

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка

Хіміко-біологічний факультет
Кафедра ботаніки та зоології

Кваліфікаційна робота

на тему:

**«ФІЗІОЛОГІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИВЧЕННЯ ВОДООБМІНУ
РОСЛИН У НАВЧАЛЬНОМУ ПРЕДМЕТІ «БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ»
(10 клас)»**

Спеціальність: 014.05 Середня освіта
**Предметна спеціальність: 014.05 Середня освіта (Біологія та здоров'я
людини)**

Здобувачки другого (магістерського)
рівня вищої освіти, ОПП «Середня освіта
(Біологія та здоров'я людини, хімія)
Герчак Оксани Володимирівни

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
доктор сільськогосподарських наук, професор
Пида Світлана Василівна

РЕЦЕНЗЕНТ:
методист відділення хімії та біології
Тернопільського обласного комунально-
територіального відділення МАН України
Дідушицька Богданна Станіславівна

Робота захищена з оцінкою:
Національна шкала _____
Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Тернопіль - 2025 р.

Анотація

Герчак О.В. Фізіологічний експеримент з вивчення водообміну рослин у навчальному предметі «Біологія і екологія» / Герчак Оксана Володимирівна; ТНПУ ім. Володимира Гнатюка, хіміко-біологічний факультет, кафедра ботаніки та зоології; наук. керівник Піда С. В. – Тернопіль, 2025. – 76 с.

У роботі представлено результати ефективності використання фізіологічного експерименту з вивчення водообміну рослин нуту звичайного за застосування мікробіологічного препарату Ризогумін та бактеріальної суспензії *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 у процесі навчання предмету «Біологія і екологія».

Застосування мікробних препаратів для передпосівної обробки насіння суттєво впливає на інтенсивність транспірації листків нуту звичайного сортів Буджак, Скарб, Пам'ять та Ярина та знижує їх водний дефіцит.

Результати анкетування підтвердили ефективність використання фізіологічного експерименту з дослідження водообміну рослин під час проведення Тижня біології в школі.

Ключові слова: фізіологічний експеримент, водообмін рослин, нут звичайний, мікробні препарати, навчання, біологія.

Abstract

Herchak O.V. Physiological Experiment on Studying Water Exchange in Plants within the Academic Subject «Biology and Ecology» 10 class / Herchak Oksana Volodymyrivna; Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Faculty of Chemistry and Biology, Department of Botany and Zoology; supervisor of scientific work Pyda S. V. – Ternopil, 2025. – 76 p.

The paper presents the results on the effectiveness of using a physiological experiment to study the water exchange of common chickpea plants when applying the microbiological preparation Rizogumin and the bacterial suspension

Mesorhizobium ciceri strain ND-64 in the process of teaching the subject “Biology and Ecology.”

The use of microbial preparations for pre-sowing seed treatment significantly affects the intensity of leaf transpiration in common chickpea varieties Budzhak, Skarb, Pamyat, and Yaryna, and reduces their water deficit.

The results of the survey confirmed the effectiveness of using a physiological experiment to study plant water exchange during the Biology Week held at school.

Keywords: physiological experiment, water exchange in plants, common chickpea, microbial preparations, education, biology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВОДООБМІНУ РОСЛИН НУТУ ЗВИЧАЙНОГО.....	11
1.1. Стан проблеми водообміну рослин у біологічних дослідженнях.....	11
1.2. Матеріали дослідження.....	21
1.3. Методи дослідження.....	23
1.3.1. Схема польового дослідження.....	23
1.3.2. Методика визначення інтенсивності транспірації.....	24
1.3.3. Методика визначення водного дефіциту.....	25
1.4. Вплив мікробних препаратів на інтенсивність транспірації листків нуту звичайного.....	26
1.5. Водний дефіцит листків нуту звичайного за впливу мікробних препаратів.....	30
РОЗДІЛ 2. ВІДОБРАЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВОДООБМІНУ РОСЛИН У ПРАКТИЦІ НАВЧАННЯ БІОЛОГІЇ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ.....	35
2.1. Розробка проблеми водообміну рослин у теорії навчання.....	35
2.2. Реалізація проблеми водообміну рослин у практиці роботи закладів загальної середньої освіти.....	47
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58
ДОДАТКИ.....	64

ВСТУП

Актуальність теми. Освіта постійно розвивається, адаптуючись до сучасних викликів і потреб суспільства, що зумовлює появу нових завдань і підходів до навчання [4]. В умовах стрімкого науково-технічного прогресу навчальний процес має постійно оновлюватися, використовуючи інноваційні методи та цифрові технології для підвищення якості освіти. Сучасна школа стає простором для творчості та самовираження, де інтеграція міждисциплінарних підходів дозволяє розкрити індивідуальний потенціал кожного учня [14; 20]. Таке навчальне середовище покращує формування гнучкого мислення, здатного адаптуватися до змін та містить нестандартні рішення в динамічних умовах сучасного світу [4].

Практичний і дослідницький компонент є важливою складовою навчання біології. Проте, не завжди календарно-тематичне планування дозволяє реалізувати всі можливості для експериментальної діяльності учнів. Біологія як наука про живі організми має величезний потенціал для розвитку дослідницької компетентності учнів, адже навчальний процес включає лабораторні роботи, експериментальні дослідження та роботу з науковими джерелами [4]. Зокрема, експерименти здатні формувати більшу зацікавленість серед учнів біологією та сприяти кращому засвоєнню інформації. Важливою темою предмету «Біологія та екологія» є водний обмін рослин. Забезпечення рослин водою є однією з фундаментальних складових їхнього існування, що сприяє не лише підтриманню клітинного тургору, а й реалізації таких ключових процесів, як фотосинтез, транспортування мінеральних речовин, метаболічна активність і терморегуляція. У біологічній та екологічній науці водообмін розглядають як складну систему взаємопов'язаних процесів надходження, транспортування, використання й втрат води, що відбуваються на клітинному, органному, організмовому й екосистемному рівнях [21; 22]. Саме під час проведення Тижня біології у школі можна організувати навчальний експеримент, який дозволить учням безпосередньо спостерігати, як відбувається водообмін у рослин і які чинники впливають на цей фізіологічний процес.

Однією із перспективних зернобобових культур в умовах Західного Лісостепу в найближчі роки може стати нут звичайний, який за агробіологічною та господарською характеристиками, в змінених агрокліматичних умовах може забезпечити стале виробництво харчового і кормового білка [1]. Більшість посівних площ (2/3) нуту зосереджені у центральній Україні [2]. В Україні зростає попит і розширюються площі під нутом. Останніми роками посіви нуту стали стрімко поширюватися спочатку на Півдні, а потім в Лісостеповому регіоні. У 2016 році найбільші посівні площі були в Донецькій (29,6 %), Одеській (28,2 %) та Харківській (19,7 %) областях. В Україні його виробничі посіви зростають з кожним роком і вже у 2005 році становили 33 тисячі гектарів. За останні 10 років площа посівів нуту збільшилася більше, ніж у 10 разів і становить приблизно 60–70 тис га [5]. Крім того, розширення посівних площ нуту дозволяє формувати науково обґрунтовані сівозміни, що дає можливість суттєво підвищити продуктивність озимих культур. Важливим також є те, що попит (а отже, і ціна) на нут вищий, порівнюючи з соєю чи горохом. У 2014–2015 рр. експорт зерна нуту досяг 20 тис тон. Нут (*Cicer arietinum* L.) є цінною продовольчою і кормовою рослиною. Насіння його містить до 34 % білків, які за якістю наближаються до яєчного. За вмістом білків серед зернобобових культур, нут посідає четверте місце після сої, квасолі та гороху. Крім того зерно містить вуглеводів – 50–60 %, мінеральних речовин – 2–5 %. високий вміст жиру (4–7 %), що значно поліпшує його харчові якості. Біологічна цінність білків досягає 52–78 %, коефіцієнт перетравності 80–83 % [12]. Одним із основних шляхів підвищення урожайності нуту є впровадження нових адаптованих до ґрунтово-кліматичної зони сортів та інтенсифікація технології вирощування. Тому важливо визначити параметри водообміну нових сортів цієї культури та дослідити доцільність застосування елементів біологізації технології вирощування.

Для оптимізації формування і функціонування бобово-ризобіальних симбіотичних систем, забезпечення живлення рослин молекулярним азотом повітря, отримання високих і якісних урожаїв бобових рослин необхідна

нітрагінізація – передпосівна обробка насіння біопрепаратами на основі ефективних штамів бульбочкових бактерій [23; 24].

Обробка насіння нуту звичайного біопрепаратами позитивно позначається на загальному стані рослин: вони мають кращі біометричні показники, підвищену активність азотфіксації, фотосинтезу, вищу стійкість до фітопатогенів, що в цілому сприяє формуванню більшого врожаю. Біологічні препарати азотфіксуювальних мікроорганізмів не лише підвищують урожайність рослин, а й збільшують у продукції вміст повноцінних білків. Симбіоз бобових рослин з бульбочковими бактеріями може забезпечувати досить високий рівень фіксації атмосферного нітрогену за вегетаційний період [27].

Використання у посівах бобових культур біопрепаратів сприяє кращому засвоєнню атмосферного азоту бульбочковими бактеріями. Саме це зумовлює підвищення адаптації рослин до певних умов вирощування, врожайності, покращення якості продукції та зниження впливу стресових факторів на рослину [26]. Проте в посівах нуту дія мікробних препаратів в умовах Західного Лісостепу України не вивчалася. У зв'язку з цим, актуальним є вирішення завдання дослідження ефективності застосування мікробних препаратів на основі бульбочкових бактерій та у комплексі з біологічно активними речовинами у посівах нуту, що дозволить рекомендувати виробництву препарат з мінімальним хімічним навантаженням на агробіоценози, за якого технологія вирощування культури забезпечуватиме одержання врожаїв високої якості.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи було дослідити ефективність використання фізіологічного експерименту з вивчення водообміну рослин нуту звичайного за застосування мікробіологічного препарату Ризогумін та бактеріальної суспензії *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 у процесі навчання предмету «Біологія та екологія».

Для досягнення поставленої мети передбачалося вирішити **наступні завдання:**

- проаналізувати сучасний стан проблеми водообміну рослин у біологічних дослідженнях;
- дослідити інтенсивність транспірації листків нуту звичайного сортів Пам'ять, Буджак, Скарб, Ярина залежно від використання у технології вирощування культури мікробіологічних препаратів;
- оцінити вплив біопрепаратів Ризогуміну і бактеріальної суспензії *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 на водний дефіцит листків нуту звичайного;
- вивчити стан реалізації проблеми водообміну рослин у практиці навчання біології у закладах загальної середньої освіти;
- розробити план експериментів по водообміну рослин та оцінити їх доцільність під час проведення Тижня біології в школі;

Об'єкт дослідження – фізіологічний експеримент з дослідження водного режиму рослин у процесі вивчення біології і екології у закладах загальної середньої освіти.

Предмет дослідження – методика організації та проведення фізіологічного експерименту з вивчення водообміну рослин у курсі навчального предмету «Біологія і екологія».

Методи дослідження: Для досягнення мети використано теоретичні (узагальнення, аналіз, синтез, абстрагування) та емпіричні (анкетування, порівняння, експеримент) методи. Дослідження проводили в Нижчелуб'янківському ліцеї (констатувальний експеримент), польових умовах – для встановлення інтенсивності транспірації, водного дефіциту за дії мікробіологічних препаратів; математично-статистичний – оцінка достовірності результатів за коефіцієнтом Стьюдента.

Базою дослідно-експериментальної роботи були Нижчелуб'янківський ліцей, лабораторія фізіології рослин і мікробіології кафедри ботаніки та зоології (лабораторні дослідження) та агробіологія (польові дослідження) Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали дослідження можуть бути використанні в освітньому процесі в закладах загальної

середньої освіти на уроках біології при вивченні водообміну листків рослин, а також під час проведення Тижня біології в школі. У магістерському дослідженні науково обґрунтована методика проведення фізіологічного експерименту у навчальному предметі «Біологія і екологія» при вивченні водообміну листків нуту звичайного сортів Пам'ять, Буджак, Скарб, Ярина за застосування мікробіологічного препарату Ризогумін і бактеріальної суспензії *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64.

За результатами польових і лабораторних досліджень встановлено ефективність інокуляції Ризогуміном і бактеріальною суспензією *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 нуту звичайного сортів Пам'ять, Буджак, Ярина, Скарб за показниками водообміну рослин. Результати дослідження мають практичне значення, оскільки запропоновані елементи технології підвищують інтенсивність фізіологічних процесів рослин нуту звичайного. Опрацьована наукова література поглиблює знання про ефективність застосування екологічно безпечних мікробіологічних препаратів на основі симбіотичних азотфіксуючих бактерій для інокуляції насіння бобових рослин, значення нуту звичайного в сільському господарстві, медицині та харчовій промисловості.

Апробація роботи. Результати досліджень, що проведено в школі під час педагогічної практики, польових і лабораторних умовах обговорено на засіданнях проблемної групи «Азотфіксація в агрофітоценозах» кафедри ботаніки та зоології (2024-2025 рр.), Всеукраїнських науково-практичних конференцій «Litteris et Artibus: Нові Горизонти», Кременець, 2025, 2024 рр., VII Міжнародній науково-практичній конференції «Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук у контексті вимог Нової української школи», Тернопіль, 2025 р., III Всеукраїнській конференції «Шлях в науку: перші кроки», Тернопіль, 2025 р.

Публікації. За результатами досліджень, що представлені у магістерській роботі опубліковано 4 праці:

1. Герчак О., Пида С. Фізіологічні особливості водообміну рослин: результати навчального експерименту під час проведення тижня біології в

школі / *Litteris et Artibus: Нові горизонти* : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. Випуск Х. Частина 2. Кременець : ВЦ КОГПА ім. Тараса Шевченка, 2025. С. 136-140.

2. Манчевська О., Пида С. В. Формування дослідницької компетенції на уроках біології в 7–9 класах під час вивчення водоутримуючої здатності листків // *Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук у контексті вимог Нової української школи*: Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (22-23 травня 2025 р. м. Тернопіль). Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2025. С. 57-60.
<http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/37001>

3. Манчевська Оксана, Пида Світлана Формування дослідницької компетенції на уроках біології під час вивчення водоутримуючої здатності листків / *Шлях в науку: перші кроки*: Матеріали III Всеукраїнської конференції. (9 квітня 2025 р) м. Тернопіль) Тернопіль: ФОП Осадца Ю. В., 2025. С. 116-119.

4. Шуль О., Куриляк М., Манчевська О., Пида С. Водоутримуюча здатність листків нуту звичайного за впливу рекультиванту композиційного TREVITAN® // *Litteris et Artibus: Нові горизонти* : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. Кременець : ВЦ КОГПА ім. Тараса Шевченка, 2024. Вип. IX. С. 297-300.

