ± 0,6	2 ± 1	24 ± 3	Слабка
	Рідкий	16 ± 4	0,16 ± 0,02	10,3 ± 0,5	2 ± 1	26 ± 4	(можливі інфекції)
	Напіврідкий	13 ± 2	0,18 ± 0,03	10,8 ± 0,6	2 ± 1	23 ± 3	Помірна (деякі ураж.)
Карагенан	Твердий	15 ± 3	0,22 ± 0,03	11,5 ± 0,7	3 ± 1	25 ± 3	Помірна
	Рідкий	17 ± 4	0,18 ± 0,02	10,6 ± 0,6	2 ± 1	27 ± 4	(рідкісні інфекції)
	Напіврідкий	14 ± 3	0,20 ± 0,03	11,2 ± 0,6	3 ± 1	24 ± 3	Висока (поодин. вип.)
Гелан	Твердий	12 ± 2	0,24 ± 0,04	12,0 ± 0,7	3 ± 1	22 ± 3	Висока (відсутність інфекцій)
	Рідкий	13 ± 3	0,22 ± 0,03	11,6 ± 0,6	3 ± 1	23 ± 3	
	Напіврідкий	11 ± 2	0,23 ± 0,03	11,8 ± 0,7	3 ± 1	21 ± 3	

У культурі *Sinapis alba* спостерігався такий самий виразний вплив типу полісахаридного середовища та його фізичного стану на ріст і розвиток експлантів, як і у попередніх культурах (табл. 7).

Таблиця 7

Вплив різних форм полісахаридів на ріст *Sinapis alba* (гірчиця біла) *in vitro*

Полісахарид	Фізичний стан	Поява перших коренів, діб	Швидкість росту, см/добу	Висота рослин, см	Кількість пагонів, шт.	Початок розвитку нових пагонів, діб	Стійкість проти бактеріальних інфекцій
Агар-агар	Твердий	12 ± 2	0,22 ± 0,03	11,8 ± 0,6	3 ± 1	24 ± 3	Слабка
	Рідкий	15 ± 3	0,16 ± 0,02	10,2 ± 0,5	2 ± 1	27 ± 3	Слабка
	Напіврідкий	11 ± 2	0,20 ± 0,03	11,0 ± 0,6	3 ± 1	22 ± 2	Помірна
Карагенан	Твердий	14 ± 3	0,24 ± 0,04	12,3 ± 0,7	4 ± 1	23 ± 3	Помірна
	Рідкий	17 ± 4	0,18 ± 0,03	10,8 ± 0,6	3 ± 1	26 ± 3	Помірна
	Напіврідкий	13 ± 2	0,22 ± 0,03	11,9 ± 0,6	4 ± 1	22 ± 2	Висока
Гелан	Твердий	10 ± 2	0,28 ± 0,04	13,1 ± 0,7	5 ± 1	20 ± 2	Висока
	Рідкий	12 ± 2	0,25 ± 0,03	12,5 ± 0,6	4 ± 1	22 ± 2	Висока
	Напіврідкий	9 ± 1	0,27 ± 0,04	12,9 ± 0,7	5 ± 1	19 ± 2	Висока

На контрольному твердому агар-агаровому середовищі перші корені з'являлися через 12 ± 2 доби, швидкість росту пагонів становила 0,22 ± 0,03 см/добу, висота рослин – 11,8 ± 0,6 см, кількість пагонів – 3 ± 1 шт. Рідке агар-агарове середовище уповільнювало розвиток (корені – 15 ± 3 доби, швидкість росту – 0,16 ± 0,02 см/добу) та зменшувало висоту рослин до 10,2 ± 0,5 см, при цьому спостерігалася слабка стійкість проти бактеріальних інфекцій. Напіврідке агар-агарове середовище забезпечувало помірний ріст: перші корені з'являлися на 11 ± 2 доби, висота рослин – 11,0 ± 0,6 см, а стійкість проти бактеріальних уражень була помірною.

Середовище на основі карагенану стимулювало активніший ріст. На твердому середовищі перші корені з'являлися через 14 ± 3 доби, швидкість росту – 0,24 ± 0,04 см/добу, висота рослин – 12,3 ± 0,7 см, кількість пагонів – 4 ± 1. Напіврідке карагенанове середовище забезпечувало високу стійкість до інфекцій та формування 4 ± 1 пагонів при висоті 11,9 ± 0,6 см. Рідке середовище карагенану дещо уповільнювало розвиток (17 ± 4 доби, висота – 10,8 ± 0,6 см) та забезпечувало помірну стійкість.

