

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Сініцина Вікторія Вадимівна

УДК 633:631.547.15

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА
ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

11.00.09 – Метеорологія, кліматологія, агрометеорологія

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня
кандидата географічних наук

Науковий керівник
Польовий Анатолій Миколайович
доктор географічних наук,
професор

Одеса – 2014

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КУКУРУДЗИ ТА ВИМОГИ ДО УМОВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	10
1.1. Біологічні особливості та ботанічна характеристика кукурудзи.....	10
1.2. Вимоги кукурудзи до факторів навколишнього середовища.....	16
1.3. Вимоги кукурудзи до ґрунту і мінерального живлення.....	20
1.4. Хвороби кукурудзи та заходи боротьби з ними.....	23
1.5. Сорти та районування кукурудзи.....	25
Висновки до розділу 1.....	29
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ.....	30
2.1. Особливості процесу проростання та появи сходів зернових.....	30
2.2. Лабораторний експеримент з пророщування насіння.....	42
2.2.1. Методика проведення експерименту.....	42
2.2.2. Отримані результати спостережень.....	46
2.2.3. Узагальнення отриманих результатів лабораторного експерименту....	51
Висновки до розділу 2.....	52
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	54
3.1. Сучасний стан розробки моделей розвитку зернових культур на ранніх етапах онтогенезу.....	54
3.2. Модель формування сходів зернових культур.....	74
3.2.1. Концепція моделювання.....	74
3.2.2. Моделювання поглинання вологи насінням.....	79
3.2.3. Моделювання гідролізу запасів ендосперму та дихання насіння.....	80
3.2.4. Моделювання росту осьових органів та визначення повноти сходів...83	
Висновки до розділу 3.....	85

РОЗДІЛ 4. ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ТА ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ.....	87
4.1. Перевірка адекватності моделі.....	87
4.2. Оцінка чутливості моделі.....	94
4.2.1. Чутливість моделі до зміни початкових параметрів насіння.....	95
4.2.2. Чутливість моделі до зміни параметрів моделі.....	105
4.2.3. Узагальнена оцінка чутливості моделі.....	113
4.3. Деталізація (з погодинним кроком) вивчення чутливості процесу.....	114
Висновки до розділу 4.....	123
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ВПЛИВУ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СХОДІВ.....	126
5.1. Оцінка впливу температури ґрунту.....	127
5.2. Оцінка впливу вологості ґрунту.....	139
5.3. Оцінка впливу щільності ґрунту.....	146
5.4. Узагальнена оцінка чутливості моделі до зміни агрометеорологічних умов.....	156
5.5. Оцінка впливу різних комбінацій агрометеорологічних умов на проростання насіння та формування сходів.....	157
Висновки до розділу 5.....	162
РОЗДІЛ 6. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ ПОЯВИ ТА ПОВНОТИ СХОДІВ.....	165
6.1. Алгоритм визначення термінів появи та повноти сходів.....	165
6.2. Методика визначення термінів появи та повноти сходів.....	168
6.2.1. Підготовка даних.....	168
6.2.2. Розрахунок теплового та водного режиму.....	170
6.2.3. Розрахунок накопичення вологи насінням.....	171
6.2.4. Розрахунок гідролізу запасів ендосперму та затрат на дихання насіння.....	172
6.2.5. Розрахунок накопичення сухої маси та подовження колеоптиля.....	173
6.2.6. Визначення повноти сходів та вихідна інформація.....	176

6.3. Приклади розрахунків за методикою.....	179
Висновки до розділу 6.....	185
ВИСНОВКИ.....	186
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	190

ВСТУП

Актуальність теми. Рівень урожайності в значній мірі визначається умовами сформованих сходів. Розвиток від посіву до сходів є першим критичним періодом для рослин. Від того, за яких умов проходить цей період залежить весь подальший вегетаційний розвиток та формування врожаю. Математичний опис та моделювання процесу проростання насіння дає можливість отримання даних про строки появи сходів, оцінки якості та повноти сходів та їх прогнозування. В існуючих моделях типу «погода – врожай» період від посіву до сходів представлено як блок (або субмодель). Тому від адекватності результатів роботи даного блоку залежить точність прогнозування всього подальшого вегетаційного періоду.

Розробка математичного методу розрахунку і оцінки умов формування сходів, їх повноти і термінів утворення розширює можливості агрометеорологічного забезпечення сільського господарства, дозволяє прогнозувати стан розвитку культури і своєчасно приймати рішення щодо ведення господарства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є частиною кафедральної теми кафедри агрометеорології та агрометеорологічних прогнозів ОДЕКУ № 0113U008064 «Розробка методу оцінки агрометеорологічних умов формування продуктивності та прогнозу врожайності кукурудзи в Україні» та № 37016 «Розробка методу оцінки агрометеорологічних умов формування продуктивності та прогнозу врожайності озимої пшениці в Україні»; теми № 0111U000225 «Розробка методу оцінки агрометеорологічних умов формування продуктивності та прогнозу врожайності озимого ячменю в Україні»; теми МОН України № 0106U000493 «Оцінка впливу змін клімату на зерновий баланс України»; теми МОН України № 0113U000165 «Вразливість та адаптація галузей економіки України до змін клімату»; теми

МОН України № 0111U00593 «Оцінка впливу екстремальних атмосферних явищ на окремі галузі економіки України в умовах зміни клімату». Автор приймав участь у параметризації агроекологічної моделі продуктивності сільськогосподарських культур.

Мета і задачі дослідження. Оцінка впливу агрометеорологічних умов на формування сходів зернових культур (на прикладі кукурудзи) за допомогою моделювання розвитку зернових культур на ранніх етапах онтогенезу. Для досягнення поставленої цілі необхідно було вирішити наступні завдання:

- вивчити особливості проростання насіння за допомогою проведення лабораторного експерименту з пророщування кукурудзи;
- дослідити особливості проростання та формування сходів зернових культур;
- розробити модель формування сходів кукурудзи, використовуючи досягнутий рівень моделювання;
- вивчити вплив агрометеорологічних умов на проростання та формування сходів зернових культур;
- оцінити залежність темпів проростання насіння, появи та повноти сходів зернових культур від агрометеорологічних умов;
- розробити методику визначення тривалості термінів та повноти сходів зернових культур (на прикладі кукурудзи).

Об'єкт дослідження. Зернові культури у період від посіву до появи сходів.

Предмет дослідження. Особливості впливу агрометеорологічних умов на проростання зерна та формування сходів, часу їх появи і повноти.

Методи дослідження. Методи математичного моделювання продукційного процесу рослин на ранніх етапах онтогенезу, статистичний аналіз особливостей впливу агрометеорологічних умов на формування сходів зернових культур.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у комплексному вивченні та моделюванні процесів, що відбуваються у насінні під час проростання та формування сходів зернових культур (на прикладі кукурудзи) та оцінці впливу агрометеорологічних умов на накопичення вологи насінням та подовження колеоптиля.

Вперше:

- розроблено динамічну модель розвитку зернових культур у період «посів – сходи» (на прикладі кукурудзи);
- експериментально досліджено закономірності впливу волого-температурного режиму на накопичення вологи, протікання біохімічних процесів та запуск росту осьових органів насіння кукурудзи;
- встановлені закономірності залежності динаміки накопичення вологи насінням кукурудзи, його проростання від агрометеорологічних умов;
- встановлені закономірності впливу агрометеорологічних умов на формування повноти сходів кукурудзи;
- запропоновано методику визначення тривалості термінів та повноти сходів зернових культур (на прикладі кукурудзи).

Удосконалено: кількісний опис поглинання вологи насінням при проростанні та гідролізу запасів ендосперму при запуску росту осьових органів насіння.

Дістало подальший розвиток: методика оцінки умов формування сходів зернових культур.

Практична значимість одержаних результатів. Розроблено метод оцінки повноти сходів та оцінки стану посівів на момент появи сходів. Встановлені закономірності впливу агрометеорологічних умов на динаміку накопичення вологи насінням, проростання та формування сходів зернових культур можуть бути основою для оцінки умов формування сходів та довгострокової оцінки факторів формування урожайності. Використання

розробленої методики визначення дати появи масових сходів та оцінки їх повноти полегшить процедуру прийняття рішень при застосуванні агротехніки вирощування зернових культур, а також розроблена методика може бути використана при оптимізації структури посівних площ кукурудзи та зернових культур в цілому, спрямованої на отримання високих і стійких урожаїв цих культур.

Особистий внесок здобувача. Розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур (на прикладі кукурудзи), на основі досягнутого рівня моделювання. Виконана ідентифікація параметрів моделі. Встановлено закономірності впливу агрометеорологічних умов на формування сходів зернових культур та їх повноти. Виконана оцінка залежності динаміки накопичення вологи насінням, його проростання та повноти сходів зернових культур від агрометеорологічних умов. Запропонована методика визначення тривалості періоду «посів – сходи» та повноти сходів кукурудзи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на Науковій конференції молодих вчених ОДЕКУ (м. Одеса, 2012 р.); Науковій конференції молодих вчених ОДЕКУ (м. Одеса, 2013 р.); Міжнародній науковій конференції Сахаровські читання: екологічні проблеми ХХІ сторіччя (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 17 – 18 травня 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Роль меліорації та водного господарства у забезпеченні сталого розвитку землеробства» (м. Київ, 5 грудня 2012); Міжнародній конференції «Молодь у вирішенні екологічних та соціально-економічних проблем сьогодення» (м. Одеса, 10 – 15 червня 2013 р.); Міжнародній конференції «Цілі збалансованого розвитку для України» (м. Київ, 18 – 19 червня 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Актуальні питання сучасної аграрної науки» (м. Умань, 14 – 15 листопада 2013 р.); Наукових семінарах кафедри агрометеорології та агрометпрогнозів ОДЕКУ (м. Одеса, 2012 – 2013 рр.).