Структура та об'єм роботи. Магістерська робота складається із вступу, огляду літератури, опису матеріалів, методики проведення польових дослідів та методів дослідження, експериментальної частини, висновків та списку використаної літератури. Матеріал роботи викладений на 65 сторінках, текст ілюстрований 11 таблицями та 3 рисунками. Список цитованої літератури містить 47 джерел.

РОЗДІЛ 1

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВОДООБМІНУ РОСЛИН НУТУ ЗВИЧАЙНОГО

1.1. Аналіз сучасного стану проблеми водообміну рослин у біологічних дослідженнях

Водообмін рослин – це сукупність фізіолого-біохімічних процесів, які забезпечують баланс між надходженням води через кореневу систему, її переміщенням у провідних тканинах, участю у внутрішньоклітинних реакціях і подальшими втратами через транспірацію чи ексудацію.

Поглинання води рослинами відбувається переважно через кореневі волоски, що створюють велику поверхню контакту з частками ґрунту. Класичні роботи з фізіології рослин доводять, що головною рушійною силою цього процесу є різниця водного потенціалу між клітинами кореня та ґрунтовим розчином [45]. Коренева система не лише пасивно всмоктує воду, а й активно регулює цей процес через зміни осмотичного потенціалу клітин, накопичення іонів і синтез осмопротекторів. У такий спосіб рослина може підтримувати позитивний водний градієнт навіть за умов зниження вологості ґрунту.

Після надходження до кореня вода рухається вгору по ксилемі – системі судин, що забезпечують транспортування води та розчинених у ній мінеральних речовин до листків і верхніх частин рослини. Цей рух має як пасивний, так і активний характер, але домінує капілярно-транспіраційний механізм, описаний у класичній теорії когезії-адгезії водної колонки. Вода в ксилемі утримується силами когезії між її молекулами та адгезії до стінок судин, що дозволяє створювати безперервну водну колону. Транспірація через продихи листків зумовлює негативний тиск у верхній частині системи, який «підтягує» воду знизу вгору. Цей механізм є надзвичайно ефективним, хоча й уразливим до явищ кавітації – утворення повітряних корків у судинах, що можуть перервати потік води [39]. Дослідження показують, що рослини

розробили низку стратегій для подолання кавітацій, зокрема повторне заповнення судин водою або створення обхідних шляхів транспорту [35].

Особливу роль у регуляції водного балансу виконують продихи – мікроскопічні отвори на поверхні листка, що контролюють інтенсивність транспірації та газообміну. Продихи відкриваються і закриваються внаслідок зміни тургору клітин-замикачів, які реагують на освітлення, температуру, концентрацію CO_2 , а також внутрішні фітогормональні сигнали, такі як абсцизова кислота [41]. Lawson і Blatt [41] показали, що розмір і швидкість реакції продихів мають безпосередній вплив на фотосинтетичну продуктивність і водоекономічну ефективність рослин. Зокрема, дрібні й швидкореагуючі продихи сприяють оптимізації обміну газів при мінімальних втратах води, що є адаптивною перевагою в умовах посушливого клімату.

Внутрішньоклітинні процеси водообміну пов'язані з осмотичним тиском і водним потенціалом клітинних компартментів. Клітинна стінка й вакуоля виконують роль своєрідних буферів, що запобігають надмірним коливанням тургору. Осмотичний тиск регулюється концентрацією розчинених речовин, в основному іонів калію, натрію, цукрів і органічних кислот. Завдяки цьому клітини зберігають здатність до набухання навіть у несприятливих умовах. Саме ці властивості визначають різний ступінь водоутримуючої здатності видів, що пояснює їхню екологічну пластичність [32].

Важливо зазначити, що водообмін є не лише фізіологічним, а й екологічним явищем. На рівні екосистем він визначає стійкість фітоценозів, колообіг води, мікроклімат і навіть формування ландшафтів. Наприклад, у степових екосистемах з низькою водоемністю ґрунтів рослини формують глибокі кореневі системи та зменшують площу листової поверхні, тоді як у болотах домінують види з розвиненою аеренхімою, що сприяє газообміну в умовах надлишку вологи [46]. Таким чином, водообмін відображає не лише анатомо-фізіологічні, а й еволюційно-екологічні адаптації рослин.

Серед головних факторів, що впливають на водообмін, традиційно виокремлюють кліматичні, ґрунтові, біологічні та антропогенні. Кліматичні параметри – температура, вологість повітря, сонячна радіація й швидкість вітру – визначають інтенсивність транспірації та випаровування. За підвищення температури зростає кінетична енергія молекул води, що прискорює випаровування, але водночас може призводити до закриття продихів, аби зменшити втрати [37]. Вологість повітря є одним із найважливіших регуляторів, оскільки різниця парціального тиску водяної пари між внутрішнім повітрям листка і зовнішнім середовищем визначає швидкість транспірації. Вітрові потоки підсилюють цей процес, усуваючи насичене водяною парою повітря біля поверхні листка.

Ґрунтові умови не менш значущі. Водоемність, механічний склад, солоність і глибина залягання ґрунтових вод визначають доступність вологи для коренів. Надмірна солоність знижує водний потенціал ґрунтового розчину, ускладнюючи всмоктування, тоді як у глинистих ґрунтах надлишкова волога може спричинити анаеробні умови. У таких випадках рослини формують адаптивні структури – аеренхіму або адвентивні корені. Дослідження Christova та Pyurko [31] показують, що навіть у межах одного виду водний режим суттєво варіює залежно від фізико-хімічних характеристик субстрату.

Біологічні фактори включають видові особливості, морфологію, анатомічну будову, фазу розвитку та фізіологічний стан. Наприклад, рослини з товстими кутикулами та дрібними продихами, такі як сукуленти, здатні утримувати воду тривалий час, тоді як трав'янисті мезофіти швидко реагують на дефіцит вологи через втрату тургору. Фаза росту також має значення: молоді вегетативні органи споживають більше води, порівнюючи з старіючими. У процесі старіння клітин зменшується активність мембранних переносників і водопровідність тканин, що призводить до зниження швидкості водообміну.

Антропогенні фактори – забруднення атмосфери, зміни гідрологічного режиму, дефляція ґрунтів, урбанізація – істотно впливають на водний баланс рослин. Під впливом промислових викидів змінюється структура продихів, накопичуються токсичні іони, що порушує осмотичну рівновагу. Бессонова, Сидоренко та Шульга [36] у своїх дослідженнях показали, що листки дуба звичайного в умовах ерозійних схилів мають знижену інтенсивність транспірації та підвищений вміст осмолітів – це вказує на компенсаторну адаптацію до водного стресу.

Встановлено (табл. 1.1), що водообмін – це система, де кожен елемент перебуває в тісному зв'язку з іншими, утворюючи динамічну рівновагу. Порушення будь-якого з компонентів може мати каскадні наслідки для фізіології всієї рослини. Наприклад, зменшення надходження води одразу впливає на транспірацію, що, своєю чергою, знижує фотосинтетичну активність і продуктивність [44].

Теоретичні основи водообміну спираються на концепцію водного потенціалу, який описує енергетичний стан води в системі та визначається сумою його складових – осмотичного, тискового, матричного і гравітаційного потенціалів [35]. Саме різниця водного потенціалу між різними частинами рослини забезпечує спрямований рух води. Іншими словами, вода переміщується з ділянок із вищим потенціалом до ділянок із нижчим, аж до рівня транспіраційних втрат. Це дозволяє пояснити не лише вертикальний рух води, а й міжклітинний транспорт через плазмодесми або апопласт.

Philip [45] ще у 1966 році встановив, що розуміння водного потенціалу має не лише фізичне, а й біологічне значення, адже він інтегрує вплив усіх чинників середовища. Сучасні моделі, зокрема розробки Anderegg та співавт. [35], показують, що саме цей параметр є ключовим для прогнозування реакцій рослин на кліматичні зміни. Моделювання водного потенціалу дозволяє визначити порогові значення, при яких відбувається кавітація судин або зниження фотосинтезу, що має практичне значення для агроєкології.

Основні компоненти процесу водообміну [6]

Компонент процесу	Фізіологічний механізм	Основні фактори впливу	Екологічне значення
Надходження води	Осмотичне всмоктування коренями; активний транспорт іонів	Вологість і солоність ґрунту, температура, активність коренів	Забезпечує водний потенціал рослини
Переміщення по ксилемі	Когезійно-транспіраційний потік, капілярність, адгезія	Температура, вітровий режим, опір судин	Підтримує постачання води до фотосинтезуючих органів
Втрати води	Транспірація через продихи, випаровування, ексудація	Радіація, вологість повітря, гормональна регуляція	Регулює охолодження, газообмін і баланс води
Осмотична регуляція	Накопичення осмопротекторів, зміна концентрації солей	Посуха, забруднення, фаза росту	Забезпечує тургор і стійкість до стресу

Окрему увагу варто приділити зв'язку між водообміном і фотосинтезом. Вода не лише є реагентом у фотосинтетичних реакціях, але й впливає на ефективність процесу через регуляцію відкриття продихів. Зниження тургору замикаючих клітин призводить до часткового закриття продихів, що обмежує надходження CO_2 . Таким чином, між інтенсивністю фотосинтезу та транспірації існує компроміс: чим більше CO_2 поглинає рослина, тим більше води вона втрачає [41]. Це співвідношення лежить в

основі поняття водокористувальної ефективності (WUE - water-use efficiency), яке нині активно досліджується у контексті кліматичних змін.

Узагальнюючи викладене, можна виокремити кілька основних теоретичних принципів водообміну рослин:

1. Водообмін – енергетично керований процес, що підпорядковується законам термодинаміки та осмосу.
2. Ключову роль виконує різниця водного потенціалу, яка забезпечує напрям руху води від коренів до листків.
3. Когезія-адгезія та транспіраційний потік створюють єдину безперервну систему руху води в судинах.
4. Регуляція продихів і осмотичний контроль – основні механізми збереження водного балансу.
5. Водообмін пов'язаний з усіма аспектами метаболізму, зокрема фотосинтезом, транспортуванням мінералів і стресостійкістю.

Сучасна біологічна наука приділяє значну увагу вивченню водообміну рослин, оскільки саме цей процес визначає межі їхньої фізіологічної стійкості, екологічну амплітуду та роль у функціонуванні екосистем. Розвиток методів дослідження останніх десятиліть дозволив перейти від описових спостережень до кількісного аналізу водного режиму, що включає моделювання потоків води на рівні клітин, органів і навіть цілих біогеоценозів. Застосування ізотопних технологій, мікросенсорів, термографії та біоінформатичних моделей дало змогу суттєво поглибити розуміння динаміки води у рослинних системах [39].

Серед новітніх підходів особливо варто відзначити використання стабільних ізотопів водню (^2H) і кисню (^{18}O), які дозволяють простежити шляхи руху води від ґрунту через рослину до атмосфери. Такий метод має перевагу в тому, що він дозволяє диференціювати джерела вологи (дощова, ґрунтова, ґрунтова-капілярна) та з'ясувати, яку саме частину води рослина реально використовує в різних фазах розвитку і [37]. Brendel [37] наголошує, що ізотопний аналіз відкрив нову сторінку у вивченні зв'язку між ростом

рослин і споживанням води, оскільки дає змогу кількісно оцінити ефективність використання води (WUE) у динаміці сезонних змін. Власне, це стало основою для створення моделей прогнозування водного стресу, що особливо важливо для сільськогосподарських культур у посушливих регіонах.

Іншим напрямом є моделювання водного потенціалу й транспіраційних потоків. Moderne підходи спираються на рівняння Дарсі та теорію гідравлічного опору, що дозволяють оцінювати водопровідність ксилеми. Згідно з дослідженнями Anderegg та співавт. [35], водний потенціал – це інтегральна характеристика, яка об'єднує осмотичні, тискові та матричні компоненти, тому його вимірювання дає змогу передбачати реакції рослин на дефіцит води, температурні стреси й зміну атмосферного тиску. У сучасних моделях, що застосовуються в In Silico Plants, водний потенціал використовується як ключовий параметр у симуляціях адаптаційних відповідей різних видів, що відкриває можливості для прогнозування стійкості біогеоценозів до кліматичних змін.

Особливе місце у сучасних дослідженнях посідає феномен кавітації – утворення повітряних пробок у судинах ксилеми, що порушують безперервність водного потоку. За умов посухи або сильного випаровування негативний тиск у судинах може досягати критичних значень, унаслідок чого вода «розривається», утворюючи газові включення. Такі кавітації можуть бути фатальними, якщо не відновлюється зв'язок між клітинами. Однак багато видів рослин виробили ефективні механізми репарації – активне заповнення судин водою або створення нових провідних шляхів [39]. Наприклад, дерева родів *Populus* і *Quercus* здатні за одну ніч відновлювати до 80 % провідності ксилеми, що свідчить про високий потенціал адаптаційного відновлення.

Значного розвитку набули мікроскопічні методи візуалізації водних потоків. Використання флуоресцентних барвників, рентгенівської томографії та магнітно-резонансної візуалізації дозволяє безпосередньо спостерігати динаміку переміщення води у живих рослинах. Це відкриває нові можливості

для розуміння взаємодії між структурними й функціональними особливостями тканин. Такі дослідження мають не лише теоретичне, а й практичне значення для селекції рослин із підвищеною водоекономічністю. Зокрема, виявлено, що товщина стінок ксилемних судин і ступінь їх лігніфікації прямо корелюють із стійкістю до кавітацій і збереженням транспіраційного потоку в умовах дефіциту води [35].

У світлі кліматичних змін, коли збільшуються амплітуди температур і частота посушливих періодів, дослідження водного обміну набуває екологічної актуальності. У межах екосистем водообмін рослин не можна розглядати ізольовано – він є складовою частиною глобального водного циклу, де рослинність виконує роль активного регулятора потоків води між ґрунтом і атмосферою. На рівні біосфери рослини щорічно транспірують близько 70-80 тис. км³ води, що дорівнює майже половині всього випаровування з поверхні суші [46]. Ця колосальна кількість вологи, що проходить через рослинні тканини, має вирішальне значення для стабільності клімату та підтримання кругообігу речовин.

Водночас у межах окремих екосистем існує значна варіабельність водного режиму. В аридних зонах рослини пристосовані до мінімізації втрат води: вони мають редуковану листову поверхню, товсту кутикулу, САМ-фотосинтез і здатність до тимчасового анабіозу. Сукуленти (наприклад, кактуси, алое, еуфорбії) накопичують воду у спеціалізованих паренхімних клітинах, де вона зберігається у вигляді колоїдних розчинів. Їхні продихи відкриваються вночі, коли випаровування мінімальне. На противагу цьому, у вологих тропічних лісах водообмін відбувається інтенсивно: листки мають численні продихи, транспірація триває майже безперервно, а волога постійно поповнюється завдяки рясним опадам і високій вологості повітря.