Найефективнішим полісахаридом для росту *Sinapis alba* виявився гелан. На твердому гелановому середовищі перші корені з'являлися через 10 ± 2 доби, швидкість росту досягала 0,28 ± 0,04 см/добу, висота рослин – 13,1 ± 0,7 см, кількість пагонів – 5 ± 1 за високої стійкості проти бактеріальних інфекцій. Напіврідке геланове середовище забезпечувало аналогічні показники (корені – 9 ± 1 доба, висота – 12,9 ± 0,7 см, 5 ± 1 пагонів), а рідке середовище трохи знижувало швидкість росту (0,25 ± 0,03 см/добу) та висоту рослин (12,5 ± 0,6 см), але також підтримувало високий рівень захисту від інфекцій.

## Висновки

Гелан у твердому та напіврідкому стані виявився оптимальним гелеутворювачем для росту й розвитку рослин *in vitro*. Він забезпечує раннє коренеутворення (8–17 діб), високі темпи росту пагонів (0,15–0,28 см/добу), максимальну висоту рослин (7,0–13,1 см) та формування більшої кількості пагонів (3–7 шт.) у всіх досліджених культурах: *Arabidopsis thaliana*, *Sinapis alba*, *Fagopyrum esculentum*, *Lens culinaris*, *Sorghum bicolor* та *Sorghum oryzoidum*. Крім того, гелан забезпечує повну відсутність бактеріальних інфекцій, що є критично важливим для успішного мікророзмноження.

Карагенан демонструє проміжні показники росту та стійкості: швидкість росту пагонів – 0,10–0,24 см/добу, висота рослин – 6,5–12,3 см, фітосанітарна стабільність – помірна.

Традиційний агар-агар забезпечує базовий ріст і коренеутворення (швидкість росту – 0,08–0,22 см/добу, перші корені з'являються через 12–22 доби), але має нижчу стійкість проти бактеріальних інфекцій.

Таким чином, для підвищення ефективності росту та продуктивності культур у різних фізичних станах рекомендується використовувати гелан як основний гелеутворювач. Карагенан можна застосовувати як альтернативний полісахарид із проміжними результатами, тоді як агар-агар слугує базовим контролем для оцінки ефективності інших середовищ.

## Використана література

1. Cameron S. I. Plant Tissue Culture Gelling Agents and Supports: History, Development and Function. *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: Advances and Topical Issues. Volume V* / edited by J. A. Teixeira da Silva. Isleworth : Global Science Books, 2006. P. 171–190.
2. Cameron S. I. Tissue culture gel firmness: measurement and effects on growth. *Plant Tissue Culture Engineering. Focus on Biotechnology* / edited by S. D. Gupta, Y. Ibaraki. Dordrecht : Springer, 2008. P. 329–337. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3694-1\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3694-1_17)
3. Rees D. A. Polysaccharide gels and their interactions. *Chemistry and Industry*. 1972. Vol. 19. P. 630–636.
4. Calleberg E. K., Johansson L. B. Effect of gelling agents on anther cultures. *In vitro haploid production in higher plants. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture* / edited by S. M. Jain, S. K. Sopory, R. E. Veilleux. Dordrecht : Springer, 1996. P. 189–203. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1860-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1860-8_11)
5. Shigeta J. I., Sato K., Tanaka S. et al. Efficient plant regeneration of asparagus by inducing normal roots from *in vitro* multiplied shoot explants using gellan gum and glucose. *Plant Science*. 1996. Vol. 113, No. 1. P. 99–104. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04273-3](https://doi.org/10.1016/0168-9452(95)04273-3)
6. Klimaszewska K., Smith D. R. Maturation of somatic embryos of *Pinus strobus* is promoted by a high concentration of gellan gum. *Physiologia Plantarum*. 1997. Vol. 100, No. 4. P. 949–957. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb00022.x>
7. Huang L.-C., Kohashi C., Vangundy R., Murashige T. Effects of common components on hardness of culture media prepared with gelrite™. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*. 1995. Vol. 31, No. 2. P. 84–89. <https://doi.org/10.1007/BF02632242>
8. Hayashi L., Faria G. S. M., Nunes B. G. et al. Effects of salinity on the growth rate, carrageenan yield, and cellular structure of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) cultured *in vitro*. *Journal of Applied Phycology*. 2011. Vol. 23, No. 3. P. 439–447. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9595-6>
9. Hossain M. M., Sultana F., Khan S. et al. Carrageenans as biostimulants and bio-elicitors: plant growth and defense responses. *Stress Biology*. 2024. Vol. 4, No. 1. Article 3. <https://doi.org/10.1007/s44154-023-00143-9>
10. Manchanda P., Gosal S. S. Effect of activated charcoal, carbon sources and gelling agents on direct somatic embryogenesis and regeneration in sugarcane via leaf roll segments. *Sugar Tech*. 2012. Vol. 14, No. 2. P. 168–173. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0143-3>
11. Bhattacharya P., Dey S., Bhattacharyya B. C. Use of low-cost gelling agents and support matrices for industrial scale plant tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 1994. Vol. 37, No. 1. P. 15–23. <https://doi.org/10.1007/BF00048112>
12. Mateen A., Hussain S., Rehman S. U. et al. Suitability of various plant derived gelling agents as agar substitute in microbiological growth media. *African Journal of Biotechnology*. 2012. Vol. 11, No. 45. P. 10362–10367.
13. Karimi S., Salehi H., Ashiri F. Tragacanth, a novel and cheap gelling agent in carnation and miniature rose tissue culture media. *Journal of Ornamental Plants*. 2016. Vol. 6, No 4. P. 253–260.
14. Білінська О. В., Дульнев П. Г. Вплив гелеутворюючого компонента живильного середовища на ефективність отримання гаплоїдів ячменю ярого (*Hordeum vulgare* L.) у культурі пиляків *in vitro*. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2014. Т. 15. С. 20–24. URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/178242>