Публікації. Результати дослідження за тематикою дисертаційної роботи опубліковані в шести наукових працях, у журналах ВАК: «Вісник ОДЕКУ» (2 статті), «Вчені записки ТНУ» (2 статті), у зарубіжних виданнях: «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» (1 стаття) (у співавторстві), «Agricultural Sciences» (1 стаття) (у співавторстві).

Структура і обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел. Дисертацію викладено на 202 сторінках, вона містить 30 таблиць та 58 рисунків. До списку використаних джерел входить 130 найменувань.

РОЗДІЛ 1

БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КУКУРУДЗИ ТА ВИМОГИ ДО УМОВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

1.1. Біологічні особливості кукурудзи та ботанічна характеристика кукурудзи

Насіння кукурудзи починає проростати при температурі близько 8°C. Однак при такій температурі проростання йде дуже повільно, проростки загнивають і посіви зріджуються. Ю.І. Чирковим встановлено, що при запасах продуктивної вологи більше 15 мм у шарі ґрунту 0 – 10 см і температурі 11 – 12°C сходи кукурудзи з'являються через 20 – 25 днів, а при 18 – 22°C – через 6 – 8 днів. При закладанні насіння на глибину 4 см сходи кукурудзи з'являються при накопиченні суми ефективних температур 83°C (вище 8°C). Ця сума ефективних температур збільшується на 7°C на кожен сантиметр поглиблення при посіві насіння на глибину від 4 до 12 см. При запасах продуктивної вологи менше 8 мм у шарі ґрунту 0 – 10 см тривалість періоду від посіву до сходів майже подвоюється, відповідно зростає і необхідна сума ефективних температур. Весняні заморозки до 2 – 3°C ушкоджують сходи. На тривалість періоду від посіву до сходів сортові розходження помітного впливу не чинять [111].

Рівень температури визначає терміни появи чергових листків кукурудзи, а розходження в тривалості періоду утворення листків між ранньостиглими і пізньостиглими сортами досягає 20 – 30 днів. За даними Ю.І. Чиркова, нижня межа температури в період утворення листків близька до 10°C. З підвищенням середньої добової температури повітря від 10 до 20°C швидкість утворення листків й інтенсивність нагромадження рослинної

маси збільшується. З підвищенням температури вище 20°C темпи розвитку рослин починають зменшуватися, а при середній добовій температурі вище 26 – 28°C розвиток кукурудзи не прискорюється. У цих випадках зростає значення баластових, які не прискорюють розвиток рослин, температур. При температурах 33 – 36°C приріст зеленої маси кукурудзи припиняється.

Черговий листок кукурудзи з'являється при накопиченні суми ефективних температур 30°C (вище 10°C). У південних районах для появи нового листка потрібна більша сума ефективних температур, тому що в спекотні дні кукурудза використовує тепло менш ефективно через баластові температури. Ранньостиглі сорти кукурудзи утворюють 11–12 листків і тому потребують менше тепла, ніж пізньостиглі, які утворюють 19 – 21 листок.

Вологість ґрунту істотно впливає на накопичення рослинної маси, але на швидкість розвитку рослин вона має слабкий вплив. Помітне гальмування швидкості розвитку відзначається тільки при зменшенні запасів продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту нижче 40 мм. Подальше зменшення запасів вологи у ґрунті затримує викидання волоті кукурудзи на 4 – 6 днів.

Оптимальні умови для формування врожаю зеленої маси кукурудзи створюються при середній декадній температурі повітря 20 – 24°C і запасах продуктивної вологи 35 – 45 мм в орному шарі підзолистих ґрунтів і 60 – 70 мм – у півметровому шарі чорноземних ґрунтів.

Завдяки низькому транспіраційному коефіцієнту (280 – 350) кукурудза ощадливо використовує ґрунтову вологу на формування врожаю. Однак сумарні витрати її за окремі міжфазні періоди та вегетаційний період в цілому значна в зв'язку з великою масою врожаю.

При оптимальному зволоженні середньодобові величини сумарного випаровування за окремі міжфазні періоди становлять:

- 1) сходи – 8-й листок – 1,0 – 3,3 мм;
- 2) 7 – 8-й листок – 15-16-й листок – 2,5 – 4,9 мм;
- 3) 15 – 16-й листок – цвітіння волоті – 4,9 – 7,3 мм;

- 4) цвітіння волоті – формування зерна – 4,3 – 7,4 мм;
- 5) формування зерна – молочно-воскова стиглість – 3,1 – 6,1 мм;
- 6) молочно-воскова стиглість – повна стиглість – 1,2 – 3,6 мм.

Встановлено, що сумарне водоспоживання кукурудзи за вегетацію в незрошуваних умовах досягає 300 – 400 мм, а при зрошенні – 450 – 500 мм.

Критичний до вологи період у кукурудзи починається за 10 днів до викидання волоті і триває близько 30 днів. Недостача вологи в цей період різко знижує врожай [45].

Після викидання волоті вплив сортових особливостей на швидкість розвитку кукурудзи проявляється менше, ніж у період утворення листків. При підвищенні температури повітря вдень до 30 – 35°C, низькій відносній вологості і запасах продуктивної вологи менше 20 – 30 мм у шарі ґрунту 0 – 50 см в період після викидання волоті значно знижується кількість зерен у качані.

Найбільш сприятливі умови для наливу зерна складаються при середній добовій температурі повітря від 20 до 24°C і запасах продуктивної вологи 60 – 70 мм і більше у півметровому шарі ґрунту. Осінні заморозки 2–3°C пошкоджують листки, а качани в період молочно-воскової стиглості можуть переносити заморозки до 4 – 5°C.

Тривалість вегетаційного періоду кукурудзи в залежності від сорту й агрометеорологічних умов коливається від 90 до 160 днів. Кукурудза є світлолюбною рослиною і вимагає інтенсивного сонячного освітлення. Дуже висока щільність посівів призводить до зниження врожаю зерна. Найбільші врожаї зерна кукурудзи спостерігаються при листовій поверхні 30 – 35 тис. м²/га.

Кукурудза належить до порівняно засухостійких культур, на утворення одиниці сухої речовини вона споживає менше води, ніж ярі зернові культури. Однак на одиницю площі кукурудза вимагає вологи більше, ніж інші зернові культури, у зв'язку з її більш високими врожаями.

Кукурудза дуже чутлива на зрошення. Якщо вологість ґрунту під час

росту і розвитку кукурудзи підтримується на рівні 70 – 80% найменшої вологоємності, то врожай зерна в степовій зоні збільшуються в 3 – 3,5 рази в порівнянні з посівами, що знаходяться в умовах природного зволоження [73].

Кукурудза – однорічна рослина. Від більшої частини оброблюваних хлібних злаків вона відрізняється потужним розвитком, низкою морфологічних і фізіологічних ознак. Стебло пряmostояче, округле, гладке, з потовщеними вузлами, із заповненою серцевиною. Серцевина представляє собою пухку паренхімну тканину, багату на воду і живильні речовини. Від основи до верхівки діаметр міжвузлів зменшується, а довжина їх збільшується; 3 – 5 зближених міжвузлів знаходяться в ґрунті. Міжвузля на стороні, що звернена до листя, зазвичай мають чітко виражену поздовжню борозенку. Утворення таких борозенок пов'язують з тим, що пазушні бруньки розвиваються рано, бувають великими і як би видавлюють ці борозенки під час росту міжвузля.

Висота стебла залежно від сорту (форми) змінюється від 0,5 до 3 м, у деяких пізньостиглих південних форм стебло досягає висоти 5 – 6 м. Стебло здатне до галуження.

Листя великі, лінійні, цілюнокройні, зверху опушені, розташовані по черзі на протилежних сторонах стебла. Піхви листків щільно огортають серцевину. Площа листя на одній рослині досягає 1 – 2 м² і більше. Іноді листова поверхня збільшується завдяки облистяності ніжок качанів, а також утворення листових пластинок на обгортках качанів та розвитку бічних пагонів (пасинків) з пазушних бруньок нижніх міжвузлів стебла.

Рослина однодомна, роздільностатева, перехресноопилююча. Чоловіче суцвіття – волоть. Воно покриває верхівку стебла, продукує до 20 – 30 млн. пилкових зерен. Суцвіття складається з центральної осі, яка є продовженням верхнього міжвузля та бічних осей [111].

Колоски волоті двоквіткові, з трьома пильовиками в кожній квітці; одна квітка на ніжці, інші сидячі, з двома тонкими квітковими лусками і двома біляквітковими плівками.

Жіноче суцвіття – качан, формується в пазухах листків. Колоски качана закладаються уздовж осі суцвіття попарно. У кожному колоску закладається по дві квітки, з яких розвивається тільки одна, верхня квітка, а нижня незабаром атрофується. На качані зазвичай буває парне число поздовжніх рядів квіток, а потім зерен – від 8 до 16, частіше всього 12 – 14 рядків. У окремих сортів число рядків зерен у качані може досягати 18 – 20, а іноді 28 – 30. Під час цвітіння маточки виходять за межі обгортки. На качані закладається до 500 – 1000 насінних зачатків.

Плід – зернівка, зазвичай гола, велика. Зернівка кукурудзи, так само як і інших хлібних злаків, являє собою одно сім'яний плід, але значно відрізняється за зовнішнім виглядом, формою, розмірами, будовою та хімічним складом. Вага 1000 насінин у дрібнонасінневих сортів дорівнює 100 – 150 г, у крупнонасінневих, найбільш поширених сортів, 300 – 400 г (у пшениці – 18 – 40 г).