Екосистеми помірного поясу характеризуються сезонною динамікою водообміну. Навесні, під час активного росту, транспірація значно перевищує випаровування з поверхні ґрунту, тоді як улітку за посухи вона знижується через закриття продихів і перехід рослин у стан водного стресу. Для

болотистих та прибережних екосистем виявлено іншу закономірність: тут головною проблемою є надлишок вологи, що зумовлює дефіцит кисню у кореневій зоні. Тому гідрофіти, такі як очерет, рогіз або латаття, формують аеренхіму – спеціалізовану тканину з повітряними порожнинами, яка забезпечує постачання кисню до коренів. Ці структурні адаптації свідчать про глибоку еволюційну диференціацію водного режиму у відповідь на умови середовища [36; 46].

Науковий інтерес нині також зосереджений на мікробіоті кореня й її впливі на водопоглинання. Встановлено, що симбіотичні мікроорганізми (мікоризні гриби, ризобактерії) можуть істотно покращувати водний статус рослин, особливо за умов водного дефіциту. Вони підвищують поглинальну поверхню кореня, стимулюють синтез осмопротекторів і фітогормонів, що сприяє збереженню тургору [39]. Це відкриває нові перспективи у застосуванні біотехнологічних методів для підвищення посухостійкості культур.

Окрему групу досліджень становить аналіз впливу антропогенних чинників на водообмін. Урбанізація, індустріальне забруднення та зміни гідрологічного режиму порушують природний водний баланс рослинності. Металеві аерополітанти, такі як кадмій, свинець і цинк, здатні змінювати проникність клітинних мембран і порушувати водопровідність тканин. Бессонова та співавт. [36] показали, що під дією антропогенних навантажень у дуба звичайного зменшується площа продихів, збільшується товщина кутикули й знижується інтенсивність транспірації. Такі морфологічні зміни мають адаптивний характер, але водночас зменшують фотосинтетичну ефективність і зростання дерев.

З екологічного погляду, важливим є вивчення ролі рослин у регуляції водного балансу територій. Лісові насадження, наприклад, затримують до 30-40 % опадів у кронах, що зменшує поверхневий стік і ерозію ґрунтів. Крім того, завдяки транспірації ліси впливають на локальну вологість повітря і температуру, створюючи своєрідний мікроклімат. У степових регіонах,

навпаки, рослинність зменшує випаровування з поверхні ґрунту, зберігаючи вологу у верхніх горизонтах. Таким чином, водообмін окремих видів має масштабний вплив на формування водного режиму цілих екосистем [46].

Паралельно з цим формується напрям екологічного моделювання, що поєднує гідрологічні, кліматичні й біологічні параметри. Моделі типу «Soil-Plant-Atmosphere Continuum» (SPAC) дозволяють кількісно оцінювати потоки води від ґрунту до атмосфери через рослинний покрив. У таких моделях враховується не лише фізіологія рослини, а й стан ґрунту, водоутримувальна здатність, температура, вологість, швидкість вітру тощо. Застосування SPAC-моделей у глобальних кліматичних симуляціях дозволяє оцінити, як зміни рослинного покриву можуть вплинути на баланс опадів і випаровування, тобто фактично – на кліматичну стабільність планети.

Проте, незважаючи на значний прогрес, низка питань водообміну залишається недостатньо вивченою. По-перше, бракує довгострокових спостережень, які б дозволяли простежити зміни водного режиму в контексті багаторічних кліматичних коливань. Більшість експериментів проводяться у короткостроковій перспективі, що не дає змоги зробити висновки про еволюційно стабільні механізми адаптації. По-друге, малодослідженою залишається роль мікробіоти та фітогормональної регуляції у стресових умовах. Хоча доведено, що абсцизова кислота виконує ключову роль у закритті продихів, механізми її взаємодії з іншими гормонами (цитокінінами, етиленом) у контексті водного дефіциту потребують глибшого аналізу [32].

По-третє, майже не вивчено водообмін у рідкісних і ендемічних видах, особливо тих, що зростають у крайніх умовах – наприклад, у солончаках, на скелястих схилах або в субальпійських зонах. Ці види можуть володіти унікальними фізіологічними механізмами регуляції води, які поки що не мають аналогів серед модельних об'єктів. Виявлення таких адаптацій має не лише теоретичну, а й практичну цінність для селекції культур, стійких до кліматичних змін.

Нарешті, актуальним напрямом є дослідження впливу підвищеного рівня CO₂ на водокористування рослин. Підвищення концентрації цього газу в атмосфері, як відомо, стимулює фотосинтез і водночас знижує відкритість продихів, що може підвищити ефективність використання води. Проте довгострокові наслідки такого ефекту залишаються дискусійними, оскільки зміни у структурі продихів і провідних тканин можуть впливати на інші аспекти метаболізму. В експериментах з пшеницею, кукурудзою та соєю було встановлено, що за умов підвищеного CO₂ транспірація зменшується на 10-25 %, але вплив на врожайність не завжди позитивний [35,39]. Це свідчить про складний баланс між енергетичними процесами й водними аспектами функціонування рослин.

Сучасні дослідження дедалі більше орієнтуються на інтеграцію біологічних і екологічних даних. Наприклад, об'єднання дистанційного зондування (супутникових даних) і фізіологічних вимірів дозволяє відстежувати просторову динаміку транспірації на рівні ландшафтів. Такі підходи використовуються у проєктах моніторингу деградації земель, лісових пожеж і посух. Вимірювання індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) у поєднанні з даними про температуру листкової поверхні дозволяє непрямо оцінювати інтенсивність водообміну та виявляти зони стресу. Таким чином, водообмін стає не лише об'єктом лабораторних експериментів, а й важливою змінною у глобальних системах екологічного моніторингу.

Отже, на основі огляду наукових джерел літератури виявлено, що сучасна біологічна наука показує багатовимірність проблеми водного обміну рослин: результати досліджень свідчать про поєднання фізіологічного, анатомічного, молекулярного і екологічного рівнів організації живої матерії. Наукові відкриття останніх років не лише розширюють теоретичну базу, а й мають прикладне значення – від оптимізації агротехнологій до прогнозування змін екосистем у майбутньому кліматі.

1.2. Матеріали дослідження

Для проведення дослідження ми використали чотири сорти нуту звичайного: Ярина, Буджак, Пам'ять та Скарб. Дослідження показників водообміну культури проводили у умовах польового дослід. Сорти відрізняються між собою за морфологічними ознаками та біологічними показниками.

Сорт Ярина є першим в Україні проміжним сортом із крупним насінням, який вирізняється високим ростом та підвищеною стійкістю до хвороб. За результатами багаторічних випробувань урожайність цього сорту становила в середньому 2,7 т/га в умовах Степу та 3,2 т/га в Лісостепу, при потенційній продуктивності понад 5 т/га. Насіння велике: маса 1000 насінин сягає 390–410 г. Сорт середньоранній, тривалість вегетації – 82–85 діб. Сорт Ярина посідає одну з провідних позицій за стійкістю до фузаріозу та аскохітозу (8–9 балів) і має високу посухостійкість (9 балів). Рослини високорослі (55–65 см), з прикріпленням нижнього бобу на висоті 22–25 см. Кущ напівстиснутий, стійкий до вилягання. Насіння містить до 28 % білків та приблизно 11 % олії. Сорт характеризується такими морфологічними ознаками: темно-зеленими листками з легким антоціановим відтінком, великими світло-рожевими квітками та крупними овальними бобами солом'яно-жовтого забарвлення. Поверхня насінини зморшкувата, інколи схильна до розтріскування.

Сорт Скарб належить до крупнонасінних та характеризується стабільною врожайністю у межах 2,25 т/га. Маса 1000 насінин становить 420–430 г. Період вегетації триває 88–93 доби. Сорт має високу стійкість до фузаріозу й аскохітозу, а також добре переносить посушливі умови. Його кущ напівстиснутий, невибагливий до механічних впливів, не схильний до обламування бічних гілок. Вміст білків у насінні становить 30 %, а олії – приблизно 7 %. Рослини заввишки 55–65 см, боби овальної форми, великі, із солом'яно-жовтим забарвленням у період достигання. Насіння жовтувате, з характерною зморшкуватою поверхнею.

Сорт Пам'ять відзначається здатністю не утворювати повторних приростів у період надмірної вологості, що є важливою адаптаційною ознакою для умов Степу. Вегетаційний період триває 90–95 діб. Сорт малочутливий до фузаріозу та аскохітозу, має високий рівень посухостійкості й характеризується штабровою формою куща. Рослини досягають 55–60 см, нижній біб формується на висоті 20–22 см. Насіння містить до 30 % білків та 3–4 % олії. Вегетативні органи щільно опушені, забарвлення листків сизо-зелене. Квітки білі, боби ромбічні, жовто-солом'яного кольору, насіння округле (маса 1000 шт. – 280–300 г). Сорт використовується як цінний кормовий концентрат.

Сорт Буджак має вегетаційний період близько 90 діб і характеризується товарною врожайністю приблизно 1,8 т/га. Вміст сирого протеїну у зерні складає 27,4 %, а вирівняність зерна – до 95 %. Боби містять дві добре сформовані насінини, що зазвичай мають світло-бежеве забарвлення і крупний розмір (маса 100 насінин – дуже велика). Кущі сорту середньої висоти, добре гілкуються, а після цвітіння займають напівпрямостояче положення. Сорт вирізняється високою стійкістю до осипання, посухи, механізованого збирання та середньою стійкістю до корневих гнилей та аскохітозу.

1.3. Методи дослідження

1.3.1. Схема польового досліді

Польові досліді закладали на важко-суглинистому чорноземі типовому агробіологічної лабораторії Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка у трьох варіантах та чотирьох повтореннях: Контроль – насіння не оброблене, змочене водою з водогону з розрахунку 2 % від маси; *Mesorhizobium ciceri* ND-64 – насіння перед сівбою інокулювали селекціонованим штамом бульбочкових бактерій; Ризогумін – насіння перед сівбою оброблене комплексним мікробним препаратом згідно норм виробника. Мікробні препарати люб'язно надані Гончар Ю.О. (Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва, м.

Чернігів). У фазах вегетації, цвітіння, початок утворення бобів та зеленого бобу рослин нуту звичайного визначали інтенсивність транспірації листків за Л. А. Івановим, водний дефіцит і вміст сухих речовин та води [3]. Обробка статистичних даних здійснювалась за допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel.

1.3.2. Методика визначення інтенсивності транспірації [3]

Метод ґрунтується на швидкому зважуванні листків, що дозволяє простежити втрату маси внаслідок випаровування води. Такий підхід дає можливість оцінити перебіг транспіраційних процесів у листку в максимально наближеному до природного стану, коли він зберігає рівень насиченості водою, характерний для рослини. Оскільки тривала експозиція призводить до поступового висихання тканин і зниження інтенсивності транспірації, інтервал між зважуваннями не повинен перевищувати 5–6 хвилин.

Для визначення інтенсивності транспірації виконання дослідження проводимо у пакій послідовності:

1. Торсійні терези виставляють у горизонтальне положення та перевіряють нульову відмітку.
2. Листок зважують із точністю до 1 мг, фіксують масу, через 5 хвилин проводять повторне зважування. Різниця між показниками відображає кількість води, випаровуваної за цей період.
3. Після другого зважування визначають площу листка ваговим методом або за допомогою міліметрового паперу.
4. Інтенсивність транспірації розраховують за формулою:

$$I_T = \frac{n \cdot 60 \cdot 10000}{S \cdot t} \text{ г/м}^2 \cdot \text{Год}$$

де I_T – інтенсивність транспірації, г/м^2 за годину; n – кількість води, що випарувалась з поверхні листка за час дослід (5 хв.), г; s – площа листка, см^2 ; t – тривалість дослід, хв.; 60 – коефіцієнт перерахунку хвилин у години; 10 000 – коефіцієнт перерахунку, $\text{см}^2/\text{м}^2$.

Листки рослини накладають на проведений папір, обводять простим олівцем, вирізають по контуру і зважують на торсійних терезах. Одночасно вирізають з цього самого паперу квадрат площею 100 см² і також зважують. Знаходять площу листка за пропорцією:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{S}$$

де а – маса квадрату паперу в 100 см² , г; b – маса контуру листка паперу , г; c – площа квадрата, см²; S – площа листка, см².

1.3.3. Методика визначення водного дефіциту [3]

За нормальних умов, коли інтенсивність транспірації врівноважена надходженням води, рослина підтримує оптимальний водний баланс. Однак у сонячний день або за нестачі вологи в ґрунті ця рівновага може порушуватися, що призводить до формування водного дефіциту. Крім тимчасового денного дефіциту, який рослина здебільшого компенсує вночі, існує залишковий водний дефіцит, що виникає за тривалого порушення водопостачання.

Зниження тургору та загальна дегідратація тканин змінюють властивості клітинних біолоїдів, порушують структуру протоплазми, знижують активність ферментів і інтенсивність фотосинтезу, що згодом позначається на рості й продуктивності рослин. Водний дефіцит зазвичай виражають у відсотках від маси води, що міститься в повністю насичених листках. Цей показник є важливим для оцінки стану рослин і визначення оптимальних строків поливу. Для визначення водного дефіциту листків дослідження проводять у такій послідовності:

1. Зрізаний листок зважують, після чого занурюють його у воду на 1,5 години для повного насичення.
2. Після вилучення листок обережно осушують фільтрувальним папером і повторно зважують.
3. Водний дефіцит визначають за формулою:

$$ВД = \frac{(a-b) \cdot 100}{a}$$

де: a – маса листка після насичення його водою, г; b – початкова маса листка до насичення його водою г; 100 – коефіцієнт для перерахунку у відсотки ВД.

1.4. Вплив мікробних препаратів на інтенсивність транспірації листків нуту звичайного

Транспірація – це фізіологічний процес випаровування води з поверхні рослин, який може відбуватися через продихи, через кутикулу, або сочевички. Зазначений процес забезпечує рух води разом з поживними речовинами по рослині, сприяє транспорту мінеральних речовин, впливає на фотосинтез і суттєво запобігає перегріванню рослинних тканин. Для кількісної характеристики транспірації дослідники використовують такі показники: інтенсивність транспірації, тобто кількість води, яка випарувалася з одиниці площі поверхні рослини за одиницю часу; продуктивність транспірації – маса сухої речовини рослини, утвореної на 1 кг використаної води; транспіраційний коефіцієнт – кількість води, витраченої на формування одиниці сухої маси рослини; відносна транспірація – параметр, що відображає співвідношення між інтенсивністю випаровування води з листка та інтенсивністю випаровування води з вільної водної поверхні тієї ж площі [3].

Результати дослідження впливу передпосівної обробки насіння нуту звичайного сорту Скарб показали, що у фазі вегетації листки рослин за застосування Ризогуміну статистично вірогідно на 20,7 % більше випаровували води порівнюючи з спонтанно інокульованими рослинами контрольного варіанту (табл. 1.2). За впливу *M. ciceri* ND-64 виявлено тенденцію до інтенсивнішого випаровування води листками рослин порівнюючи з контролем. Варто зазначити, що інтенсивність транспірації залежить від ендогенних та екзогенних чинників. Серед факторів зовнішнього середовища на зазначений вище параметр впливає температура та вологість повітря, освітленість, сила вітру, вміст води у ґрунті та ін. [3]. Під час проведення дослідження температура повітря становила 24°C, його вологість – 60 %, а сила вітру – 6,7 км/год. За даними літератури середнє

значення інтенсивності транспірації у денний період у середньому становить від 15 до 250 г/м²*год.