15. Manchanda P., Gosal S. S. Effect of activated charcoal, carbon sources and gelling agents on direct somatic embryogenesis and regeneration in sugarcane via leaf roll segments. *Sugar Tech.* 2012. Vol. 14, No. 2. P. 168–173.
16. Jain-Raina R., Babbar S. B. Evaluation of blends of alternative gelling agents with agar and development of xanthagar, a gelling mix, suitable for plant tissue culture media. *Asian Journal of Biotechnology.* 2011. Vol. 10. P. 153–164. <https://doi.org/10.3923/ajbkr.2011.153.164>
17. Jain R., Babbar S. B. Xanthan gum: an economical substitute for agar in plant tissue culture media. *Plant Cell Reports.* 2006. Vol. 25, Iss. 2. P. 81–84. <https://doi.org/10.1007/s00299-005-0039-8>
18. ДСТУ 4141-2002. Насіння зернових культур. Сорго (*Sorghum bicolor* L.). Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 12 с.
19. ДСТУ 4130-2002. Насіння бобових культур. Загальні технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 14 с.
20. ДСТУ 4133-2002. Насіння гречки (*Fagopyrum esculentum* Moench). Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 10 с.
21. ДСТУ 4134-2002. Насіння олійних культур. Гірчиця біла (*Sinapis alba* L.). Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 11 с.
22. ДСТУ 2808-95. Саджанці плодкових і декоративних культур. Загальні технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1995. 18 с.
23. Біотехнологія. Практикум / М. Д. Мельничук та ін. Київ: Аграр Медіа Груп, 2011. 215 с.
24. ISO 11133:2014. Microbiology of food, animal feed and water. Preparation, production, storage and performance testing of culture media. Geneva: International Organization for Standardization, 2014. 98 p.
25. ISO 11731:2017. Water quality. Enumeration of Legionella. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 64 p.
26. ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. 29 p.
27. ISO 13485:2016. Medical devices. Quality management systems. Requirements for regulatory purposes. Geneva: ISO, 2016. 28 p.