Залежно від групи і сорту (гібрида) зернівки кукурудзи мають різне забарвлення – біле, кремове, жовте, помаранчеве, червоне. Сорти з кольоровим зерном більш цінні в кормовому відношенні, оскільки містять більше каротиноїдів.

Зерно кукурудзи містить в середньому (у %): води – 11 – 14; крохмалю – 56 – 61; протеїну – 8,8 – 9,6; масла – 4,2 – 4,8; клітковини – 2,0 – 2,8; гідролізованої клітковини – 9,8 – 11,7; золи – 1,3 – 1,6. Зернівка кукурудзи складається з трьох основних частин: оболонки, ендосперму і зародка.

Оболонка представляє два зрощені шари – плодову і насінневу оболонки, її вага становить 6 – 8% від загальної ваги зерна. Як відомо, плодова оболонка (перікарпій) утворюється із стінок зав'язі, а насіннева – зі стінок насінневої бруньки. Слід зазначити, що у багатьох форм кукурудзи насіннева оболонка частково або повністю редукується і в останньому випадку оболонка зернівки представлена лише перикарпієм.

Ендосперм, як і у насінні інших рослин, представляє собою вмістилище запасних поживних речовин, які мобілізуються при проростанні насіння.

Ендосперм утворюється після запліднення вторинного ядра зародкового мішка одним з спермійв. Швидко розростаючись, він займає більшу частину зернівки і становить 80 – 85% від її ваги. Як вже зазначалося, морфологія ендосперму дуже різноманітна і є систематичною ознакою при класифікації кукурудзи.

У периферичній частині ендосперму розташований алеїроновий шар, що складається з одного ряду клітин, щільно прилягаючих до внутрішнього шару оболонки. У клітинах міститься велика кількість білка у вигляді дрібних алеїронових зерен, а у деяких форм і масла; крохмаль у них відсутній. Алеїроновий шар є джерелом ауксинів, ферментів та інших речовин, що відіграють важливу роль в мобілізації запасних поживних речовин ендосперму при проростанні насіння. Центральна частина ендосперму складається з однорідних великих клітин, заповнених крохмалем. Периферичні клітини ендосперму більш витягнуті.

Зародок, що виникає в результаті запліднення яйцеклітини, у кукурудзи великий, на його частку припадає 10 – 14% від ваги зернівки (у пшениці близько 2%). Його добре видно неозброєним оком, він розташований біля основи зернівки і поглиблюється в ендосперм. Зародок складається з щитка, бруньки та корінця.

Щиток (видозмінена сім'ядоля у злакових) випуклою стороною звернений до ендосперму, а увігнутою – охоплює бруньку і корінець, які прикріплені до нього в стебловій частині. Щиток складається з досить великих паренхімних клітин, що включають білки, крохмаль і жири. При проростанні насіння запасні поживні речовини щитка в першу чергу перетворюються на водорозчинні поживні речовини. Надалі щиток грає важливу роль у мобілізації запасних поживних речовин ендосперму і живленні зростаючого зародка. Брунька занурена в масивне тіло щитка і складається з конуса зростання та 5 – 7 зародкових листочків, вкритих колеоптилем. В одній площині з брунькою лежать зародкові корінці – головний, більш розвинений і два бокові.

Зародок кукурудзи багатий зольними елементами (80% від загального їх вмісту в зернівці), білками (22%) і жирами (80 – 84%). Качан закладається на верхівці бокового пагона з дуже вкороченими міжвузлями і видозміненим листям, яке щільно облягає качан, утворюючи так звану обгортку. Корінь мочкуватий, добре розвинений.

1.2. Вимоги кукурудзи до факторів навколишнього середовища

Температура має значний вплив на розвиток кукурудзи на всіх стадіях розвитку. Цей вплив починає проявлятися вже з моменту проростання насіння. Для проростання насіння кукурудзи температура ґрунту повинна бути близькою 10 – 12°C; можливе проростання насіння і при 6°C.

В умовах тривалої дії низької температури паростки пізно пробиваються на поверхню ґрунту, легко пошкоджуються грибковими захворюваннями, ослаблені, гинуть або, в кращому випадку, погано ростуть і розвиваються. Слід враховувати несприятливу дію зниженої температури на вихід насіння і на стійкість до грибкових захворювань. При глибокому закладанні насіння та посіві в прогрітий ґрунт негативний вплив зниженої температури ґрунту посилюється. Час появи сходів кукурудзи залежить не тільки від температури ґрунту, але і від температури повітря. Чим вище середньодобова температура повітря, тим менша тривалість періоду від появи сходів до викидання волоті і цвітіння.

Для періоду від появи сходів до викидання волоті оптимальною температурою буде 18 – 20°C; для періоду викидання волоті і цвітіння 20 – 22°C, для періоду дозрівання оптимальна температура дорівнює 22 – 23°C.

Встановлено наявність так званих біологічних мінімумів температури, нижче яких не проходять ті чи інші фази розвитку кукурудзи. Такими мінімумами є: для проростання насіння 8°C; для появи сходів і формування

вегетативних органів – 10°C ; для формування генеративних органів і цвітіння – 12°C ; для дозрівання – 10°C .

В порівнянні з іншими сільськогосподарськими рослинами кукурудза більш теплолюбна культура. Так, сума температур, необхідна для розвитку конопель, знаходиться в межах від 2600 до 2900°C , для ячменю – від 1700 до 2500°C , ярої пшениці – від 1880 до 2275°C , сочевиці – від 1500 до 1800°C , кукурудзи – від 2500 до 3000°C . При середньодобовій температурі нижче 15°C і вище 25°C , а також при короткому дні або при нестачі поживних речовин і води процеси росту значно сповільнюються. При високій температурі врожай вегетативної маси значно знижується, а врожай зерна знижується набагато менше.

Оптимальна температура ґрунту для росту коренів кукурудзи – 24°C , для росту надземних органів на ранніх етапах – 20°C , на більш пізніх – близько 28°C . Квітки найкраще формуються при температурі ґрунту $28 - 32^{\circ}\text{C}$. Якщо в період вегетації температура ґрунту не досягає 16°C , середньостиглі та пізньостиглі сорти кукурудзи навіть не зацвітають [11,12].

Кукурудза не належить до ксерофільних або посухостійких культур. За вегетаційний період вона споживає величезну кількість води. Оптимальним вважається 260 – 300 мм опадів за вегетаційний період, основну масу яких рослини мають отримати до вкладання волоті. При оптимальному водопостачанні добре розвинена рослина кукурудзи може випарувати за день близько 4 л води, що при загальноприйнятій середній густині стояння рослин на 1 га, що дорівнює приблизно 40 000, складає 160 000 л.

Великий теоретичний і практичний інтерес представляє питання про мінімальну кількість ґрунтової вологи, при якій ще можливе поглинання води рослиною і її зростання. Рослини кукурудзи перестають рости, якщо процентний вміст вологи в ґрунті нижче 9,5. Вміст вологи, при якому спостерігалось в'янення рослини, дорівнює 6,7%. Отже, за наявності в ґрунті 3% доступної вологи зростання кукурудзи припиняється, причому особливо помітно знижується швидкість росту листя.

Поглинання води кукурудзою відбувається швидше з ґрунту, що знаходяться в безпосередній близькості від рослини, і у зв'язку з чим ці ділянки ґрунту швидше висушуються; більш далекі ділянки висушуються повільніше. На добре проникному і дренажному ґрунті кукурудза може використовувати вологу, що знаходиться на глибині 150 см і більше.

Ефективність опадів, як основного джерела вологи в ґрунті залежить від того, в який період року вони випали; адже саме цим визначається – чи отримали рослини необхідну кількість води в найбільш відповідальні періоди їхнього життя. Дуже різко знижується врожай кукурудзи за відсутності опадів у червні та на початку липня, коли кукурудза починає інтенсивно рости. Ідеальними умовами червня вважають такі, коли кількість опадів випадає в межах 50 – 100 мм, а температура тримається на рівні 21 – 22°C.

Велика залежність врожаю кукурудзи від глибини залягання ґрунтових вод. Ріст і розвиток кореневої системи рослини, її аерація і температурний режим в значній мірі залежать від глибини залягання ґрунтових вод. На досвіді обробітку кукурудзи на торф'яно-болотних ґрунтах Білорусії підтверджується наявність прямої кореляції між врожаєм і глибиною залягання ґрунтових вод. Висів кукурудзи на ґрунтах з високим рівнем ґрунтових вод мало або зовсім недоцільний [18, 109].

Для більшості районів вирощування кукурудзи необхідно вживати заходів, щодо забезпечення накопичення вологи в ґрунті. А саме: 1) раннє глибоке зяблювання, 2) снігозатримання (особливо в районах з малою кількістю весняно-літніх опадів), 3) правильний догляд, зокрема, систематична міжрядна обробка посівів.

Одночасно найважливішим чинником більш економного використання води є мінеральне живлення. У районах з посушливим кліматом посіви кукурудзи забезпечуються водою за допомогою зрошення [111].

Навіть серед рослин, що засвоюють велику кількість світлової енергії, кукурудзі належить одне з перших місць. Цьому сприяє потужний розвиток асиміляційного листового апарату, що нерідко перевищує площу посіву в 3 –

5 разів, а в умовах поливного землеробства навіть більше.

Загальновизнано, що листя – це важливі органи рослин, за допомогою яких вони вловлюють енергію сонця, посилюють виділення вуглекислого газу і здійснюють вуглецеве харчування, також процес транспірації. Розвиток листя відбувається відповідно до стану зовнішнього середовища, з його продуктивними можливостями.