У фазі зеленого бобу інтенсивність транспірації листків нуту звичайного сорту Скарб порівнюючи з фазою вегетації збільшилась у контрольному варіанті в 4,5, а дослідних – 4,0 рази. За впливу Ризогуміну виявлено тенденцію до збільшення інтенсивності випаровування води з поверхні листків, а *M. ciceri* ND-64 – зменшення, але статистично вірогідної різниці між показниками контрольного та дослідних варіантів не визначено. У фазі зеленого бобу температура повітря була на 3°C, вологість повітря – на 5 % нижчими, а сила вітру – навпаки на 5,3 км/год вищою порівнюючи з фазою вегетації.

Таблиця 1.2

Інтенсивність транспірації (г/м²*год) листків нуту звичайного сорту Скарб за впливу мікробних препаратів, $M \pm m$, $n=4$

Варіант	Фаза росту і розвитку	
	вегетації* ¹	зеленого бобу* ²
Контроль	51,3±3,19	233,8±11,32
<i>M. ciceri</i> ND-64	53,7±3,22	216,0±8,70
Ризогумін	61,9±4,57*	246,3±15,20

Примітка: * – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p < 0,05$;

*¹ – температура повітря – 24°C, вологість = 60%, сила вітру = 6,7 км/год

*² – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12 км/год

Сорт Ярина нуту звичайного відрізняється за морфологічними та біологічними особливостями від сорту Скарб [13]. Дослідження показали, що листки сорту Ярина у фазі вегетації інтенсивніше випаровували воду порівнюючи з сортом Скарб (табл. 1.3). За обробки насіння перед сівбою Ризогуміном інтенсивність транспірації листків сорту Ярина була на 17,7 % більшою порівнюючи з контролем. Інокуляція *M. ciceri* ND-64 дещо знижувала зазначений показник, але статистично вірогідної різниці порівнюючи з контролем не визначено. У фазі зеленого бобу листки рослин дослідних варіантів достовірно менше випаровували води на 31,5 % (*M. ciceri* ND-64) і 24,7 % (Ризогумін) порівнюючи з спонтанно інокульованими

рослинами місцевими штамми бульбочкових бактерій. Очевидно тканини рослин дослідних варіантів характеризувалися більшим умістом вільної води, що відповідно вплинуло на інтенсивність транспірації.

Таблиця 1.3

Інтенсивність транспірації (г/м²*год) листків нуту звичайного сорту Ярина за впливу мікробних препаратів, $M \pm m$, n=4

Варіант	Фаза росту і розвитку	
	вегетації* ¹	зеленого бобу* ²
Контроль	298,8±18,37	339,6±14,12
<i>M. ciceri</i> ND-64	272,8±9,05	258,2±12,22*
Ризогумін	351,6±17,09*	272,4±16,80*

Примітка:* – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p < 0,05$;

*¹ – температура повітря – 24°C, вологість = 60%, сила вітру= 6,7км/год

*² – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12км/год

Отже, передпосівна обробка насіння нуту звичайного сорту Ярина мікробними препаратами у фазі зеленого бобу статистично вірогідно знижувала показники інтенсивності транспірації листків. За впливу Ризогуміну визначенно суттєве збільшення інтенсивності випаровування води з поверхні листків за передпосівної інокуляції насіння нуту звичайного сортів Скарб та Ярина *M. ciceri* ND-64 під час вегетації рослин.

У результаті дослідження показників інтенсивності транспірації листків нуту звичайного сорту Буджак виявлено аналогічну закономірність стосовно інтенсивності випаровування води з поверхні листків як у сорту Ярина. Зокрема, у фазі вегетації рослин за обробки насіння перед сівбою Ризогуміном інтенсивність транспірації була достовірно більшою на 13,3 % порівнюючи з аналогічним показником контрольного варіанту (табл. 1.4). За інокуляції *M. ciceri* ND-64 показники інтенсивності транспірації статистично вірогідно не відрізнялися від параметрів спонтанно інокуюваних рослин. У фазі зеленого бобу визначено збільшення кількості випаровуваної води з одиниці поверхні листової пластинки за одиницю часу за впливу обох мікробних препаратів на 14,0 % (*M. ciceri* ND-64) та 29,6 % (Ризогумін).

Зазначена різниця у показниках контрольного і дослідних варіантів є статистично вірогідною.

Таблиця 1.4

Інтенсивність транспірації (г/м²*год) листків нуту звичайного сорту

Буджак за впливу мікробних препаратів, М ± m, n=4

Варіант	Фаза росту і розвитку	
	вегетації* ¹	зеленого бобу* ²
Контроль	68,8±4,73	216,6±13,90
<i>M. ciceri</i> ND-64	70,7±5,47	247,0±11,81*
Ризогумін	77,9±1,12*	280,7±12,46*

Примітка: * – різниця достовірна порівнюючи з контролем при p<0,05;

*¹ – температура повітря – 24°C, вологість = 60%, сила вітру= 6,7км/год

*² – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12км/год

Аналізуючи показники інтенсивності транспірації листків нуту звичайного сорту Пам'ять за впливу мікробних препаратів виявлено зниження параметрів упродовж досліджуваного періоду у фазах вегетації на 16,1 % (*M. ciceri* ND-64) і 30,5 % (Ризогумін) та зеленого бобу відповідно на 21, 0 % (*M. ciceri* ND-64) і 31,9 % (Ризогумін) (табл. 1.5). Сорт Пам'ять належить ся до південно-європейської екологічної групи, тип *kabuli*, різновид *bogemico-allutaceum*. Зазначений вище сорт з 2002 року занесений до Реєстру сортів рослин України і рекомендований для вирощування в зоні Степу [13].

Таблиця 1.5

Інтенсивність транспірації (г/м²*год) листків нуту звичайного сорту

Пам'ять за впливу мікробних препаратів, М ± m, n=4

Варіант	Фаза росту і розвитку	
	вегетації* ¹	зеленого бобу* ²
Контроль	184,4±5,95	285,7±6,30
<i>M. ciceri</i> ND-64	136,3±3,17*	225,7±7,30*
Ризогумін	128,2±4,02*	194,5±3,71*

Примітка: * – різниця достовірна порівнюючи з контролем при p<0,05;

*¹ – температура повітря – 24°C, вологість = 60%, сила вітру= 6,7км/год

*² – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12км/год

Отже, на інтенсивність транспірації листків нуту звичайного статистично вірогідно впливає передпосівна обробка насіння мікробними препаратами. Встановлено, що сорти нуту звичайного відрізняються за показниками інтенсивності транспірації. Під час вегетації рослин усіх варіантів за величиною інтенсивності випаровування води з одиниці площі за одиницю часу розміщуються у такому порядку: Ярина>Память>Скарб>Буджак. У фазі зеленого бобу в рослин нуту звичайного виявлено аналогічну закономірність стосовно розміщення сортів за параметрами інтенсивності транспірації. За інокуляції насіння *M. ciceri* ND-64 за зазначеними параметрами сорти розміщуються наступним чином: Ярина>Память >Буджак>Скарб, за обробки насіння Ризогуміном – відповідно: Буджак>Ярина > Скарб>Пам'ять. З поміж чотирьох досліджуваних сортів найвищою інтенсивністю транспірації характеризувалися листки сорту Ярина.

На інтенсивність випаровування води з поверхні листків впливають умови навколишнього середовища.

1.5. Водний дефіцит листків нуту звичайного за впливу мікробних препаратів

Водним дефіцитом рослини вважають ту недостачу води, яку вона навіть у нічний час не може відновити. Зазначений кількісний параметр рослин характеризує їх стійкість до посухи. Дефіцит води в листках рослини, що вирощується у польових умовах виникає за недостатньої її кількості в ґрунті. У результаті дефіциту води в ґрунті та повітрі спостерігається порушення метаболізму рослин. За недостатньої кількості вологи різко знижується інтенсивність фотосинтезу в зелених органах, відбувається гальмування процесів росту та знижується насіннева продуктивність [6].

За умов стресу рослина як саморегулюючий організм перерозподіляє фонди води, яка надходить в основному через кореневу систему. Насамперед забезпечується оводнення тканини, а решта використовується на процеси транспірації.

Встановлено, що обробка насіння перед сівбою мікробними препаратами знижувала параметри водного дефіциту листків нуту звичайного сортів Скарб, Пам'ять, Буджак та Ярина упродовж онтогенезу (табл. 1.6 – 1.9). У фазі вегетації листки рослин нуту звичайного сорту Скарб дослідних варіантів характеризувалися на 14,4 % (*M. ciceri* ND-64) та 15,5 % (Ризогумін) нижчими показниками водного дефіциту (табл. 1.6). У зазначений період дослідження параметри водного дефіциту листків були в 2,1 (цвітіння, початок утворення бобів) та 2,8 (зеленого бобу) (Контроль), відповідно 2,0 та 2,1 (*M. ciceri* ND-64), 1,9 та 2,3 (Ризогумін) рази нижчими порівнюючи з наступними фазами онтогенезу рослин. У нуту звичайного сорту Скарб у фазі цвітіння, початок формування бобів визначено статистично вірогідне зниження параметрів водного дефіциту за впливу мікробних препаратів на 19,0 % (*M. ciceri* ND-64) та 25,0 % (Ризогумін). Аналогічну закономірність виявлено і у фазі зеленого бобу. Варто відмітити, що листки сорту Скарб упродовж вегетаційного періоду характеризувалися порівнюючи з іншими досліджуваними сортами меншими параметрами водного дефіциту.

Таблиця 1.6

Вплив мікробних препаратів на водний дефіцит (%) листків нуту звичайного сорту Скарб, $M \pm m$, $n=4$

Варіант	Фаза росту і розвитку		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зеленого бобу* ³
Контроль	8,24±0,18	17,22±0,80	23,31±5,21
<i>M. ciceri</i> ND-64	7,05±0,50*	13,95±1,12*	14,58±2,05*
Ризогумін	6,96±1,01	12,92±2,67*	15,79±0,84*

Примітка: :* – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p < 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60%, сила вітру = 6,7 км/год

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57%, сила вітру = 5 км/год

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12 км/год

Відомо, що за помірного випаровування листками води і оптимального надходження її через кореневу систему з ґрунту в рослині створюється сприятливий водний баланс. За поєднання повітряної та ґрунтової посухи

порушується у рослині водний обмін. Це спричиняє зменшення обводнення тканин рослини, а відтак впливає на структуру біоколоїдів цитоплазми клітини і сприяє пошкодженню її структури [3].

Встановлено, що на початку онтогенезу нуту звичайного сорту Ярина у фазі вегетації виявлено тенденцію до зниження водного дефіциту листків за застосування у технології вирощування мікробних препаратів (табл. 1.7). У наступних фазах росту і розвитку рослин (генеративних) передпосівна обробка насіння *M. ciceri* ND-64 і Ризогуміном порівнюючи з контролем статистично вірогідно знижувала показники водного дефіциту їх листків на 29,8 % і 27,5 % (цвітіння, початок утворення бобів), 23,7 % і 26,9 % (зелений біб).

Таблиця 1.7.

Вплив мікробних препаратів на водний дефіцит (%) листків нуту звичайного сорту Ярина, $M \pm m$, $n=4$

Варіант	Фаза росту і розвитку		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зеленого бобу* ³
Контроль	15,03±1,13	14,12±0,64	14,22±0,26
<i>M. ciceri</i> ND-64	14,45±1,04	9,92±0,73*	10,85±1,10*
Ризогумін	14,85±1,62	10,24±0,55*	11,81±0,80

Примітка: :* – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p < 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60%, сила вітру = 6,7 км/год

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57%, сила вітру = 5 км/год

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12 км/год

Показано, що застосування у технології вирощування озимої пшениці саліцилової кислоти шляхом позакореневої обробки у фазі колосіння–цвітіння підвищувало вмісту води і водний потенціал у листках рослин, а також сприяло зниженню їх водного дефіциту за умов посухи, що зумовило зниження втрат насіннєвої продуктивності озимої пшениці [17]. Під впливом путресцину і сперміну (екзогенні поліаміни) також виявлено підвищення посухостійкості пшениці озимої за умов, наближених до природних. Поліаміни впливали на водний метаболізм, зокрема знижували водний

дефіцит, очевидно, за рахунок зниження стану антиоксидантної та осмопротекторної систем і продихової провідності [14]. Показано, що за змодельованого стресу кадмієвим забрудненням, розвивається також водний дефіцит, що прослідковується на 14 добу експозиції. Параметри водного дефіциту рослин зеленого салату дослідних варіантів зростали до 33 % [30].

Варто зазначити, що у фазі вегетації рослин вологість повітря була найвищою (60 %) (57 % – цвітіння, початок формування бобів та 55 % – зелений біб), температура повітря – найнижчою (20°C) (25°C – цвітіння, початок формування бобів та 21°C – зелений біб) порівнюючи з іншими фазами, що відповідно вплинуло на показники водного дефіциту листків усіх варіантів.

Встановлено, що за впливу *M. ciceri* ND-64 і Ризогуміну показники водного дефіциту листків нуту звичайного сорту Буджак у фазі вегетації, нижчі на 27,5 % і 39,3 % порівнюючи з контролем (табл. 1.8).

Таблиця 1.8.

Вплив мікробних препаратів на водний дефіцит (%) листків нуту звичайного сорту Буджак, $M \pm m$, $n=4$

Варіант	Фаза росту і розвитку		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зеленого бобу* ³
Контроль	10,54±0,66	13,12±0,59	15,75±0,53
<i>M. ciceri</i> ND-64	7,64±0,78*	9,88±0,46*	12,26±0,77*
Ризогумін	6,40±0,53	8,27±0,64*	11,06±0,66

Примітка: :* – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p < 0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60%, сила вітру = 6,7 км/год;

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57%, сила вітру = 5 км/год

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12 км/год

Аналогічну закономірність визначено і в наступних генеративних фазах онтогенезу рослин. Зокрема, під час цвітіння, початок утворення бобів дефіцит води у листках нуту звичайного сорту Буджак був нижчим порівнюючи з параметрами листків рослин варіанту контроль на 24,7 % (*M.*

ciceri ND-64) і 36,6 % (Ризогумін), у фазі зеленого бобу – 22,2 % (*M. ciceri* ND-64) і 29,8 % (Ризогумін).