## References

1. Cameron, S. I. (2006). Plant tissue culture gelling agents and supports: History, development and function. In J. A. Teixeira da Silva (Ed.), *Floriculture, ornamental and plant biotechnology: Advances and topical issues* (Vol. 5, pp. 171–190). Global Science Books.
2. Cameron, S. I. (2008). Tissue culture gel firmness: Measurement and effects on growth. In S. D. Gupta, & Y. Ibaraki (Eds.), *Plant tissue culture engineering. Focus on biotechnology* (pp. 329–337). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3694-1\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3694-1_17)
3. Rees, D. A. (1972). Polysaccharide gels and their interactions. *Chemistry and Industry*, 19, 630–636.
4. Calleberg, E. K., & Johansson, L. B. (1996). Effect of gelling agents on anther cultures. In S. M. Jain, S. K. Sopory, & R. E. Veilleux (Eds.), *In vitro haploid production in higher plants. Current plant science and biotechnology in agriculture* (pp. 189–203). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1860-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1860-8_11)
5. Shigeta, J., Sato, K., Tanaka, S., Nakayama, M., & Mii, M. (1996). Efficient plant regeneration of asparagus by inducing normal roots from in vitro multiplied shoot explants using gellan gum and glucose. *Plant Science*, 113(1), 99–104. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04273-3](https://doi.org/10.1016/0168-9452(95)04273-3)
6. Klimaszczyńska, K., & Smith, D. R. (1997). Maturation of somatic embryos of *Pinus strobus* is promoted by a high concentration of gellan gum. *Physiologia Plantarum*, 100(4), 949–957. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb00022.x>
7. Huang, L.-C., Kohashi, C., Vangundy, R., & Murashige, T. (1995). Effects of common components on hardness of culture media prepared with Gelrite™. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 31(2), 84–89. <https://doi.org/10.1007/BF02632242>
8. Hayashi, L., Faria, G. S. M., Nunes, B. G., Zitta, C. S., Scariot, L. A., Rover, T., Felix, M. R. L., & Bouzon, Z. L. (2011). Effects of salinity on the growth rate, carrageenan yield, and cellular structure of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) cultured *in vitro*. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 439–447. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9595-6>
9. Hossain, Md. M., Sultana, F., Khan, S., Nayeema, J., Mostafa, M., Ferdus, H., Tran, L.-S. P., & Mostofa, M. G. (2024). Carrageenans as biostimulants and bio-elicitors: Plant growth and defense responses. *Stress Biology*, 4(1), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s44154-023-00143-9>
10. Manchanda, P., & Gosal, S. S. (2012). Effect of activated charcoal, carbon sources and gelling agents on direct somatic embryogenesis and regeneration in sugarcane via leaf roll segments. *Sugar Tech*, 14(2), 168–173. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0143-3>

11. Bhattacharya, P., Dey, S., & Bhattacharyya, B. C. (1994). Use of low-cost gelling agents and support matrices for industrial scale plant tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 37(1), 15–23. <https://doi.org/10.1007/BF00048112>
12. Mateen, A., Hussain, S., Rehman, S. U., Mahmood, S., & Khan, M. A. (2012). Suitability of various plant derived gelling agents as agar substitute in microbiological growth media. *African Journal of Biotechnology*, 11(45), 10362–10367.
13. Karimi, S., Salehi, H., & Ashiri, F. (2016). Tragacanth, a novel and cheap gelling agent in carnation and miniature rose tissue culture media. *Journal of Ornamental Plants*, 6(4), 253–260.
14. Bilynska, O. V., & Dulniew, P. H. (2014). Effect of medium gelatinized component on the efficiency of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) haploid production in anther culture *in vitro*. *Factors of Experimental Evolution of Organisms*, 15, 20–24. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/178242>
15. Manchanda, P., & Gosal, S. S. (2012). Effect of activated charcoal, carbon sources and gelling agents on direct somatic embryogenesis and regeneration in sugarcane via leaf roll segments. *Sugar Tech*, 14(2), 168–173.
16. Jain-Raina, R., & Babbar, S. B. (2011). Evaluation of blends of alternative gelling agents with agar and development of xanthagar, a gelling mix, suitable for plant tissue culture media. *Asian Journal of Biotechnology*, 10, 153–164. <https://doi.org/10.3923/ajbkr.2011.153.164>
17. Jain, R., & Babbar, S. B. (2006). Xanthan gum: An economical substitute for agar in plant tissue culture media. *Plant Cell Reports*, 25(2), 81–84. <https://doi.org/10.1007/s00299-005-0039-8>
18. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2002). *Cereal seeds. Sorghum (Sorghum bicolor L.). Specifications* (DSTU 4141-2002). [In Ukrainian]
19. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2002). *Legume seeds. General specifications* (DSTU 4130-2002). [In Ukrainian]
20. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2002). *Buckwheat seeds (Fagopyrum esculentum Moench). Specifications* (DSTU 4133-2002). [In Ukrainian]
21. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2002). *Oilseeds. White mustard (Sinapis alba L.). Specifications* (DSTU 4134-2002). [In Ukrainian]
22. Derzhstandart Ukrainy. (1995). *Seedlings of fruit and ornamental crops. General specifications* (DSTU 2808-95). [In Ukrainian]
23. Melnychuk, M. D., Hryhoriuk, I. P., Novak, T. V., Kliachenko, O. L., & Kolomiets, Yu. V. (2011). *Biotechnology. Workshop*. Ahrar Media Hrup. [In Ukrainian]
24. International Organization for Standardization. (2014). *Microbiology of food, animal feed and water – Preparation, production, storage and performance testing of culture media* (ISO Standard No. 11133:2014).
25. International Organization for Standardization. (2017). *Water quality – Enumeration of Legionella* (ISO Standard No. 11731:2017).
26. International Organization for Standardization. (2015). *Quality management systems – Requirements* (ISO Standard No. 9001:2015).
27. International Organization for Standardization. (2016). *Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes* (ISO Standard No. 13485:2016).