Існує оптимальне співвідношення між розвитком листкової поверхні рослин, світловим режимом і продуктивністю рослин у посівах. Численні спостереження за кукурудзою і багатьма іншими рослинами дозволяють зробити висновок про те, що за сприятливих умов водопостачання та ґрунтового живлення оптимальною є площа листя 40 – 50 тис. м² / га. За умов найбільш сприятливого світлового режиму відмічається й найбільш висока продуктивність рослин. При подальшому збільшенні листкової поверхні або згущенні посівів (а ці показники, як правило, взаємопов'язані) значно погіршується світловий режим, особливо середніх і нижніх листків; це знижує їх продуктивність, а в кінцевому рахунку і врожай.

Беручи до уваги цю загальну закономірність, не можна, однак, забувати, що використання світлової енергії є процесом, що залежать від багатьох складових: структури площі живлення кожної рослини, напрямків рядів рослин відносно сторін світу, розмірів рослин, їх скоростиглості та багатьох інших. Необхідно пам'ятати також, що деяка затіненість середніх і нижніх листків, яка знижує інтенсивність світлового потоку, що падає на них, в деякій мірі покращує використання листям кожної одиниці світлової енергії; це сприятливо відображується на загальній продуктивності посіву.

У зв'язку із зазначеним очевидно, що створення найбільш сприятливого світлового режиму в посівах кукурудзи може бути досягнуто тільки при творчому підході до вирішення таких агротехнічних проблем, як густоти стояння рослин, рівню ґрунтового живлення і зволоження, вибору сорту чи гібриду і т. д..

Найбільш поширеним є квадратно-гніздовий спосіб сівби з відстанню

між рядами і між гніздами в рядах 70 см (70x70). Таке розміщення диктується турботою про найбільш сприятливі для кукурудзи умови зростання, а також про найбільш вигідні умови використання машинної техніки для обробки міжряддя у двох напрямках [66].

Залежно від кліматичних умов району та якості ґрунтів в гнізді залишається 1 – 3 рослини. На підставі численних спостережень була запропонована в якості оптимальної для різних районів наступна густота стояння рослин на 1 га: південний степ – 20 – 25 тис.; північний степ – 30 – 35 тис.; південний лісостеп – 35 – 40 тис.; північний лісостеп та Полісся 40 – 55 тис. Визначення оптимальної густоти стояння рослин кукурудзи та створення тим самим тих чи інших умов освітлення є важливим у теоретичному відношенні і заслуговує серйозної уваги фізіологів рослин і практичних працівників сільського господарства.

Значення світла, як найважливішого екологічного чинника не обмежується тільки його участю у фотосинтезі і тим самим у створенні врожаю рослин. Від світлового режиму залежить процес розвитку кукурудзи, що має істотне значення для селекційної практики та створення сортів, найбільш адаптованих до конкретних умов середовища.

1.3. Вимоги кукурудзи до ґрунту і мінерального живлення

Фізичні та хімічні властивості ґрунту, його щільність, водно-повітряний режим мають значний вплив на формування і функціонування кореневої системи, а отже, і на продуктивність рослин.

Кукурудза дає високі врожаї на пухких добре водопроникних, але водночас вологоємких ґрунтах. Сприятливі для обробітку кукурудзи ґрунти містять великий запас вологи і в той же час вони добре аеровані, в них містяться легко доступні для рослин поживні речовини. Такими

властивостями володіють середні за механічним складом (середні і легкі суглинки), багаті органічною речовиною ґрунти (чорноземи, каштанові та їх аналоги).

Важкі за гранулометричним складом ґрунти, та ті, що легко ущільнюються ґрунти, так само, як засолені і перезволожені у зв'язку з близьким заляганням ґрунтових вод, і ґрунти з підвищеною кислотністю менш придатні для обробітку кукурудзи. Щоб отримувати на таких ґрунтах високі стійкі врожаї зерна і зеленої маси, необхідна систематична робота з покращення цих ґрунтів.

Основним недоліком щільних, важких ґрунтів є те, що вони погано аеруються, і це викликає пригнічення кореневої системи кукурудзи, а також корисних ґрунтових мікроорганізмів. На таких ґрунтах коренева система розповсюджується в поверхневому шарі, що краще аерується, рослини використовують невеликий його обсяг і, отже, лише незначну частину запасів вологи і поживних речовин. Треба також мати на увазі, що освітлення щільної кірки на поверхні ґрунту різко негативно позначається на польовій схожості насіння.

Легкі за гранулометричним складом малогумусні ґрунти відрізняються гарною аерацією, але вони недостатньо вологоємкі і тому потребують збагачення органічною речовиною шляхом внесення гною, компостів і вирощування сидератів.

У тісному зв'язку з аерацією ґрунту знаходиться питання про залягання ґрунтових вод. Високі врожаї кукурудзи можна отримувати тільки на ділянках із заляганням ґрунтових вод не менше 150 – 200 см від поверхні ґрунту. При заляганні ґрунтових вод на такій глибині самий нижній кореневмісний шар ґрунту постійно підпитується водою, тоді як основна маса коренів добре аерується, і це створює сприятливі умови для діяльності коренів. При близькому від поверхні ґрунту заляганні ґрунтових вод їх рівень у період дощів може значно підвищуватися, і тоді велика частина коренів потрапляє в анаеробні умови, їх діяльність порушується, що веде до

зниження врожаю. На ділянках з близьким заляганням ґрунтових вод необхідно здійснювати дренаж.

Як вже зазначалося, кукурудза розвивається найкраще при реакції ґрунтового розчину, близької до нейтральної (рН 6,5 – 7,0). При значенні рН менше 5 рослини погано ростуть, сповільнюється їх розвиток, знижується продуктивність.

Кукурудза погано переносить засолені ґрунти, особливо в посушливі роки, коли концентрація ґрунтового розчину значно підвищується [4]. Слід уникати солонців, однак вміле гіпсування може зробити їх придатними для вирощування кукурудзи. Перевагу слід віддавати солонцюватим ґрунтам з більш глибоким орним шаром (не менше 18 – 20 см).

У комплексі агротехнічних умов, що забезпечують отримання високого врожаю кукурудзи, важливе значення мають мінеральні добрива. Створюючи протягом життєдіяльності велику органічну масу, кукурудза виносить з ґрунту багато мінеральних поживних речовин: при врожаї 150 ц сухої надземної маси рослини відчужують з одного гектара 160 кг азоту, 45 кг фосфору, 125 кг калію. Цей винос повинен бути заповнений внесенням в ґрунт органічних і мінеральних добрив.

Кукурудза, так само як і інші рослини, нерівномірно споживає поживні речовини з ґрунту протягом вегетації. Поглинання основних елементів живлення – азоту, фосфору і калію – йде по одноверхівковій кривій і загалом відповідає ходу накопичення сухої речовини. Однак при детальнішому розгляді виявляється, що є характерні риси у надходженні в рослину окремих елементів живлення. Різна швидкість надходження в рослини азоту, фосфору і калію спостерігається вже на самих ранніх етапах вегетації.

У зв'язку з нерівномірним поглинанням елементів мінерального живлення співвідношення між ними в рослині протягом вегетації постійно змінюється. Властивість рослин поглинати великі кількості елементів живлення на початку вегетації є важливою властивістю пристосування, що гарантує нормальну вегетацію рослин в майбутньому в умовах можливої

нестачі того чи іншого елемента кореневого живлення на більш пізніх етапах вегетації. У першу чергу це відноситься до азоту. Вміст у ґрунті азоту в засвоєній для рослин формі (головним чином нітрати) зазвичай сильно коливається протягом вегетаційного сезону в залежності від погодних умов. Запасшись до настання несприятливих умов надлишком азоту, рослини можуть достатньо довго вегетувати, не виявляючи ознак азотного голодування [21].

Іншою важливою властивістю пристосування, є здатність рослини використовувати елементи живлення, накопичені у вегетативних органах для формування та наливу зерна.

1.4. Хвороби кукурудзи та заходи боротьби з ними

Кукурудза уражується різними захворюваннями, частину з яких викликають фітопатогенні гриби – таких більшість, а частину – бактерії і віруси. Крім того, кукурудзі властиві фізіологічні захворювання, пов'язані з відхиленням в живленні і несприятливими умовами зовнішнього середовища.

Розповсюдження хвороб і інтенсивність пошкодження ними рослин кукурудзи залежать від багатьох причин, в тому числі від наявності збудників хвороби та їх активності, а також від поєднання чинників зовнішнього середовища. Шкода, заподіяна хворобами, дуже відчутна, іноді втрати досягають 20% загального врожаю.

У різні періоди життя кукурудза уражається різними паразитами. Так, під час проростання і в ранній період росту її вражають гриби роду *Rhizium*, які викликають загнивання насіння і вражають коріння. Особливо патогенні ці гриби при зниженій температурі ґрунту. До хвороб, що вражають насіння, відносяться також хвороби, що викликаються різними видами грибів з роду *Fusarium*. Мезокотиль вражається грибом *Diplodia Zeae*, а проростки –

грибами з роду *Penicillium*. При ураженні грибом *Penicillium oxalicum* спостерігається пожовтіння листя, в'янення і засихання сходів. Найсильніше ця хвороба вражає рослини в умовах посушливої теплої погоди або при надлишку азотних добрив.

До захворювань пізнішого періоду вегетації кукурудзи відноситься пухирчаста сажка, збудником якої є гриби з роду *Ustilago*. Ця хвороба поширена у всіх районах обробітку кукурудзи. Втрати врожаю при ураженні пухирчастою сажкою можуть досягати 25%, а кількість вцілілих рослин іноді становить 30%.

При захворюванні пухирчастою сажкою відбуваються значні морфологічні зміни вражених органів – утворюються галли, пухлини або здуття. Виникнення галлів і пухлин відбувається за рахунок патологічно активного ділення клітин рослини-хазяїна.