За обробки насіння нуту звичайного сорту Пам'ять мікробними препаратами визначено також зниження показників водного дефіциту листків порівнюючи з контролем у фазі вегетації на 16,7 % (*M. ciceri* ND-64) та 26,4 % (Ризогумін), цвітіння, початок формування бобів – 12,4 % (*M. ciceri* ND-64) та 6,4 % (Ризогумін), зелений біб – 4,5 % (*M. ciceri* ND-64) та 25,3 % (Ризогумін) (табл. 1.9). Листки нуту звичайного сорту Пам'ять у фазі вегетації характеризувалися подібними показниками водного дефіциту до фази зеленого бобу. Фаза цвітіння, початок утворення бобів характеризувалася найвищою температурою повітря та найнижчими показниками його вологості, що відповідно також позначилося на параметрах водного дефіциту.

Таблиця 1.9

Вплив мікробних препаратів на водний дефіцит (%) листків нуту звичайного сорту Пам'ять, $M \pm m$, $n=4$

Варіант	Фаза росту і розвитку		
	вегетації* ¹	цвітіння, початок утворення бобів* ²	зеленого бобу* ³
Контроль	18,46±0,41	22,34±0,71	15,85±0,74
<i>M. ciceri</i> ND-64	15,37±0,89*	19,58±0,83*	15,13±0,81
Ризогумін	13,59±0,72*	20,92±0,66	11,84±0,62*

Примітка: :* – різниця достовірна порівнюючи з контролем при $p<0,05$;

*¹ – температура повітря – 20°C, вологість = 60%, сила вітру = 6,7км/год;

*² – температура повітря – 25°C, вологість = 57%, сила вітру = 5км/год;

*³ – температура повітря – 21°C, вологість = 55%, сила вітру = 12км/год

Отже, застосування *M. ciceri* ND-64 та комплексного мікробного препарату Ризогумін для передпосівної обробки насіння суттєво знижувало показники водного дефіциту листків *Cicer arietinum* L. сортів Буджак, Скарб, Пам'ять та Ярина упродовж онтогенезу.

РОЗДІЛ 2

ВІДОБРАЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВОДООБМІНУ РОСЛИН У ПРАКТИЦІ НАВЧАННЯ БІОЛОГІЇ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

2.1. Розробка проблеми водообміну рослин у теорії навчання

У дослідженнях педагогічного змістового знання (РСК) вже давно наголошується, що якість засвоєння наукових понять залежить не лише від «що» і «скільки» навчати, а й від «як саме» – від відповідності методів віковим та мотиваційним характеристикам учнів, правильного добору репрезентацій (моделей, аналогій, візуалізацій), фасилітації рефлексії щодо власних попередніх уявлень [34; 38; 43]. Якщо перенести цей оптичний приціл на тему водообміну, то ми, по-перше, повинні чітко окреслити цільові концепти (уявлення), по-друге, передбачити типові альтернативні (переднаукові) пояснення, по-третє, обрати такі навчальні методики, які, з одного боку, відкривають шлях до наукової моделі (осмотичний тиск, водний потенціал, транспіраційний потік), а з іншого – не перевантажують формалізмом там, де ще бракує опорних знань з клітинної біології та екології. Відтак, педагогічна перспектива цієї теми є невід’ємною частиною ширшої теорії навчання природничих наук, де критеріями якості виступають не тільки відтворення термінів, а зміна способів міркування учня про явище, зрушення від феноменологічної інтуїції до механістичного пояснення, і, врешті, готовність застосувати модель водообміну в нових контекстах (польових умовах, проектних рішеннях, міжпредметних задачах) [40; 42; 43].

Насамперед визначимо цільові уявлення, без яких тема втрачає когнітивну цілісність. Учень має прийти до таких «опорних» тверджень: рослина поглинає воду з ґрунту переважно кореневими волосками, формуючи градієнт водного потенціалу; вода рухається по ксилемі завдяки когезійно-транспіраційному механізму, що підтримується різницею потенціалів і осмотичними процесами; втрати води зумовлені транспірацією через продихи, а також випаровуванням і в окремих випадках ексудацією;

інтенсивність водообміну залежить від факторів середовища (температура, вологість, радіація, вітер), ґрунтових умов (вологоємність, солоність), біологічних характеристик виду (морфологія листка і кореня, тип фотосинтезу, фаза росту) і антропогенних стресорів; регуляція відкриття продихів – ключовий вузол керування компромісом між вуглекислим газом для фотосинтезу і втратами води. Це не просто перелік фактів, а логічно зв'язана модель, де кожен елемент пояснює інший: чому з підвищенням температури (за однакової вологості повітря) зростає транспірація; чому на солончаках поглинання води ускладнене; чому рослина «закриває» продихи у полуденну спеку і як це впливає на фотосинтез. У цьому сенсі теорія навчання природничих дисциплін радить розгортати зміст від «потреби в поясненні» до «моделі, що пояснює і прогнозує», аби учень побачив у моделі інструмент дії, а не лише «схему для запам'ятовування» [38; 43].

Якщо говорити про ступені сформованості цих уявлень, то варто враховувати, що учні приходять на урок із певними інтуїтивними моделями. Найчастіше спостерігаються, з одного боку, антропоморфізм («рослина п'є воду, як людина, через «трубочки» у стеблі»), а з іншого – статична картина («вода зайшла і «стоїть» у рослині, ніби у резервуарі»). Перше зводить поглинання до «акту пиття» і ігнорує енергетику процесу; друге не враховує постійний потік і роль продихів. Коли такі уявлення залишити без корекції, вони закріплюються і вступають у конфлікт з будь-якою спробою пояснити осмос, водний потенціал, кавітацію, продихову регуляцію. Тому перший дидактичний крок – зробити ці уявлення явними, перевести їх у предмет дискусії, а далі – зіставити з даними спостережень і дослідів. Тут повністю спрацьовує логіка РСК: учитель, який знає «типові помилки учнів», навмисне конструює навчальні ситуації, що конфронтують наївне пояснення з експериментом (наприклад, дослід із листком, який втрачає масу за різної вологості повітря; демонстрація «плачу» винограду навесні; реєстрація температурних ефектів на транспірацію), і тим самим переводить учня до наукового поняття [34; 38; 42]. Суттєво, що в цьому процесі важить метакогніція: учень має не лише «почути» правильну відповідь, а відрефлексувати, як саме змінилося його бачення процесу, за якими

критеріями він тепер відрізняє умови «високої транспірації» від «низької», як співвідносить це з екологічним значенням рослин у водному балансі території [40].

Психологічні та вікові передумови запровадження цієї теми вказують на оптимальність старшої школи (10-11 класи) або профільного курсу біології/екології. По-перше, саме на цьому етапі більшість учнів уже опанували базову ідею клітини як елементарної одиниці будови, розрізняють тканини (провідна, покривна, основна), мають первинне уявлення про дифузію й осмос. По-друге, когнітивний розвиток дозволяє працювати з абстрактними моделями і багатофакторними залежностями, будувати причинно-наслідкові ланцюги на рівні «механізм – наслідок – прогноз». Водночас для частини класу потрібна диференціація: комусь достатньо якісної схеми («чому за сухого вітру листок «висихає» швидше»), а комусь – кількісної задачі з оцінкою швидкості транспіраційного потоку, коефіцієнтів випаровування, розрахунку водокористувальної ефективності (WUE) за польовими даними. Саме теорія навчання пропонує «сходінки» когнітивної складності: від феноменологічного опису через мікромоделі (моделювання продихів, роль осмотичних агентів) до інтегративних екологічних застосувань (баланс вологи території, вплив рослинності на мікроклімат) [14; 18].

Узгодження цих аспектів із професійною компетентністю вчителя – окремий, але визначальний пункт. РСК (pedagogical content knowledge) у сучасному розумінні описує не просто «суму» методики й предмета, а інструментальне знання про те, які саме репрезентації (аналогії, моделі, задачі, досліди) ефективні саме для цього змісту, і саме для цих учнів, і саме за таких умов [38]. Дослідження з РСК у природничій освіті показують, що найбільш результативними стають курси, де вчитель:

- 1) системно працює з хибними уявленнями;
- 2) використовує активні методи навчання (опитування в аудиторії, інструкції з перевернутим класом, роботу з даними);
- 3) інтегрує цифрові засоби вимірювання, моделювання і візуалізації;

4) задає метакогнітивні рамки для рефлексії («як я дізнаюся, що моя модель працює?») [34; 42; 43]. Для теми водообміну це означає, що вчитель спеціально планує «вузлові точки»: демонстрацію залежності транспірації від вологості повітря, перевірку впливу освітлення на відкриття продихів, зіставлення листків ксерофітів і мезофітів, моделювання руху води по ксилемі на прикладі капілярних систем. У рамках підготовки вчителів (до- та післядипломної) доцільно застосовувати моделі рефлексивної практики: запис коротких мікроуроків із подальшим аналізом, «мисленнєві карти» РСК для теми, розроблення банку завдань з урахуванням типових помилок [38; 42].

Перейдімо до методів активізації пізнавальної діяльності. У природничій освіті загальна тенденція останнього десятиліття – перехід від «пояснювально-ілюстративного» навчання до активного, дослідницько-орієнтованого, з акцентом на роботу з даними й моделювання. Специфіка теми водообміну – у її доступності для простих, але змістовних експериментів, які дають відчутний «когнітивний профіт» навіть за мінімальних ресурсів. Класичні лабораторні досліді (зміна маси листка за різної вологості повітря, вимірювання швидкості випаровування за різних температур, спостереження «плачу» лози, візуалізація судин ксилеми барвниками) легко адаптуються до умов шкільної лабораторії, а системи цифрових датчиків (температури, вологості, вологості ґрунту) додають кількісну точність і можливість будувати прості регресійні моделі. Важливо, що такі досліді не повинні «імітувати» науку – вони повинні відтворювати логіку наукового міркування: гіпотеза → дизайн → збір даних → аналіз → інтерпретація → висновок. У цьому відношенні залучення LearningApps та мобільних пристроїв у шкільних курсах біології показало позитивний ефект на інтерес і залучення учнів, особливо коли цифрові активності поєднані з реальними вимірюваннями і короткими дослідницькими циклами [47].

Доцільно описати кілька базових форматів навчальної діяльності, «закцентованих» під водообмін. По-перше, лабораторія «Транспірація і фактори середовища»: учні працюють у малих групах, кожна маніпулює одним фактором (вологість, температура, освітленість) і вимірює зміну маси

стандартних листових зразків упродовж 30-40 хвилин, фіксуючи дані в таблиці; на підсумковій сесії групи накладають дані на єдину координатну сітку й будують порівняльні висновки. По-друге, польове спостереження «Водний режим рослин нашої місцевості»: учні обстежують 2-3 біотопи (наприклад, узлісся, поля, шкільний двір), фіксують види-індикатори, стан листової поверхні, наявність адаптацій (товста кутикула, редукція листка), ґрунтову вологість (за простими методиками), роблять фотозвіт і короткий екологічний сценарій «як зміниться водний режим у разі аномальної спеки». По-третє, моделювання «Крапля води у рослині»: за допомогою віртуальних симуляцій або інтерактивної презентації клас разом «проймає» шлях води від ґрунту до атмосфери, описуючи на кожному етапі рушійні сили і можливі втрати. По-четверте, проблемні задачі: «Чому кактус відкриває продиhi вночі?», «Чому у теплицях іноді зменшують вентиляцію, щоб підвищити продуктивність?», «Які будуть наслідки для листка, якщо солоність ґрунту різко зросте?» – і відповідно виокремлюють механістичні пояснення (осмотичний потенціал, САМ-фотосинтез, зміна градієнта водного потенціалу) [4; 14; 18].

Кожен із цих методів має переваги. Лабораторний дослід розвиває уявлення про «змінну» і «контроль», формує звичку працювати з похибками та повторністю вимірювань; групова робота створює поле для аргументованої дискусії і розподілу ролей; моделювання допомагає «побачити невидиме» – те, що неможливо безпосередньо спостерігати в живій рослині; проблемні задачі і кейси (у тому числі з екологічного менеджменту води) тренують перенесення моделей на нові ситуації. ІКТ-доповнення – датчики, прості логери даних, мобільні додатки для побудови графіків – не є самоціллю, але вони знижують поріг входу у кількісний аналіз і роблять «дані» об'єктом осмислення, а не просто «числами в зошиті» [43; 47]. Сучасні огляди підкреслюють, що активне навчання в біології (з регулярними опитуваннями в аудиторії, спільним розв'язуванням задач, взаємооцінюванням) корелює з кращими результатами і утриманням знань, особливо в великих класах [43]. Йдеться не про заміну пояснення на «хаос

активностей», а про вивірене конструювання навчального простору, де учні працюють з феноменами, даними і моделями.

Важливо описати й педагогічний контекст уроку. Рівень підготовки класу зазвичай неоднорідний, тому диференціація завдань і темпу – не розкіш, а необхідність. Потрібно створити можливість «мінімальної успішності» (навіть учень, який не опановує кількісний апарат, має зміцнити базові уявлення про причини-наслідки), і в той же час – «стелю зростання» для мотивованих (наприклад, міні-проект із порівняння WUE у двох видів за спостережними даними). Управління часом – критичний фактор: лабораторному дослідженню потрібні чіткі регламенти, попередня підготовка зразків, кодифікація ролей у групах. Без цього активні методи перетворюються на «цікавинку», не проєктуючись у стійке знання [4; 14]. Рамки РСК підказують, що в тези плану уроку варто закладати «питання високої важливості» (hinge questions), за відповідями на які учитель оперативно «переналаштовує» пояснення: «Що рухає воду в ксилемі?», «Чому солоність ґрунту може зменшити поглинання води?», «Як температура й вологість впливають на транспірацію?» – ці питання слугують діагностикою і водночас спрямовують мислення учня в русло механістичного міркування [42; 43].

Слід окремо зацентрувати увагу на меті формування ключових компетентностей. Екологічна грамотність тут не зводиться до «знання про воду», а включає здатність читати локальні ознаки водного стресу рослин (скручування листків, зміна блиску та тургору), співвідносити їх із метеорологічними умовами і практичними рішеннями (полив, мульчування, добір стійких видів для озеленення). Уміння працювати з інформацією – це й цифрова грамотність (пошук і критична оцінка джерел), і базова статистична культура (середні значення, варіативність, побудова графіків), і академічна доброчесність (коректне посилання на джерела). Дослідницькі навички – постановка гіпотези, дизайн, робота з похибкою, інтерпретація – стають наскрізними; вони так само важливі, як і набір фактів про ксилему чи продихи [34; 38; 47]. У такий спосіб «тема водообміну» стає «тренажером наукового мислення», а не лише розділом фактології.

Переходимо до огляду навчальних програм і підручникових подач. У більшості чинних шкільних курсів біології тема водного режиму рослин наявна у блоці «Фізіологія рослин», зазвичай у 10-11 класах профільного рівня, а на базовому рівні – у стислому викладі в курсі «Рослини» середньої школи. Зазвичай програми передбачають 1-2 години на базове ознайомлення з водним обміном і транспірацією; у профільних курсах – 2-4 години, включно з лабораторною роботою. Формально очікувані результати – «називає і пояснює» механізми надходження, транспорту і втрат води, «характеризує» залежність від факторів середовища, «проводить» прості експерименти. Проте аналіз реального підручникового наповнення часто виявляє дисбаланс між декларацією активного навчання і переважно репродуктивними завданнями, обмеженими питаннями на відтворення. Методичні посібники пропонують ширший діапазон форм (польові спостереження, мікропроекти), але їх застосування залежить від ресурсів школи і підготовки вчителя [14; 18].