UDC 631.527:581.14:581.5

**Voitovska, V. I.<sup>1</sup>, Voievoda, L. I.<sup>2</sup>, Prytula, O. V.<sup>2</sup>, & Kononenko, L. M.<sup>2</sup>** (2025). Effect of natural hydrogel polysaccharides on *in vitro* plant growth and development. *Advanced Agritechnologies*, 13(3). <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.348431> [In Ukrainian]

<sup>1</sup>*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, \*e-mail: vvojtovska6@gmail.com*

<sup>2</sup>*Uman National University, 1 Institutaska St., Uman, Cherkassy region, 20305, Ukraine*

**Purpose.** To evaluate the effect of different natural hydrogel polysaccharides (agar, carrageenan, and gellan) on *in vitro* plant growth and development. **Methods.** The study was conducted on seeds and vegetative explants of *Lens culinaris*, *Fagopyrum esculentum*, *Sinapis alba*, *Sorghum bicolor*, *Sorghum oryzoidum*, and *Arabidopsis thaliana* as test objects. Cultivation was carried out on adjusted Murashige–Skoog media using solid, semi-solid, and liquid forms of polysaccharides. The control variant was agar-based medium. Nutrient media were prepared in compliance with ISO 11133:2014 and ISO 9001:2015 standards. Cultures were maintained at  $24 \pm 2$  °C and a photoperiod of 16/8 h. Experiments were carried out in three replicates, with 10 plants in each, assessing the appearance of first roots, shoot growth rate, plant height, number of shoots, initiation of new shoots, and resistance to bacterial infections. **Results.** The study showed that the physicochemical properties of gelling agents significantly influence plant growth and morphogenesis. The best results were observed on gellan-based media: first roots appeared earlier (*Arabidopsis thaliana* on 8–10 days; *Sorghum bicolor* on 11–12 days; *Lens culinaris* on 13–14 days), shoot growth rate was maximal (0.18–0.22 cm/day), plant height reached 6.3–12.0 cm, and the number of shoots was 4–7. Semi-hard media also ensured high growth rates and active morphogenetic processes, whereas liquid forms slightly reduced growth rate,

though phytosanitary stability remained high. Carrageenan showed intermediate results: it accelerated root formation compared with agar and increased resistance to bacterial infections, especially in semi-solid form. Agar provided baseline plant growth and development, but its liquid forms were characterised by slower growth and a high probability of bacterial contamination. It was found that gellan and semi-hard polysaccharide media are optimal for rapid root formation, high shoot growth, and effective protection against contamination. **Conclusions.** Gellan in solid and semi-solid form is the most effective gelling agent for in vitro cultivation of various plant species, ensuring intensive growth, high shoot productivity, and reliable protection against bacterial infections. Carrageenan can be used as an intermediate alternative, while agar remains a traditional but less effective medium for experiments. The obtained data have practical significance for optimising in vitro cultivation conditions and enhancing phytosanitary stability of cultures.

**Keywords:** *gel; roots; shoot; nutrient medium; rhizogenesis.*

*Надійшла / Received 28.08.2025*  
*Погоджено до друку / Accepted 23.10.2025*