В уражених пухирчастою сажкою рослин відзначаються серйозні фізіолого-біохімічні зміни. Посилюється дихання, особливо в тканинах, в яких утворилися галли. За відсутності галлів в тканинах хворих рослин підвищення інтенсивності дихання не відзначається, іноді вона дещо знижена.

Серйозні ураження кукурудзи викликає гриб *Sorogonium* з того ж роду *Ustilago*, що є причиною захворювання, яке отримало назву курна сажка. Ця хвороба припадає на період цвітіння та дозрівання. Вона проявляється в тому, що весь качан перетворюється на чорну суху масу спор. Волоть уражаються не повністю. Уражені рослини виявляються повністю безплідними [104].

Дуже небезпечним і поширеним захворюванням кукурудзи є диплодіоз, що викликається грибом *Diplodia zeae*. Виявляється хвороба у трухлявості качана, загниванні і трухлявості стебел і коренів та у ряді інших ознак.

Крім зазначених зустрічаються такі хвороби, як нігроспороз, що викликається, грибом *Nigrospora oryzae*, антракноз, збудником якого є гриб *Colletotrichum grominicum*, гниль стебел і коренів, ризоктоніоз стебел.

Всього грибних захворювань кукурудзи відомо близько 30, а крім того, більше 10 хвороб вірусного та бактеріального походження. Необхідно також зважати на групу хвороб листя, серед яких на першому місці знаходиться іржа (звичайна, південна і тропічна), північний гельмінтоспоріоз, плямистість листя, південний гельмінтоспоріоз. До хвороб зерна відноситься фузаріоз зерна, чорна гниль, пліснявіння зерна та ін..

Крім зазначених існує ще група не паразитарних захворювань. До них відносяться хвороби, викликані недоліком або надлишком поживних речовин. Багато хвороб виникають у кукурудзи при нестачі або надлишку мікроелементів. По всьому світу поширені вірусні хвороби кукурудзи, зокрема волосистість кукурудзи, переносником вірусу смугастості є цикадка *Calligyrona pellucida*.

Велика група захворювань кукурудзи викликається бактеріями. До бактеріальних хвороб кукурудзи відноситься бактеріальне в'янення, бактеріальна гниль стебел, бактеріоз листя і стебел, бура бактеріальна плямистість листя. Всі вони відрізняються специфічними особливостями і боротьба з ними вимагає дотримання агротехнічних рекомендацій і посилення селекційних робіт.

1.5. Сорти та районування кукурудзи

Широкий ареал розповсюдження кукурудзи в Україні вимагає створення великого набору гібридів, різних за скоростиглістю та добре адаптованих до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Використання кукурудзи для різноманітних господарських цілей та специфічні умови в зонах її виробництва визначають направлення селекційного процесу [5].

В Реєстр сортів рослин України лише на 2001 р. було внесено 246 гібридів різних груп стиглості та призначення, зокрема 42 ранньостиглих,

114 середньоранніх, 46 середньостиглих, 44 середньопізніх, з них 144 гібриди селекції дальнього та ближнього зарубіжжя.

Далі наведемо характеристики деяких нових сортів кукурудзи, внесених у Реєстр сортів рослин України.

Дніпропетровський 187 МВ. Трирічний. Ранньостиглий. Створений в Інституті зернового господарства. Зерно зубовидне, жовте. Маса 1000 зерен 230 – 245 г. Висота рослин 210 – 220 см. Стійкість до полягання та ураження хворобами, чутливість до добрива висока. Рекомендовано вирощувати на зерно у степовій та лісостеповій зоні. За врожайністю зерна перевищує стандарти на 5 – 7 ц/га.

Расава 200 СВ. Подвійний гібрид. Ранньостиглий. Виведений ЗАТ «Расава». Висота рослин 208 – 215 см. Зерно кремнисто-зубовидне, жовтого кольору. Вихід зерна 75%. Маса 1000 зерен 270 – 310 г. Вегетаційний період від висіву до повної стиглості у степовій зоні 109 днів, лісостеповій – 121, Поліссі – 127 днів. Посухостійкість хороша. Стійкість до полягання. Хворобами уражається слабо. Максимальна врожайність у Лісостепу – 100,8 ц/га, у Поліссі – 99,3 ц/га.

Титан 220 СВ. Трирічний модифікований. Середньоранній. Виведений Інститутом фізіології рослин та генетики НАН України та Черкаською державною сільськогосподарською дослідною станцією УААН. Зерно кремнисто-зубовидне, жовте. Маса 1000 зерен 280 – 320 г. Висота рослин 215 – 230 см. Посухостійкість добра, стійкий до полягання. Слабко вражається хворобами та шкідниками. Рекомендовано вирощувати у всіх зонах України. Високоврожайний – 80 – 87 ц/га зерна, що перевищує стандарт на 5 – 7 ц/га.

Еліта. Простий середньоранній гібрид. Створений фірмою Піонер (США). Зерно кременисте, помаранчевого кольору. Вихід зерна 76 – 81%. Маса 1000 зерен 320 г. Білку в зерні 10 – 11 %. Довжина вегетаційного періоду у Степу складає 116 діб, Лісостепу – 128, Поліссі – 139 діб. Посухостійкість хороша. Характеризується енергійним стартовим ростом рослин. Стійкий до полягання, толерантний до загущення. Хворобами та

шкідниками вражається на рівні стандартів. Високоврожайний. Врожай зерна у Лісостепу складає 84,0 ц/га та 73,4 ц/га у Поліссі, що перевищує національні стандарти на 5,0 та 5,6 ц/га відповідно.

Тристан. Трирічний середньоранній. Створений фірмою «КВС» (Німеччина). Зерно кремнисто-зубовидне, жовтого кольору. Вихід зерна 78%. Маса 1000 зерен 290 – 320 г. Білку у зерні 11,2%. Довжина вегетаційного періоду складає у Поліссі 132 дня. Посухостійкість хороша. Стійкий до полягання, толерантний до загушення. Характеризується енергійним стартовим ростом рослин. Холодостійкість висока (4,8 бала). Хворобами уражується слабо. Кукурудзяним метеликом уражується нижче середнього рівня стандартів. Високоврожайний (силосного типу з високим вмістом сухої речовини в зеленій масі). Рекомендовано вирощувати в поліській зоні України, де врожаї складають 71,1 ц/га, що на 6,4 ц/га перевищує вітчизняний стандарт.

Кінтал (AB 421). Простий середньостиглий. Створений фірмою Асгроу (Франція). Зерно напівзубовидне, жовто-помаранчевого кольору. Вихід зерна 79 - 81%. Маса 1000 зерен 280 – 320 г. Білку у зерні 9,5 – 10,3%. Зерно під час досягання швидко втрачає вологу. Довжина вегетаційного періоду у Степу складає 118 діб, Лісостепу – 130 діб. Посухостійкість хороша. Холодостійкість висока (4,8 бала). Витривалий до полягання. Хворобами та шкідниками вражається на рівні стандартів. Високоврожайний. Рекомендовано вирощувати в степовій та лісостеповій зонах України, де врожаї складають 64,4 та 80,2 ц/га відповідно, що на 6,7 та 4,8 ц/га перевищує вітчизняні стандарти.

Кадр 397. Простий середньостиглий. Створений селекціонерами Українсько-американського ЗАТ «Каргілл-Дніпр». Висота рослин 210 – 250 см, довжина листя 17 – 18 см. Качан циліндричний, формується на висоті 70 – 80 см, довжина качана 21 – 22 см, рядів зерен 16, верхівка качана озернена добре, стрижень качана червоного кольору. Зерно зубовидне, жовтого кольору. Вихід зерен 81%. Маса 1000 зерен 260 – 300 г. Білку у зерні

9,6%. Довжина вегетаційного періоду у степу складає 127 діб. Посухостійкість хороша. Холодостійкість хороша (4,3 бала). Стійкий до полягання. Хворобами та шкідниками вражається нижче рівня стандартів. Високоврожайний. У степу врожай зерна складає 52,0 ц/га, що перевищує національний стандарт на 1,7 ц/га [103, 108].

Найбільш високий біокліматичний потенціал для виробництва кукурудзи мають Північний Степ і Лісостеп. Сума активних температур, тривалість вегетаційного періоду в районах Північного Степу дозволяють вирощувати середньоранні, середньостиглі та середньопізні гібриди, у південному і центральному Лісостепу – середньостиглі, у північних і західних районах – ранні та середньоранні.

У цих зонах виробництво кукурудзи має велику перспективу. На сортодільницях, де рівень інтенсифікації рільництва високий, урожайність її зерна майже удвічі більша, ніж у господарствах.

На сортодільницях північного Степу у 1985–1990 рр. урожайність кукурудзи на всій площі становила в середньому 54,3 ц/га, у Лісостепу – 59,8 ц/га, або відповідно на 17 – 22 ц/га вище ярого ячменю. Таким чином, в цих зонах доцільно сконцентрувати виробництво зерна кукурудзи, довести її питому вагу у зерновому кліні до 20 – 25 %, а то й більше.

У західному Лісостепу кукурудза також забезпечує високі урожаї. На Радехівській сортодільниці Львівської і Торчинській – Волинської областей у середньому за 1985 – 1990 рр. зібрано по 62 ц/га. Але перш ніж розширювати її посіви, слід здійснити комплекс заходів щодо різкого підвищення урожайності. Є всі можливості збільшити продуктивність кукурудзи у цій зоні вдвічі, збирати по 50 – 60 ц/га зерна, інакше вирощування її буде неефективним. І тільки при досягненні такого рівня урожайності можна поступово розширювати площі її посіву [44].

Кліматичні умови південних і центральних районів Степу в зв'язку з обмеженими запасами вологи у ґрунті, частими ґрунтовими і повітряними посухами не сприятливі для вирощування кукурудзи на неполивних землях.