Сильні сторони більшості сучасних підручників – структурована подача базових понять, наявність ілюстрацій провідних тканин і схематичних моделей транспірації, інтеграція екологічних прикладів (ксерофіти, гідрофіти), поява розділів «перевір себе» з елементами завдань PISA-типу. Слабкі – недостатня увага до типових хибних уявлень і шляхів їх корекції, брак завдань на побудову і перевірку гіпотез, мало кейсів, де доводиться обґрунтовувати вибір між суперечливими поясненнями; рідкісні звернення до сучасних даних (напр., дистанційні індекси, польові мікрометеорологічні спостереження), які робили б тему актуальною. Деякі видання пропонують «лабораторію на папері» – заповнення таблиць і роботу з уже готовими даними, але без реального вимірювання – що обмежує розвиток дослідницьких компетентностей [4; 14; 18].

Узагальнюючи ці спостереження, доцільно подати професійну матрицю, яка поєднує зміст теми, типові учнівські уявлення, можливі педагогічні інтервенції та показники досягнення. Подібні інструменти рекомендуються в дослідженнях РСК як засіб планування уроків і самооцінювання вчителя [34, 38, 42].

Таблиця 2.1

Матриця РСК для теми «Водообмін рослин»: цілі уявлення, типові помилки, педагогічні інтервенції, показники сформованості

Цільове уявлення	Типова помилка учнів	Педагогічна інтервенція	Показники досягнення
Вода рухається від ґрунту до листка завдяки градієнтам водного потенціалу і транспіраційному потоку	«Рослина п'є воду як людина», «вода статична всередині»	Експеримент із масою листка за різної вологості; барвник для візуалізації судин; дискусія «чому потік не зупиняється»	Учень пояснює механізм руху, будує причинно-наслідкову схему, прогнозує наслідки зміни вологості
Регуляція продихів: компроміс між CO ₂ і втратою води	«Продихи завжди відкриті, якщо світло»	Порівняння листків у тіні/на світлі; модель «замикальні клітини»; задачі на вплив вологості і температури	Учень обґрунтовує, чому продихи закриваються; застосовує це в екологічних кейсах
Вплив солоності та температури на поглинання	«Солоність не впливає на воду», «тепліше – завжди краще»	Демонстрація осмосу; експеримент із проростками в розчинах різної концентрації; обговорення стресу	Учень робить висновки за даними, співвідносить з поняттям осмотичного потенціалу
Водний обмін і екосистемний баланс	«Транспірація – лише «втрата», екологічно байдужа»	Кейси про мікроклімат лісу; польові спостереження; супутникові індекси	Учень пояснює роль рослин у локальному кліматі, робить екологічні узагальнення

Така таблиця дисциплінує планування: учитель заздалегідь вибудовує траєкторію від помилки до коректного уявлення і закладає «місце виміру» – як саме ми перевіряємо, що зміна відбулася (усна аргументація,

пояснювальний малюнок, короткий есе-тест, інтерпретація графіка). Дослідження показують, що саме явне проєктування інтервенцій під типові «мисленнєві пастки» підсилює ефект активного навчання в біології [38; 43].

На рівні організації навчального процесу доцільно структурувати тему за логікою «феномен – модель – застосування». У першій фазі ми провокуємо «когнітивний конфлікт»: коротке відео/спостереження, де листок у сухому повітрі швидко втрачає масу, або дані про різницю температури листової поверхні в тіні і на сонці. Учні формулюють первинні пояснення. У другій фазі – вводимо модель: рух по ксилемі, градієнт водного потенціалу, осмос, роль продихів; тут доречні мікромоделі (малюнок замикаючих клітин як насосу, капілярне піднімання у трубці, метафора «ланцюжка водних молекул» із нитки намистин). У третій фазі – застосування: аналіз польових даних, мікропроекти (наприклад, порівняння листків ксерофітів і мезофітів), екологічні кейси (озеленення шкільного подвір'я з доббором видів за водним режимом). Такий дизайн уроку відповідає потужним висновкам про ефективність активного навчання в великих аудиторіях – коли кожні 10-15 хвилин уводиться коротка діяльність учнів з обов'язковим поверненням до спільної рамки [43].

Щоб забезпечити стійке засвоєння, необхідні мікроцикли повторення та переносу. Після первинного уроку (або блоку з 2-3 уроків) корисно через тиждень провести «крос-тему»: під'єднати водообмін до теми фотосинтезу («як зміна відкриття продихів впливає на продуктивність?») або до теми мінерального живлення («як вода транспортує мінерали?»). Далі – спробувати задачі з екологічного менеджменту (зменшення поливу, мульчування, добір культур). У термінах теорії навчання це створює «щільну мережу» зв'язків поняття з іншими елементами курсу, що підвищує доступність поняття при відтворенні і його гнучкість при застосуванні [14; 18]. Методичні посібники з навчання біології (на рівні національних інститутів педагогіки) пропонують саме такі міжтемні інтеграції як шлях до формування цілісної природничої грамотності [18].

Звернімо увагу також на контекст війни та посттравматичні обмеження освітнього середовища, коли ресурс часу й уваги, а також доступ до

лабораторій, може бути зменшений. Дослідження з організації навчання біології в умовах воєнних ризиків радять переходити до гнучких, ресурсозбережних форматів: портативні набори для експериментів, мікролабораторії на базі класних кімнат, використання локальних матеріалів для імпровізованих дослідів (прозорі пляшки як камери випаровування, паперові серветки для капілярних демонстрацій), а також розгортання дистанційних/змішаних модулів із симуляторами і спільною обробкою даних [4; 19 – 21]. У таких умовах особливо важливо зберігати «ядро дослідження»: навіть найпростіший дослід повинен мати гіпотезу, змінну, дані і висновок. Цифрові платформи (зокрема Learning Apps та аналогічні) можуть використовуватися для коротких перевірок розуміння, рефлексивних щоденників, конструювання простих симуляцій (наприклад, «пересунь повзунки вологості/температури і передбач результат для транспірації») [13; 17; 47]. Зрештою, сама тема водообміну – природна точка для інтеграції екологічної етики: ощадне використання води, локальні практики підтримки зелених насаджень, вплив рослинного покриву на комфорт у містах.

З позицій теорії навчання вагоме місце займає концепт «репрезентацій і перекодувань». Одне і те саме явище має бути подане щонайменше у двох-трьох формах: словесній (пояснювальний текст), візуальній (схема, малюнок, анімація), символічній (графік залежності транспірації від вологості), і – де можливо – тілесно-діяльнісній (моделювання «ланцюжка» водних молекул). Досвід формування РСК показує, що саме грамотне чергування і поєднання репрезентацій підвищує «трансперенцію» моделі для учня: вона стає не чужою формулою, а «баченою» й пережитою структурою [38; 40; 43]. Водночас важливо уникати надміру аналогій, що ведуть в оману (наприклад, «насос» у стеблі як активний механізм піднімання – така метафора небезпечна, якщо не наголошено на пасивній природі транспіраційного «насоса»). Тут доречний короткий список «правил безпеки аналогій»:

- 1) завжди вказуйте, що саме аналогія захоплює і що втрачає;
- 2) показуйте межі застосування;
- 3) запрошуйте учнів до уточнення – «де аналогія ламається?»;

4) зіставляйте дві різні аналогії (капілярність і «ланцюжок когезії») і просіть учнів вирішити, в якому контексті яка корисніша [6; 8; 34; 38].

Щодо оцінювання: воно має фіксувати не тільки знання термінів, а й сформованість мислення. Добре працює багаторівневий інструментарій: короткі концептуальні тести (multiple-choice із якісними графіками і необхідністю пояснити вибір), пояснювальні завдання відкритого типу («чому листок у вітряний, сухий день втрачає воду швидше?»), міні-звіти про досліди, усні обговорення кейсів. Для частини завдань доцільно застосовувати рубрики з критеріями (коректність моделі, аргументація, робота з даними). У дослідженнях активного навчання показано, що чіткі, прозорі критерії покращують якість зворотного зв'язку і сприяють вирівнюванню очікувань між учителем і учнями [31; 32; 38; 43]. Особливо продуктивним є формат «перевір свої уявлення»: учень повертається до первинної гіпотези після досліду і коротко фіксує, що змінилося в його розумінні – це і є метакогнітивна практика, на яку звертають увагу огляди PCK-NOS (PCK для природи науки) [40].

Не можна оминати і питання професійного розвитку вчителя. Дослідження розвитку PCK підкреслюють значення навчальних спільнот (lesson study, мікронаставництво), де вчителі разом конструюють уроки, обговорюють «вузькі місця» теми і спільно рефлексують результати. У випадку водообміну це може бути спільно створений «банк мікродослідів», каталог локальних кейсів (напр., «посушливе літо в нашому регіоні – спостереження і дії»), бібліотека візуальних ресурсів і завдань із багаторівневою диференціацією. Також важлива робота з даними – елементарна статистика, графічна візуалізація – для багатьох учителів стає бар'єром; курси підвищення кваліфікації повинні включати такі модулі, а не обмежуватися «методичною бесідою» [38; 42]. Окремі огляди також наголошують на потребі інтегрувати PCK-NOS – тобто педагогічне знання про те, як навчати природи наукового пізнання – у підготовку вчителів природничих дисциплін, щоби учні вчилися читати наукові графіки, ставити питання й оцінювати докази [1; 40].

Нарешті, рекомендації щодо підручників і програм. По-перше, збільшити частку завдань, що прямо адресують типові хибні уявлення (з пояснювальним зворотним зв'язком); по-друге, ввести обов'язковий мікропроект з польовим компонентом (навіть якщо це «шкільний двір»), де учні збирають прості дані про водний статус рослин і роблять висновки; по-третє, інтегрувати розділ «Вода і місто»: роль насаджень у регуляції мікроклімату, водозбереження; по-четверте, додати модулі з цифрової грамотності (візуалізація даних, побудова графіків, базові моделі) з використанням безкоштовних інструментів; по-п'яте, забезпечити диференціацію завдань (від якісної інтерпретації до кількісних оцінок) [14; 18; 43]. Методичні посібники на національному рівні можуть включати «паспорти тем» РСК – компактні матриці на кшталт наведеної таблиці, із прикладами запитань високої важливості, лабораторних сценаріїв, типових помилок і способів їх корекції. Доречним буде і розділ «ресурси для низькоресурсних умов»: інструкції для імпровізованих експериментів, поради щодо організації змішаного навчання в умовах обмеженої інфраструктури [4; 47].

Як проміжний підсумок, варто звести декілька принципів організації навчання теми водообміну, що повторюються у дослідженнях і методичних настановах:

- навчання має бути активним, з реальними даними, навіть якщо це мікромасштаб;
- модель (осмос, водний потенціал, транспірація) повинна бути відображена у багатьох репрезентаціях і застосована в нових контекстах;
- типові хибні уявлення потрібно робити явними і працювати з ними інструктивно, а не «заговорювати»;
- оцінювання має перевіряти механістичне пояснення і вміння працювати з даними, а не лише термінологічне відтворення;
- учитель працює у РСК-рамці: зміст × метод × контекст класу;
- цифрові технології – засіб підсилення дослідницького ядра, а не заміник дослідження [34; 38; 42; 43; 47].

Усе сказане вище не суперечить, а навпаки, підтримує ширший освітній вектор – від «знаннєвого» до «компетентнісного» навчання природничих наук. Тема водообміну – чудова майстерня для формування екологічної грамотності, адже вона природним чином поєднує «мікро» (клітинні процеси) і «макро» (екосистемні наслідки), наочні феномени (висихання листка, запотівання теплиці) і складні моделі (SPAC-континуум), побутовий досвід (полив кімнатних рослин) і глобальні виклики (посухи, урбаністичні «острови тепла»). Саме через такі теми учні проявляють зацікавлення до наукового мислення – здатності ставити питання, сумніватися, перевіряти, шукати дані, будувати моделі, узгоджувати їх із реальністю. У цьому сенсі педагогічна розробка теми водообміну в теорії навчання – не периферійний фрагмент програми, а «міст» між біологічною наукою, екологічною відповідальністю й освітньою практикою, що формує майбутніх громадян, здатних мислити системно і діяти розважливо [34; 38].

2.2. Реалізація проблеми водообміну рослин у практиці роботи закладів загальної середньої освіти

Практична реалізація теми «водообмін рослин» у процесі навчання біології здійснювалась у рамках Тижня біології у Нижчелуб'янківському ліцеї. Заняття відбулося у два етапи – лабораторний модуль і рефлексивно-аналітичний семінар протягом 18-20 вересня 2025 р. Загалом у проєкті брали участь 22 учні середньої та старшої, що вже мали базові знання про клітинну будову, тканини рослин і поняття транспірації.

Основна мета заняття полягала у формуванні цілісного уявлення про водообмін рослин на основі експериментального дослідження та розвитку в учнів дослідницьких умінь, уміння працювати з даними і робити наукові висновки. Серед завдань було:

- перевірити на практиці чинники, що впливають на транспірацію та поглинання води рослинами;
- порівняти водний режим двох сортів рослин нуту звичайного Скарб та Буджак;

- навчитися фіксувати й аналізувати результати експериментальних досліджень;
- розвинути навички групової співпраці та міжпредметної інтеграції знань із біології, екології, фізики та математики;
- усвідомити екологічне значення водного обміну в житті рослин і природних систем.

Перед початком занять учні пройшли коротке вхідне опитування (анкета з 10 пунктів) для діагностики вихідних уявлень про водообмін (рис.

2.1). Серед питань:

- Як саме вода потрапляє в рослину?
- Що змушує воду рухатися вгору від кореня по стеблі до листків?
- За яких умов транспірація посилюється?
- Чи однаково «п'ють» воду кактус і фікус?
- Що відбувається, якщо ґрунт стає солоним?

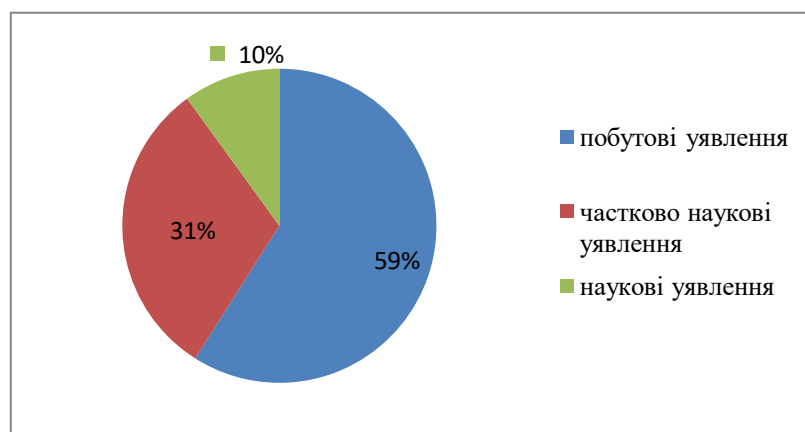


Рис. 2.1. Результати анкетування учнів перед початком експериментальних досліджень для діагностики вихідних уявлень про водообмін рослин.