Тому продуктивність кукурудзи тут часто нижча (на 10 – 13 ц/га), ніж ярого ячменю.

Висновки до розділу 1

1. На сьогоднішній день біологічні особливості кукурудзи достатньо добре вивчені. Відомі вимоги культури до тепла, вологи, світла, ґрунту та мінерального живлення, а також вивчені її хвороби та методи боротьби з ними.

2. Мінливість умов навколишнього середовища на локальному рівні, а також зміна клімату на глобальному рівні вимагає пристосування культури кукурудзи до різних агрометеорологічних умов. Вітчизняними та зарубіжними селекціонерами виведена значна кількість гібридів та сортів кукурудзи, які дозволяють адаптувати культуру до конкретних умов середовища та в залежності від цілей її вирощування.

3. Чітке агрокліматичне районування територій дозволяє визначити найбільш сприятливі зони для вирощування кукурудзи, а також підібрати сорти та гібриди, що будуть найбільш продуктивними в конкретній місцевості та дадуть можливість отримання більших врожаїв.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ

2.1. Особливості процесу проростання та появи сходів зернових

Життєвий цикл зернових рослин починається з формування зиготи, однак вікові періоди прийнято визначати з моменту проростання насіння. Тому зазвичай перший період розвитку визначається, як стан проростку. На відміну від послідуєчих вікових періодів зародки не живляться автотрофно, а використовують запаси поживних речовин насіння. Стан проростків характеризується також тим, що в цей період всі органи – корені, листя, зачаткове стебло є зародковими, утвореними за рахунок речовин материнського організму та насіння.

Було запропоновано розділити цей період на 3 під періоди: перший – стан зародка від початку утворення зиготи до завершення формування зародка, здатного за сприятливих умов до проростання; другий – стан проростку від проростання насіння до появи першого зародкового листка; третій – стан сходів від появи першого зародкового листа до повного розсорткування усіх зародкових листків [46].

На першому етапі органогенезу формування пагону починається з утворення ініціальних клітин промеристеми. Із ініціальних клітин формується конус наростання з первинними зачатками органів майбутнього пагону. Оскільки живлення відбувається за рахунок накопичених запасів ендосперму, тому умови освітлення на цей період практично не впливають. Цей етап спостерігається в період фенофази сходів та визначає наступні елементи продуктивності: проростання, схожість, густоту стояння рослин. На цьому етапі проростки дуже чутливі до зміни навколишнього середовища.

Так сильна дія стресових факторів на рослину у цей період призводить до утворення різних аномалій розвитку та видозмін.

Дамо загальну характеристику процесу проростання насіння. Процес появи сходів із зародка зернівки, поміщеної в ґрунт, дуже складний. Відома велика кількість робіт, які так чи інакше стосуються даного питання і пояснюють цей процес украй суперечливо. Першим критичним періодом у житті рослини є ріст і розвиток від посіву до сходів. Від того, за яких умов закладаються основи майбутньої рослини, залежить весь хід вегетаційного розвитку. Найбільший вплив з навколишнього середовища на проростання мають температура і вологість ґрунту та глибина закладення насіння.

Процес проростання насіння проходить за певними послідовними та взаємопов'язаними між собою фазами, а саме: інтенсивне поглинання води насінням (пасивна фаза), яка проявляється у набуханні та наклёвуванні насіння, і фаза проростання (фаза активних ростових процесів) [32, 60]. Розглянемо процес проростання насіння з фізіологічної точки зору.

Надходження води у насіння є пусковим фактором проростання та одним з головних чинників зовнішнього середовища, які регулюють життєдіяльність насіння. Поглинання вологи при набубнявінні насіння відбувається в першу чергу за рахунок гідратації біоколоїдів, як наслідок розвивається онкотичний тиск та розриваються насіннєві оболонки. Однак, явище набубнявіння є оборотним, тобто насіння можна знову висушити без значної втрати схожості [70]. Сухе насіння містить лише зв'язану воду, яка практично не бере участь в обміні речовин. Тому для початку проростання воно повинно поглинути певну кількість вологи, необхідної для активізації ферментів та створення відповідного середовища для хімічних реакцій.

Хімічний склад і біологічні особливості насіння різних культур обумовлюють їх різну потребу в кількості поглинання води, необхідної для проростання [61]. Сухі насіння мають велику сисну силу. Тому вони здатні брати воду з ґрунту зі зниженою вологістю. Встановлено, що насіння не поглинають воду з ґрунту лише в тому випадку, якщо її вологість менше

вологості стійкого в'янення [37, 38]. Якщо води в ґрунті недостатньо, то процес набухання зупиняється до того часу, поки ґрунт не стане вологішим.

Набубнявіння спочатку здійснюється силами гідратації, далі – вступають в дію осмотичні сили, що виникають як наслідок накопичення продуктів гідролізу білків, жирів та полісахаридів. Поглинання води при набубнявінні залежить і від хімічного складу зародка, ендосперму та покриву насіння.

У сім'ядолях або ендоспермі містяться запаси поживних речовин. Вони призначені для живлення рослини в початковий момент часу. Після накопичення необхідної кількості води відбувається гідроліз речовин і синтез нових сполук [19]. Підвищується інтенсивність дихання. Слід відмітити, що зародок дихає значно інтенсивніше, ніж ендосперм, що можна пов'язати з високим вмістом білка у зародку [101].

Відкладені нерозчинні у воді речовини розпадаються на більш прості, розчинні у воді. Перетворення відбувається за участю ферментів, які активізуються у міру набубнявіння насіння. Крохмаль, білки та інші запасні поживні речовини перетворюються в цукор і амінокислоти.

В першу чергу під дією амілази (діастази) крохмаль перетворюється на так звані декстрини та мальтозу. Головним місцем знаходження амілази в насінні під час стану спокою вважається щиток, а саме його епітеліальні клітини та частково місця поблизу алеройного шару, однак основна частина β -амілази міститься у ендоспермі. В зародку знаходиться незначна кількість амілази.

Наочний вплив, спричинений амілазою проявляється в корозії крохмальних зерен, тобто в утворенні в них щілин, збільшення котрих призводить до руйнування крохмальних зерен [59]. На цей процес в значній мірі впливає вологість та температура середовища, а саме: з підвищенням температури та вологості прискорюється дія діастази.

Синтез α -амілази стимулюється на рівні транскрипції гібереліном та регулюється абсцизовою кислотою. Під час адаптації рослин до умов

водного стресу відбуваються суттєві фізіолого-біохімічні перебудови, пов'язані з диханням, асиміляцією CO_2 , іонним транспортом, темпами росту, експресією фітогормональних інгібіторів, біосинтезом білків. На ріст, розвиток та продуктивність кукурудзи особливо негативно впливає дефіцит вологи. Зміна активності α -амілази є чутливим маркером водного стресу, що зумовлюється активацією її інгібіторів у період гетеротрофного етапу онтогенезу рослин. Гальмування активності α -амілази призводить до зменшення пулу відновлених вуглеводів та, як результат, послаблення резистентності осмотичного стресу [36, 40].

Мальтоза, котра утворилася в результаті дії амілази далі під дією мальтози розщеплюється до глюкози. Паралельно з накопиченням глюкози відбувається утворення сахарози, яка є запасним вуглеводом, що легко використовується при проростанні.

Одночасно білкові речовини перетворюються на легкорозчинні азотисті сполуки під дією протеолітичних та пептонізуючих сполук. Як наслідок розчеплення білкових сполук кількість білкового азоту знижується, через що збільшується кількість амідного азоту, і вміст загального азоту тривалий час залишається незмінним. Ферментативна діяльність різко знижується під дією високої температури та антисептиків [33, 59].

Коли вологість насіння досягає критичного значення, яка становить 40-60% сирої маси відбувається запуск ростових процесів. Проростання починається з появи зародкового корінця, котрий прориває насіннєві оболонки. Цей процес називається накльовуванням, але він не пов'язаний з активізацією ділення клітин. Дистальна частина кореня виштовхується в результаті розтягнення клітин зародкової осі (гіпокотилія та кореня). Це розтягнення зумовлене підкисленням клітинних стінок за рахунок дихального CO_2 та завдяки активізації H^+ -помпи, як наслідок звільнення ауксина із зв'язаної форми. Одночасно накопичення осмотично активних речовин у клітинах, обумовлене гідролітичними процесами, підтримує цей ріст розтягненням.

З початку проростання корінець росте швидше, аніж пагін. Корінець прориває оболонку насінини, виходить назовні, заглиблюється у ґрунт і починає поглинати воду. За сприятливих умов незабаром починає розвиватися стебло проростка, котре виходить на поверхню ґрунту. Для зростання і розвитку проросток витрачає енергію, яку отримує за рахунок розпаду органічних речовин, цукру, тобто дихання насіння.

Проростання насіння може відбуватися при різних температурах. При низьких температурах затримується витрата поживних речовин насінням і накопичення їх проростком. У результаті цього знижується здатність проростка долати опір ґрунту при виході на поверхню.

Ріст осьових органів обумовлений синтезом ДНК та діленням клітин, котре починається через 1,0 – 1,5 доби після початку набубнявіння. Одночасно відбувається масова мобілізація запасних речовин в запасуючих органах та надходження їх до ростучих органів. В наступні 1,0 – 1,5 доби починається розтягнення клітин, у корінці та пагоні з'являються зони розтягнення. Довжина сформованого апекса кореня (апикальна меристема) з кореневим чохлаком не перевищує 1 – 2 мм. Довжина зони розтягнення зазвичай 5 – 7 мм.

Просування пагона у ґрунті також обумовлене розтягненням клітин. Для захисту зародкового листя при просуванні пагона в щільному ґрунті у злаків служить колеоптиль – перший видозмінений лист.

У ґрунті в умовах темряви орієнтація росту осьових органів здійснюється по гравітаційному полю, корінь росте доцентровано, а пагін – відцентровано [69]. Глибина загортання насіння впливає на польову схожість. При мілкому закладенні насіння через пересихання може не зійти, при глибокому закладенні – відчувається великий опір ґрунту.

На основі проведених дослідів [130] було встановлено, насіння з видаленим перикарпієм проростає значно швидше та формуються більш дружні сходи, а ніж у випадку звичайного насіння, однак така особливість проявляється лише в умовах достатнього зволоження.

Відомо, що насіння більшості культур навіть під час проростання чутливі до впливу різних сполук. Так наприклад фосфор у різній концентрації може як прискорювати так і пригнічувати розвиток рослин під час проростання [22].

Більш детально розглянемо процес сходів. Процес появи сходів злаків і вихід першого листка з-під покриву колеоптиля представляються наступним чином: при проростанні зернівки злаку колеоптиль, вийшовши із зернівки, пробивається крізь покривний шар ґрунту і, досягнувши поверхні землі, розкривається і пропускає перші листя сходів. Коли надходження води з ґрунту в зародок злаку посилиться внаслідок достатнього розвитку коренів 2-го порядку, починається розвиток зародка стебла злаку, котрий складається з загостреної на кінці трубочки, на дні якої міститься зачаток стебла і листя злаку.

Гострий кінець трубочки прориває плодові оболонки зернівки злаку, виходить назовні і прокладає собі шлях до поверхні ґрунту, розсовуючи частинки ґрунту на своєму шляху. Після того як трубочка підніметься над поверхнею ґрунту, вона відкривається і подальший її ріст припиняється. Тепер усередині трубочки починає розвиватися зачаток стебла злаку. Стебло злаку через отвір виходить на денну поверхню і утворює перший зелений лист. На цьому завершується проростання злаку [27].

Сходи – це проростки, що з'явилися на поверхні ґрунту. У злаків сходи мають вигляд згорнутого або складеного у вигляді чохла первинного листа (колеоптиля), що захищає зачатки листків і бруньку, з якої розвивається стебло. Після виходу на поверхню захисна роль цього чохла закінчується, і його ріст припиняється.

Виходу сходів на земну поверхню сприяє високий (кілька атмосфер) осмотичний тиск у клітинах, що створює напружений стан (тургор) і дозволяє проросткам розсувати частинки ґрунту. Міцність колеоптиля пояснюється дуже високим тургором його тканини.

Розглянемо особливості проростання насіння кукурудзи. Потреба

кукурудзи в теплі визначається нижньою границею температури, при якій починається розвиток, та сумарною кількістю тепла, необхідною для закінчення цієї фази розвитку [99]. Під дією несприятливих факторів при формуванні врожаю, збиранні, післязбиральній обробці та зберіганні може спостерігатися зниження схожості насіння, енергії проростання, сили початкового росту та відповідно врожайних властивостей.

Зазвичай польова схожість нижче лабораторної на 10 – 15%. На польову схожість насіння впливає багато факторів: метеорологічні умови, фізико-хімічні властивості ґрунту, рівень агротехніки, хвороби та шкідники, котрі вражають та пошкоджують насіння та проростки. Врожайність кукурудзи знижується як в наслідок зрідженості посівів, так і загущеності.

Причиною зниження польової схожості часто є механічне травмування насіння при збиранні та післязбиральній обробці, в процесі висіву, в наслідок ураження хворобами та пошкодження шкідниками, а також під дією низьких температур. Особливо небезпечними є мікротравми зародку та ендосперму.

Середньодобові температури повітря впливають на швидкість проходження окремих фенофаз та на загальну тривалість вегетаційного періоду. Це добре прослідковується у строках висіву. При висіві у більш пізні строки скорочуються практично всі міжфазові періоди [103].

Значний вплив на повноту та дружність сходів, ріст, розвиток та продуктивність кукурудзи має глибина закладення насіння. Для цього насіння слід висівати на таку глибину, щоб вони були забезпечені достатньою кількістю вологи, повітря та тепла.

Нормальне набухання та проростання насіння відбувається при вологості ґрунту не нижче 18 – 20%, що особливо необхідно враховувати при встановленні глибини висіву в районах з недостатнім зволоженням.

При вирощуванні кукурудзи механізованим способом у степовій зоні раніше рекомендувалася глибока глибина загортання насіння (8 – 10 см). Однак, деякі досліді показали, що при такому закладенні насіння молодим проросткам кукурудзи доводиться використовувати значну частину

пластичних речовин на подолання посівного шару ґрунту, в результаті чого вони виявляються ослабленими. Крім того чим глибше посіяне насіння, тим більше на своєму шляху пагони контактують з фітопатогенними мікроорганізмами, тому ймовірність їх ураження збільшується.

Виходячи з вищезазначеного, глибину закладення слід встановлювати з урахуванням морфобіологічних особливостей вирощуваних форм кукурудзи, фізико-механічних властивостей ґрунту, її вологості та температурного режиму.

В залежності від типу ґрунту рекомендується різна глибина загортання. Так на важких суглинкових ґрунтах оптимальною є глибина загортання 4 – 5 см, на легких суглинистих – 5 – 6 см, на чорноземах – 5 – 7 см та 6 – 8 см на супісчаних.

Оптимальні умови для росту, розвитку та формування врожаю складаються, якщо на задану глибину загортають близько 80% насіння.

В степових районах України оптимальна глибина загортання насіння складає 5 – 7 см, в лісостепових та Поліссі – 4 – 5 см. Насіння обов'язково слід сіяти у вологий шар ґрунту, дотримуючись рівномірності їх розподілення як по глибині, так і по довжині рядка. Це забезпечує сприятливі умови для появи повних сходів кукурудзи та позитивно відображується на індивідуальній продуктивності рослин [108].

Стосовно реалізації потенціалу гібридів кукурудзи в залежності від строків сівби в першу чергу зазначимо, що сорти та гібриди кукурудзи відрізняються один від одного по багатьом біологічним, господарським, морфологічним, генетичним ознакам і властивостям. Будь-яка ознака чи властивість може проявитися тільки у відповідних умовах.

Основна функція сортової агротехніки – створення умов для максимальної реалізації генетичного потенціалу гібриду, як в оптимальних, так і в несприятливих умовах. До найважливіших елементів сортової агротехніки автори відносять строки посіву, густоту рослин, мінеральне живлення – тобто фактори, у відповідь на які проявляються достовірні

відмінності, як між окремими гібридами, так і між групами скоростиглості. В умовах інтенсифікації виробництва кукурудзи необхідна збалансованість основних факторів продуктивності генотипів і агроекологічних умов, включаючи строки посіву, зрошення, щільність посіву, рівень мінерального живлення [74].

Найбільш радикально на агроекологічну обстановку впливає саме дата посіву, визначаючи такі її складові, як тепло- і вологозабезпеченість, фотоперіод, фітосанітарні умови і т.д..

Вибір оптимальних строків посіву визначається безліччю факторів, головними з яких є загальні ресурси тепла, температурний режим ґрунту і повітря в період проростання насіння і цвітіння рослин з урахуванням їх коливань по роках, запаси вологи, фітосанітарна обстановка, скоростиглість гібридів і їх реакція на теплозабезпечення, рівень захисту рослин та ін.. Фактично при оптимізації строків посіву виникають в основному два обмеження – з одного боку, температурний режим початку вегетації, детермінують зростання і розвиток рослин у ювенальному віці, з іншого – загальні ресурси вологи.

До останнього часу загальноприйнятим для кукурудзи строком посіву був період, обґрунтований ходом добової температури ґрунту і прив'язаний до стійкого переходу її через відмітку $+10^{\circ}\text{C}$ на глибині загортання насіння. Посів в непрогрітий ґрунт, як правило, подовжує період проростання насіння, що може призвести до зниження польової схожості і енергії початкового росту.

Інший підхід до вибору терміну посіву кукурудзи у Н.В. Мациної, яка вважає, що основним критерієм при цьому є температура не ґрунту, а повітря, яка до моменту появи сходів повинна встановитися близько $+15^{\circ}\text{C}$ [50].

Питання про терміни посіву кукурудзи слід розглядати з точки зору конкретних генотипів або їх груп з урахуванням таких ознак, як адаптивність, екологічна пластичність, пряма і непряма холодостійкість.

При визначенні строку посіву не завжди можна виходити лише з температури ґрунту, необхідно враховувати середні багаторічні кліматичні особливості.

Оптимізація строків посіву повинна розглядатися як один з факторів реалізації продуктивного потенціалу кукурудзи [41,96].

Вплив факторів навколишнього середовища на проростання насіння кукурудзи був описаний рядом вчених з різною мірою деталізації процесу та висвітлення його особливостей.

Ю.І. Чірковим на основі проведених польових та лабораторних дослідів з кукурудзою було встановлено, що при достатньому зволоженні ґрунту (більше 15 мм продуктивної вологи в шарі ґрунту 0 – 10 см) темп проростання насіння кукурудзи залежить в основному від температури. При оптимальному зволоженні та температурі 24,5 – 25,5°C для початку проростання необхідно 40 – 42 години. Згідно методу ефективних температур, при пророщуванні насіння кукурудзи було встановлено, враховуючи початок проростання в нижніх межах температур, сума ефективних температур визначених від 8°C складає близько 28°C.

Крім того Ю.І. Чірковим було встановлено, що при температурі 11 – 12°C ростові процеси починаються через 7 – 9 днів, а при 18 – 22°C – через 2 – 3 дні. Але при вологозабезпеченості нижче 15 мм у шарі 0 – 10 см зв'язок темпів розвитку з температурним режимом порушується і проростання сповільнюється.