Результати показали типовий розподіл: 59 % учнів у відповідях показали побутові уявлення («рослина п'є воду як людина»), 31 % респондентів навели у своїх відповідях частково наукові пояснення і лише 10 % опитаних змогли сформулювати коректну модель руху води через градієнт водного потенціалу. Це стало підставою для акценту на дослідницькому аспекті заняття – дати можливість побачити і виміряти

кількісні показники, що характеризують процес випаровування води рослинами, а не просто почути про нього.

Перший день був присвячений експериментальним дослідям, які організовано у трьох лабораторних станціях. Учні працювали у малих групах по чотири особи, виконуючи ролі: експериментатор, хронометрист, технік вимірювань і аналітик даних. Такий розподіл обов'язків підвищував ефективність проведеного дослідження та чіткість його виконання [22].

На станції А (транспірація) досліджували залежність втрати маси листка від вологості повітря. Кожна група отримувала шість листків нуту звичайного, три із яких розміщували на відкритому повітрі при 35 % вологості, інші три – під скляним ковпаком із вологим ватним тампоном (≈ 90 % вологості). Вимірювання маси здійснювали на початку й через кожні 30 хвилин протягом 2 годин. На станції С (візуалізація ксилемного потоку) проводили демонстраційний дослід із барвником: пагін стебла нуту звичайного занурювали у воду з метиленовим синім і за 40 хвилин спостерігали забарвлення судин у листках – підтвердження напрямку й неперервності водного потоку.

Зібрані дані було узагальнено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Вплив вологості повітря на процес випаровування води листками нуту звичайного (середні значення, $n = 3$)

Час (хв)	Втрата маси листка, % за 35 % вологості	Втрата маси листка, % за 90 % вологості
0	0,0	0,0
30	2,5	0,5
60	4,7	0,9
90	6,8	1,4
120	9,1	1,8

Результати дослідження зміни маси листків нуту звичайного показали чітку експонентну залежність інтенсивності транспірації від вологості навколишнього середовища: у сухішому повітрі листок втрачав воду в 5-6 разів швидше порівнюючи з вологим повітрям.

Під час проведення досліду С, який передбачав спостереження за рухом барвника у судинах учні змогли візуалізувати ідею «трубчастої системи» руху води.

У процесі проведення експериментів учитель (автор реалізації) дотримувався рекомендацій Кабака [11; 21] щодо «ужиткового ботанічного експерименту»: учні не лише виконують інструкції, а самостійно формулюють гіпотезу і змінюють умови за виявлення аномальних даних. Так, одна з груп повторно провела експеримент стосовно втрати листками маси при зниженій температурі повітря (18 °C) і відзначила уповільнення інтенсивності транспірації на $\approx 20\%$, що підтвердило правильність розуміння впливу факторів зовнішнього середовища на процес випаровування води з поверхні листків.

Організаційно заняття проходило в атмосфері дослідницької лабораторії: усі групи працювали одночасно, фіксуючи дані у спільній Google-таблиці; після завершення досліду результати було презентовано на узагальнюючій сесії у формі коротких 3-хвилинних доповідей із рисунками та власними висновками. Використання цифрової спільної таблиці не лише прискорило обробку, а й сприяло формуванню навичок наукової комунікації [23; 26; 28].

Другий день був присвячений аналітичній частині та рефлексії учнів. Для цього проведено коротке анкетування з тими самими запитаннями, що і перед експериментом. Результати анкетування учнів після проведення експериментів представлено на рисунку 2.2.

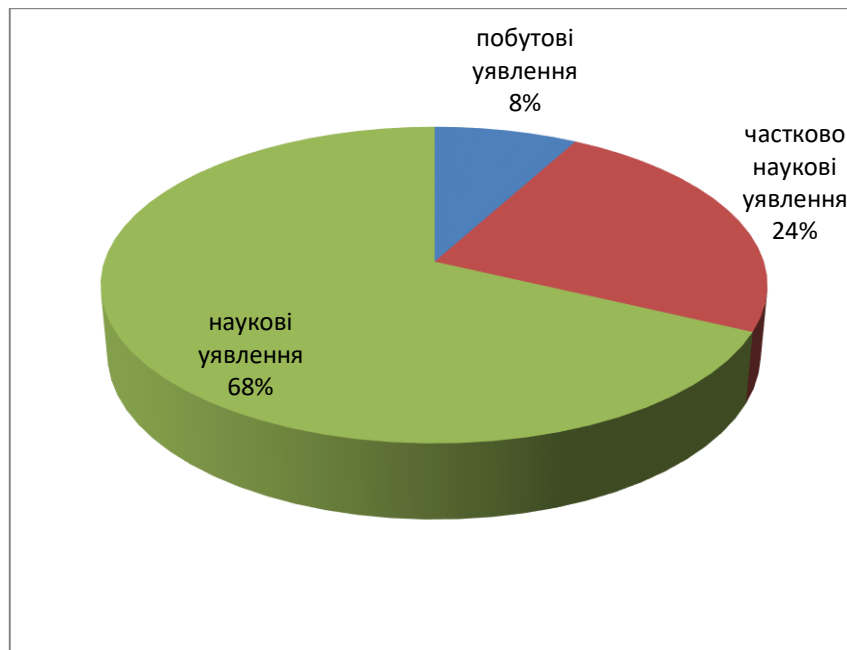


Рис. 2.2. Результати анкетування учнів після проведення експериментальних досліджень для діагностики кінцевих уявлень про водообмін рослин.

Після проведення експериментальних досліджень частка опитуваних, що навели правильні пояснення зросла з 10 % до 68 %, а частка респондентів, що розуміли процеси водообміну рослин на побутовому рівні зменшилась з 59 % до 8 %. Відсоток учнів, що наводили у відповідях частково наукові пояснення процесів водообміну також знизилась на 5 %. Окрім того, 91 % учнів зазначили, що тепер «краще розуміють, як вода рухається в рослині», а 73 % висловили бажання «повторити досліди з іншими видами» рослин. Якісні відповіді свідчили про глибше розуміння механізмів: у коментарях після проведення фізіологічних експериментів з'явилися висловлювання про «водний потенціал», «осмотичний тиск», «продихи» – терміни, яких майже не вживали учні до експерименту.

Під час заняття реалізовувались усі складові сучасної методики навчання біології, описані Нікітченко [22] – чітке планування експерименту, керування змінними, повторність вимірювань, фіксація результатів у таблицях, а також рефлексія після виконання. Особливе значення належить поєднанню емпіричного і теоретичного рівнів: після спостережень кожна група мала завдання словесно описати причинно-наслідкові ланцюги

(«менше вологи → зменшення транспірації → закриття продихів → зниження фотосинтезу»).

Окрім анкетування, учні взяли участь у груповій дискусії за моделлю «Що я дізнався – що мене здивувало – що я буду застосовувати». Цей метод, рекомендований Удовиченко [33], сприяє розвитку метакогнітивних навичок. У відповідях учні зазначали, що їх здивував «помітний ефект вологості», «швидкість втрати води» та «здатність кактусів зменшувати втрати». Окремі учні запропонували продовжити експеримент, вивчаючи вплив різних типів ґрунтів на процес випаровування води рослинами.

Важливою частиною практичної реалізації була міжпредметна інтеграція (використання математичних знань на навичок, графічне зображення результатів експериментальних досліджень, інтерпретація отриманих результатів з точки зору біологічних процесів). Учні застосували математичні формули для обчислення середніх значень і похибок, використовували цифрові таблиці та побудову рисунків (рис. 2.3), а під час підбиття підсумків обговорювали екологічні наслідки транспірації. У такий спосіб біологічний експеримент став міждисциплінарною навчальною подією [24 – 26].

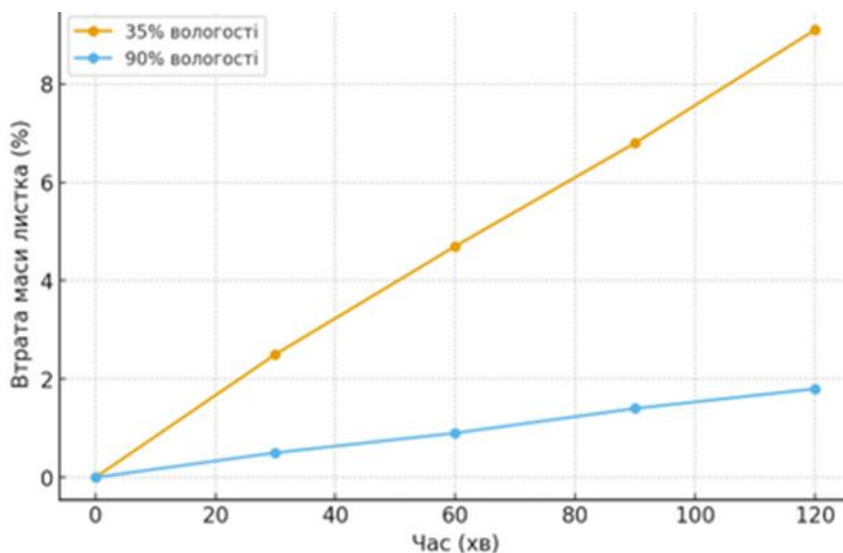


Рис. 2.3. Динаміка транспірації листків нуту звичайного за різної вологості повітря

Для оцінювання результатів застосовано комбіновану рубрику, що включала чотири критерії:

- наукова коректність пояснення процесів (0-4 бали);
- точність виконання вимірювань і обробки даних (0-4 бали);
- аргументованість висновків і зв'язок із теорією (0-4 бали);
- командна співпраця та презентація результатів (0-4 бали).

Максимальна кількість балів, яку можна отримати становила 16 балів; результати оцінювання учнів класу показали середній бал – 13,2 (82,5 %). Це засвідчило високий рівень засвоєння змісту матеріалу.

Рефлексія вчителя (записана в методичному щоденнику) засвідчила, що ключовими факторами успіху стали:

1. Чітка структура заняття (підготовка – експеримент – аналіз – рефлексія);
2. Наявність конкретного продукту діяльності (рисунок, таблиця, висновок), який учні могли продемонструвати;
3. Елемент відкриття, коли результат спостереження змінював початкові очікування;
4. Позитивна конкуренція між групами, що підвищувала мотивацію;
5. Доступність матеріалів – звичайні кімнатні рослини, просте обладнання, що робить методику масштабованою для будь-якої школи [2; 3; 5; 7; 9; 21].

Водночас зафіксовано кілька слабких сторін: обмежений час не дозволив реалізувати довготривале спостереження за добовою динамікою водообміну; не всі групи однаково якісно фіксували дані, що зумовило варіації у похибках; частині учнів було складно сформулювати висновки без підказки. Для вдосконалення пропонується:

- продовжити серію дослідів у форматі учнівського міні-проєкту на 5-7 днів, де фіксуються зміни транспірації щоденно;
- використати сенсори вологості листків та ґрунту, якщо є технічна можливість;
- створити спільну онлайн-базу даних класу для порівняння результатів різних років;
- залучити паралельні класи або гуртки для міжшкільного порівняння результатів;

- запровадити короткі відеозвіти про досліди як форму підсумкової роботи [26 – 29].

Особливо цінним наслідком стала зміна мотивації учнів. За результатами анкетування після заняття, 86 % респондентів зазначили, що їм «цікавіше вивчати процеси, які можна побачити й виміряти», а 78 % висловили намір «брати участь у наступних біологічних експериментах». Це відповідає висновкам Мороза і Степанюк [24; 32] про те, що саме дослідницькі форми підвищують внутрішню мотивацію.

У межах практичної реалізації також було проведено фенологічне спостереження за кімнатними рослинами упродовж наступного тижня. Учні вели журнал спостережень: щодня фіксували температуру та вологість повітря, зовнішній вигляд рослин, наявність тургору. Методика базувалась на підході Дерев'янка і Міронець [8; 10 – 12; 20], які рекомендують поєднувати фенологічні й фізіологічні спостереження в шкільній практиці. За підсумками учні підготували короткі звіти.

Ефективність реалізації оцінювалась за трьома групами показників: когнітивними (знання й розуміння процесів), операційними (уміння працювати з даними, робити висновки) і ціннісно-мотиваційними (ставлення до природи, екологічна відповідальність). Усі три показники показали позитивну динаміку: середній приріст балів у тесті знань склав +34 %, операційні вміння покращились за якісною шкалою з 2,7 до 4,1 (із 5 можливих), а екологічна мотивація – з 3,1 до 4,5. Ці дані підтверджують практичну результативність методики, запропонованої у посібниках Мороза і Степанюк [13 – 16].

Окремо варто підкреслити важливість педагогічної рефлексії. Учитель провів самоаналіз за схемою: «що вдалося – що не вдалося – що вдосконалити». Серед ключових висновків:

- активна робота з помилковими уявленнями підвищує розуміння теми;
- навіть короткий експеримент має значний ефект, якщо супроводжується рефлексією;

- цифрові інструменти (таблиці, сенсори) роблять навчання науково достовірнішим;
- спільна діяльність формує комунікативні компетентності учнів;
- важливо планувати наступність між теоретичними і практичними уроками, щоб закріпити ефект.

Загальний висновок реалізації такий: експериментальне вивчення теми водообміну у шкільному курсі біології є дієвим засобом інтеграції знань, розвитку дослідницького мислення та формування екологічної культури учнів. Використані методи довели свою доступність і гнучкість навіть у звичайних шкільних умовах без складного обладнання.

У перспективі цю тему планується розвивати у форматі учнівського наукового гуртка «Вода і життя», який передбачає систематичні спостереження за станом рослин у різні пори року, визначення коефіцієнта водоспоживання різних видів і розробку екоініціатив для шкільного подвір'я (зелені смуги, крапельне зрошення). Таким чином, навчальний процес виходить за межі класу, перетворюючись на реальний внесок у формування культури сталого розвитку [28; 29; 32].

Підсумовуючи, зазначимо, що проведене практичне заняття поєднало теоретичні принципи сучасної біологічної освіти з їхньою конкретною реалізацією у шкільному середовищі. Водообмін рослин із абстрактної теми перетворився на дослідницьку подію, що активізувала пізнавальний інтерес учнів, навчила працювати з науковими даними і виховала відповідальне ставлення до природних ресурсів. У цьому полягає справжній сенс фізіологічного експерименту, оскільки він не лише поглиблює теоретичні знання, а змінює спосіб мислення учнів, сприйняття ними науки живою й зрозумілою.

ВИСНОВКИ

На основі комплексних досліджень встановлено ефективність використання фізіологічного експерименту з вивчення водообміну рослин нуту звичайного за застосування мікробіологічного препарату Ризогумін та бактеріальної суспензії *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 у процесі навчання предмету «Біологія та екологія».

1. На основі аналізу наукових джерел проаналізовано сучасний стан проблеми водообміну рослин за впливу кліматичних, ґрунтових, біологічних та антропогенних чинників і показано, що водообмін є багатокомпонентним процесом, який поєднує фізіологічні, біохімічні та екологічні механізми.

2. На параметри водообміну рослин впливають ґрунтово-кліматичні умови, передпосівна обробка насіння *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 та

комплексним мікробним препаратом Ризогумін і сортові особливості нуту звичайного.

3. За впливу мікробних препаратів виявлено зниження параметрів інтенсивності транспірації листків нуту звичайного сорту Пам'ять упродовж онтогенезу на 16,1 – 31,9 % та сорту Ярина у фазі зеленого бобу на 24,7 – 31,5 %. Застосування мікробних препаратів у технології вирощування сортів Скарб та Буджак підвищувало інтенсивність випаровування води з поверхні листків. Під час вегетації рослин сорти нуту звичайного усіх варіантів за величиною інтенсивності випаровування води з одиниці площі за одиницю часу розміщуються у такому порядку: Ярина>Пам'ять>Скарб>Буджак. У фазі зеленого бобу за інокуляції насіння *Mesorhizobium ciceri*ND-64 за величиною інтенсивності транспірації сорти розміщуються наступним чином: Ярина>Пам'ять>Буджак>Скарб, за впливу Ризогуміну – Буджак>Ярина>Скарб>Пам'ять.

4. Застосування *Mesorhizobium ciceri* ND-64 та комплексного мікробного препарату Ризогумін для передпосівної обробки насіння суттєво знижувало показники водного дефіциту листків *Cicer arietinum*L. сортів Буджак, Скарб, Пам'ять та Ярина упродовж онтогенезу.

5. Досліджено стан вивчення проблеми водообміну рослин у змісті навчального предмета біології у закладах загальної середньої освіти. Тема водного балансу рослин має значний потенціал у навчанні біології, оскільки дозволяє учням одночасно працювати з теоретичними моделями, експериментальними дослідженнями, спостереженнями та екологічними прикладами.

6. Розроблено план фізіологічних експериментів з водообміну рослин та оцінено їх доцільність під час проведення Тижня біології в школі. Після проведення експериментальних досліджень частка опитуваних, що навели правильні пояснення процесів водообміну зросла з 10 % до 68 %, а частка респондентів, що розуміли процеси водообміну рослин на побутовому

рівні зменшилась з 59 % до 8 %. Відсоток учнів, що наводили у відповідях частково наукові пояснення процесів водообміну також знизилась на 5 %.

7. Проведення фізіологічних дослідів з проблеми водообміну рослин характеризується чітким плануванням експерименту, керуванням змінними, повторністю вимірювань, фіксацією результатів у таблицях, а також рефлексією після виконання. Отримані результати підтверджують, що фізіологічний експеримент у шкільному курсі біології є ефективним засобом формування дослідницьких і екологічних компетентностей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаменко Т. І. Зміна агрокліматичних умов та їх вплив на зернові господарства. *Агроном*. 2006. № 3. С. 12–15.
2. Бушулян О. В., Січкарь В. І. Нут: генетика, селекція, насінництво, технологія вирощування. Одеса, 2009. 248 с.
3. Векірчик К. М. Фізіологія рослин. Практикум. К.: Вища школа. Головне видавництво, 1984. 240 с.
4. Гедзур Т. І., Белчгазі В. Й., Вайда П. В. Аналіз сучасних методів навчання у процесі викладання біології в умовах війни в Україні / *Академічні Візії*. Вип. 17, 2023. С. 117-126. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/download/258/230/233> (дата звернення: 28.10.2025)

5. Горобчук А. Прибуткові бобові культури. Агробізнес сьогодні. 2018. № 17 (384). С. 72–76.
6. Григорюк І. П. Мусієнко М. М. Водний і високотемпературний стреси. Молекулярні та фізіологічні механізми стійкості рослин. *Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть*. Київ : Фітосоціоцентр, 2001. Т. 2. С. 118-129.
7. Дерев'янка А. С., Міронєць Л. П. Методика організації фенологічних спостережень з біології рослин / *Природничі науки*. 2018. Вип. 15. С. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1495426>.
8. Дідович С. В. Підвищення продуктивності нуту шляхом нітрагінізації насіння. *Научные труды КГАУ. Серия «С.-х. науки»*. Симферополь, 2005. Вып. 91. С. 25–31.
9. Дідович С. В. Формування та функціонування симбіозу *Mesorhizobium ciceri* – *Cicer arietinum* в агроценозах південного Степу України: автореф. дис. ... канд. с.-г. наук / Інститут сільськогосподарської мікробіології УААН, Чернігів, 2007с.
10. Дідович С. В., Толкачов М. З., Бутвіна О. Ю. Ефективність симбіотичної азотфіксації в агроценозах України. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2008. Вип. 8. С. 117–125с.
11. Кабак О. М. Ботанічний ужитковий експеримент як засіб навчання біології: методичні основи / О.М. Кабак. Київ : КДПУ, 2018. 160 с. URL: https://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/2792/1/Кабак_Ботанічний_ужитковий_експеримент.pdf (дата звернення: 28.10.2025).
12. Квітко Г. П., Михальчук Д. П., Карасевич В. В. Преспективи вирощування нуту посівного в умовах Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво : міжвід. темат. наук. зб.* 2013. Вип. 75. С. 113–120с.
13. Колесніков М. О., Кадиров Т. Р. Рекомендації по вирощуванню нуту в умовах півдня України. Мелітополь : ТДАТУ. 2022. 44 с.
14. Левашова В. М. Характеристика сучасних методів навчання біології / *Актуальні питання природничо-математичної освіти*. 2018. № 2(12). С. 92-100. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2643151>

15. Логоша, О. В., Воробей, Ю. О., Волкова, І. В., & Усманова, Т. О. (2021). Штам *Mesorhizobium ciceri* ND-64 - ефективний мікросимбіонт нуту сучасних сортів. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 32, 3-17с.
16. Логоша О. В., Воробей Ю. О., Усманова Т. О., Стрекалов В. М. Характеристика властивостей бульбочкових бактерій нуту, поширених в агроценозах Лісостепової та Степової зон України. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2019. Вип. 29. С. 21–28.
17. Мащенко Т. П., Ярошенко О. А., Якимчук Р. А. Водний статус і продуктивність озимої пшениці за дії посухи та саліцилової кислоти. *Фізіологія і біохімія культ. рослин*. 2009. Т. 41. № 5. С. 447-453.
18. Матяш Н. Ю., Коршевнік Т. В., Рибалко Л. М., Козленко О. Г. Навчання біології учнів основної школи: методичний посібник / Інститут педагогіки НАПН України. Київ, 2019. 120 с.
URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/718427/1/19-07%20%281%29.pdf> (дата звернення: 28.10.2025)
19. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика : [монографія] / [В. В. Волкогон, О. В. Надкернична, Т. М., Ковалевська, Л. М. Токмакова та ін.]; за ред. В.В. Волкогона. К. : Аграрна наука, 2006. 312 с.
20. Мороз І. В., Степанюк А. В. Загальна методика навчання біології : навч. посібник. Київ : Либідь, 2006. 590 с.
21. Мороз І. В., Степанюк А. В. Методика навчання біології : навч. посібник для студ. ВНЗ. Київ : КДПУ, 2018. 412 с.
URL: https://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/3035/1/посібник_Методика_навчання_біології.pdf (дата звернення: 28.10.2025).
22. Нікітченко Л. О. Організація навчального процесу на уроках біології з використанням біологічного експерименту / *Теорія та методика навчання природничих наук*. № 4 (2023). С. 118-129.
URL: <https://intranet.vspu.edu.ua/naturalscience/index.php/journal/article/download/30/24/31> (дата звернення: 28.10.2025).

23. Петриченко В. Ф. Актуальні проблеми кормовиробництва в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2010. № 10. С. 18–21.
24. Пида С. В., Чернік І. В., Москалюк Н. В., Мацюк О. Б., Гончар Ю. О. Вплив мікробних препаратів на показники водообміну листків нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.) // *Тернопільські біологічні читання – Ternopil Bioscience – 2023* : Тернопіль : Вектор, 2023. С. 73-76
25. Перерва В. В. Лабораторний практикум з фізіології та захисту рослин для студентів спеціальності 101 Екологія. Частина перша. Кривий Ріг: КДПУ, 2021. 50 с.
26. Побережна Л. В., Бахмат О. М. Особливості росту та розвитку сортів нуту звичайного залежно від внесення макро- й мікродобрих. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2022. № 37. С. 14-20
27. Скитський В. Ю., Герасимова Ю. І. Аналіз колекції нуту для використання на підвищення технологічності при вирощуванні. *Генетичні ресурси рослин*. 2010. № 8. С. 40–45.
28. Смага І. С., Черлінка В. Р., Дмитрук Ю. М. Землеробство. Фактори життя рослин і родючість ґрунту : навч. посібник. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2022, 128 с.
29. Стрес-протекторний вплив путресцину і сперміну на рослини пшениці за ґрунтової посухи / О. І. Кокорев, М. А. Шкляревський, М. В. Швиденко, Ю. Є. Колупаєв. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Сер. Біологія*. 2020. № 3 (51). С. 58-70.
30. Хоменко І., Косик О., Таран Н. Параметри водного обміну рослин салату посівного за дії іонів кадмію. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. Біологія*. Вип. 2 (76). 2018. С. 20-25.
31. Христова Т. Є., Пюрко О. Є. Питання водного режиму рослин у працях вітчизняних фітофізіологів: історично-функціональний аспект / *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Біологія, екологія*. 2007. Т. 15, Вип. 1. С. 73-82. URL: <https://ecology.dp.ua/index.php/ECO/article/view/372> (дата звернення: 28.10.2025).

32. Федорчук М.І. Фізіологія рослин: навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2021. 280 с.
URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/bitstream/123456789/10581/3/fiziologiya-roslin-z-osnovami-mikrobiologiyi.pdf> (дата звернення: 28.10.2025).
33. Шулдик В. І. Методика використання кімнатних рослин у навчально-виховному процесі. Запоріжжя : Запорізький держ. ун-т, 2010.
URL: https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/6789/683/1/schuldic_2010.pdf (дата звернення: 28.10.2025).
34. Analysis of pedagogical content knowledge in science teacher education: a systematic review 2011-2021” / *International Journal of Evaluation and Research in Education*. 2023. Vol. 12, No 1. P. 1-12.
URL: <https://ijere.iaescore.com/index.php/IJERE/article/download/28376/14082> (дата звернення: 28.10.2025).
35. Anderegg W. R. L. On the pivotal role of water potential to model plant physiological responses and water relations / *In Silico Plants*. 2022. Vol. 4, Iss. 1. Art. diab038. DOI: <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab038>.
36. Bessonova V. P., Sydorenko O. V., Shulha I. V. Водний обмін листя *Quercus robur* L. у протиерозійному контексті / *Екологія та ноосферологія*. 2016. Т. 27, № 1-2. С. 42-48.
URL: <https://ecology.dp.ua/index.php/ECO/article/view/11660> (дата звернення: 28.10.2025).
37. Brendel O. The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes / *Annals of Forest Science*. 2021. Vol. 78, Art. 47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01063-2>.
38. Chapoo S., Thathong K., Halim L. The development of teachers’ pedagogical content knowledge in teaching biology / *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*. 2018. Vol. 5, No 1. P. 133-140. DOI: <https://doi.org/10.18844/prosoc.v5i1.3395>.

39. Duarte K.T., et al. Plants and water: the search for a comprehensive understanding / *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 9486925. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.9486925>.
40. Jain J. A systematic review of pedagogical content knowledge for nature of science (PCK-NOS) and effective science teaching / *Asian Journal of University Education*. 2024. Vol. 20, No 2. P. 45-66. URL: <https://ajue.uitm.edu.my/wp-content/uploads/2024/02/10-Jasmine-Jain-A-systematic.pdf> (дата звернення: 28.10.2025).
41. Lawson T., Blatt M.R. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water-use efficiency / *Plant Physiology*. 2014. Vol. 164, No 4. P. 1556-1570. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.114.237107>.
42. Mapulanga T., Ameyaw Y., Nshogoza G. Integration of topic-specific pedagogical content knowledge components in secondary school science teachers' reflections on biology lessons / *Discover Education*. 2024. Vol. 3, Art. 17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00104-y>.
43. Pedagogical knowledge for active-learning instruction in large undergraduate biology courses" / *International Journal of STEM Education*. 2018. Vol. 5, Art. 44. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40594-018-0112-9>.
44. Peng Y., Zhou Y., Yu X. Water content of plant tissues: so simple that almost forgotten? / *Plants*. 2023. Vol. 12, No 6. Art. 1238. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12061238>.
45. Philip J.R. Plant water relations: some physical aspects / *Annual Review of Plant Physiology*. 1966. Vol. 17. P. 245-268. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.17.060166.001333>.
46. Schulze E. D., Robichaux R. H., Grace J. Plant water balance: in diverse habitats, where water often is scarce, plants display a variety of mechanisms for managing this essential resource / *BioScience*. 1987. Vol. 37, No 1. P. 30-38. DOI: <https://doi.org/10.2307/1310179>.
47. Stepanyuk A. V. Integrated use of LearningApps.org and information devices in secondary school biology classes: experiments in plant morphology, anatomy,

physiology topics / *Current Trends in Education & Science*. 2024. Vol. 6, No 1. P. 102-111. URL: <https://acnsci.org/journal/index.php/cte/article/view/693> (дата звернення: 28.10.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А

Зразок учнівської анкети до і після експерименту

Мета: з'ясувати динаміку уявлень і ставлення учнів до теми «водообмін рослин».

Анкета (10 запитань):

1. Як, на твою думку, вода потрапляє в рослину?
2. Що змушує воду рухатися вгору по стеблу?
3. Чи залежить швидкість випаровування від вологості повітря?
4. Що буде, якщо ґрунт стане солоним?

5. Чи однаково втрачають воду різні сорти нуту звичайного?
6. Де саме відбувається транспірація?
7. Що відбудеться з рослиною при тривалій спеці без поливу?
8. Як стан продихів впливає на водообмін?
9. Наскільки цікавою тобі здається ця тема (за шкалою 1-5)?
- 10.Що нового ти хотів(ла) би дізнатись про воду в рослинах?

Форма оцінювання:

- Вхідне опитування (до експерименту)
- Вихідне опитування (після експерименту)

Показники аналізу:

- % правильних наукових відповідей;
- зміна середнього балу інтересу;
- якісний зміст коментарів.

Результати (узагальнено):

- правильні пояснення зросли з 10 % до 68 %;
- інтерес (за шкалою 1-5) зріс із 3,2 до 4,6;
- 73 % учнів зазначили, що «тепер краще розуміють механізм руху води».