Також Ю.І. Чірковим було встановлено, що для появи сходів від початку проростання повинно накопичитися 55°C суми ефективних температур ґрунту вище 8°C з можливим відхиленням $\pm 6^\circ\text{C}$. При глибині закладення насіння 4 см при оптимальних запасах вологи сума ефективних температур періоду висів – сходи в середньому складає 82 – 83°C. Однак зі збільшенням глибини закладення насіння сума необхідних ефективних температур збільшується.

В цілому за період висів – сходи число днів коливається в межах 6 – 22

діб; середня температура ґрунту на глибині закладення насіння – в межах 12 – 22°C; сума середньодобових температур ґрунту – від 132 до 264°C [111].

Повнота сходів – комплексний інтегральний показник, який відображує сукупність впливу метеорологічних умов періоду, агротехніки, ґрунтових умов, якості посівного матеріалу, біологічних властивостей сортів, шкідників та хвороб. Дослідженням залежності повноти сходів та тривалості періоду висів-сходи ярового ячменю від різних комбінації агрометеорологічних факторів займався А.П. Федосєєв. Він підкреслює негативний вплив низьких температур на фоні надлишкового зволоження. Роль низьких температур ґрунту у зниженні польової схожості насіння надається велике значення. Низькі температури порушують біологічну рівновагу між корисними та патогенними мікроорганізмами у ґрунті на користь останніх. Крім того, низькі температури зменшують інтенсивність використання запасних речовин ендосперму насіння на ріст проростків, сповільнюють дихання та синтез білка, ускладнюють надходження фосфору та азоту ззовні. В результаті чого проростки при низькій температурі ґрунту мають меншу масу та знижену здатність до подолання опору ґрунту [102].

На основі лабораторних дослідів було встановлено, що в умовах постійного добового рівня температур відносно знижена польова схожість ярової пшениці спостерігалась при температурах ґрунту 5 – 7°C, при 10 – 12°C вона зростала до 80 – 90%, при 15°C досягала 94% та при 18 – 29°C знижувалась до 80 – 85% [39]. Також при змінному добовому ході температур (вдень 18 – 20°C, вночі заморозки –3,–6°C) спостерігалось різке падіння польової схожості насіння.

Згідно дослідів А.П. Федосєєва було встановлено, що при оптимальних умовах температури та зволоження на європейській частині Росії повнота сходів складає в середньому 83 – 95% з тривалістю періоду висів – сходи 8 – 12 днів. Низька польова схожість насіння (30 – 70%) спостерігається навесні в умовах різкого похолодання (нижче 0°C) та при значному зволоженні. За таких умов тривалість періоду появи сходів може складати 15 – 25 днів.

Надлишок вологи призводить до утворення анаеробних умов у ґрунті, до загибелі сходів від вимокання, а також до підвищення вірогідності ураження їх грибками [91].

Швидкість появи сходів має певний вплив на формування майбутнього врожаю. Згідно даних І.А. Оксененко швидка поява сходів ячменю викликає прискорене утворення вузлових коренів, підвищує продуктивність рослин [62]. З прискоренням появи сходів зменшується вірогідність загнивання та загибелі насіння.

Згідно з даними автора в лісовій зоні при знижених температурах 4 – 5°C у сухі весни тривалість періоду складає 15 – 16 діб, але при достатньому зволоженні та при перезволоженні може досягати 26 діб. З підвищенням температури до 16 – 18°C при нормальному зволоженні сходи можуть з'явитися на 8 добу, при посуху на 9 – 10 добу, а у разі перезволоження період може досягти 12 діб. У степовій зоні при низьких температурах поява сходів в умовах невисокої вологості ґрунту дещо прискорюється, при високих – затримується.

Також автор наголошує, що вирішальне значення для отримання оптимальної густини сходів мають посівні якості насіння, такі як чистота, схожість, енергія проростання, вирівняність, крупність. Рекомендується висівати більші за розміром насінини, оскільки вони мають значний запас поживних речовин та крупний зародок, тому вони навіть при зниженій силі початкового росту розвивають потужні проростки, здатні пробитися на поверхню. У рослин, що розвиваються із крупних зерен, утворюється найбільша кількість первинних та вузлових коренів [102].

Слід зазначити, що в польових умовах при тривалості періоду появи сходів кукурудзи менше ніж 10 діб насіння та проростки практично не пошкоджуються, сходи бувають міцні та дружні. У разі подовженого періоду до 25 діб та більше спостерігається масове пошкодження насіння та проростків, що призводить до зрідження посівів, сходи при цьому бувають слабкими та не дружними [52].

2.2. Лабораторний експеримент з пророщування насіння

2.2.1. Методика проведення експерименту.

Було проведено лабораторний експеримент на базі Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення. В якості висівного матеріалу у відділі кукурудзи Інституту було взято зразок насіння кукурудзи Одеська 385 МВ вагою близько 5 кг. Даний сорт посівної кукурудзи обрано виходячи з того, що він є найбільш затребуваним на Півдні України.

Зразок було ретельно перемішано з метою отримання однорідної проби та розділено за допомогою зернового розподільника на рівні частини для проведення досліду [54]. Для калібрування насіння, зразки були просіяні через стандартні металеві сита з вічками діаметром 7,0 мм.

Для пророщування було обрано метод «рулонів», що є найбільш прийнятним для проведення даного роду експерименту. Отже, смужки водостійкого паперу викладалися разом із стандартними смужками фільтрувального паперу розміром 29 см на 8 см та змочувалися дистильованою водою. На кожні складені разом змочені смужки викладалося по 10 насінин у ряд через 1,5 см, на відстані 1,5 см від краю смужки, зародком до низу. Рулони закручувалися та обережно ставилися вертикально у спеціальний металевий резервуар прямокутної форми, так щоб насіння знаходилося ближче до верхнього краю та закріплювалися металевими дротами. Заздалегідь в даний резервуар було налито дистильовану воду, достатнього об'єму для утворення на дні шару води близько 2 см, що забезпечувало дотримання оптимального зволоження. Для запобігання пліснявіння та ураження грибками у воду додавався слабкий розчин перманганату калію.

Далі піддослідні зразки в металевому резервуарі були розміщені у

термостаті з відрегульованою необхідною температурою та підтриманням постійної вологості. Щодоби відбувався відбір необхідної кількості зразків для аналізу. Залишки зразків поверталися назад до термостату до наступного відбору. За необхідності доливалася вода для постійного дотримання шару в 2 см. Усі аналізи проводилися у трьох повтореннях.

Дослід проводився у два етапи відповідно до стадій розвитку насіння. На першому етапі визначалася вологість насіння, що дає змогу визначити швидкість поглинання води насінням. З того моменту, коли насіння набубнявіло і проклунувся корінець починався наступний етап дослідів – визначення сухої ваги проростка та ендосперму окремо. Через деякий час після проростання корінця починався ріст колевпця, що ставало приводом для початку визначення довжини колевпця. Надалі визначення довжини колевпця та ваги проростка відбувалося паралельно [51].

З метою визначення вологості насіння проводився ряд наступних дій. Зразки для визначення вологості насіння відбиралися в один і той самий час щоденно до того дня коли 90% насіння проклунулося (з'явився корінець). Насіння обережно виймалося з кожного рулону окремо, викладалося на фільтрувальний папір, надлишки води з поверхні також видалялися промокуванням за допомогою сухого фільтрувального паперу.

Для прискорення висушування за допомогою скальпеля кожна насінина розрізалася на дві частини уздовж проростка. Подрібнене таким чином насіння без втрати всіх дрібних шматочків поміщалося до бюксу та зважувалося на аналітичних вагах.

Проби у відкритому бюксі ставилися у сушильну шафу та висушувалися при температурі 130°C на протязі 12 годин, після чого охолоджувалися в ексікаторі, зважувалися та знову ставилися до сушильної шафи. Сушка продовжувалася при температурі 130°C на протязі 2 годин, проби знову зважувалися. Якщо вага зменшувалася, тоді сушку продовжували та проводили зважування кожні 2 години до встановлення постійної ваги.

Визначення вмісту води в насінні розраховувалося за наступною формулою:

$$x = \frac{100(b - b_1)}{b} \quad (2.1)$$

де x – відсоток води у насінні, b – вага наважки до висушування, b_1 – вага наважки після висушування [29].

Визначення маси проростків та довжини пагонів проводилося наступним чином. Визначення маси проростків починалося з моменту запуску ростових процесів, тобто з того моменту, коли зародковий корінець пробив покривну оболонку. Зразок пророслого насіння діставався із термостату, кожний екземпляр викладали на фільтрувальний папір для видалення надлишків води з поверхні. Кожна насінина розрізалася уздовж зародка та видалявся проросток (корінець та пагін). Коли починав рости пагін – вимірювалася довжина кожного пагона.

Відокремлені проростки розміщувалися у заздалегідь зваженому бюксі та ставилися з відкритою кришкою у термостат розігрітий до температури 130°C на 4 години, після чого бюкс діставали, накривали кришкою та поміщали на 20 хвилин до ексикатора для охолодження. Після охолодження проби зважувалися, тобто визначалася абсолютно суха вага.

Аналіз повторювався кожні 24 години до того моменту, поки пагони досягли довжини 4 – 5 см, що за польових умов відповідає оптимальній глибині загортання насіння.

Наступним етапом дослідження є визначення вмісту вуглеводів. Визначення вуглеводів у насінні починалося з моменту запуску ростових процесів, тобто з того моменту, коли зародковий корінець пробив покривну оболонку. Зразок пророслого насіння діставався із термостату, кожний екземпляр викладали на фільтрувальний папір для видалення надлишків води з поверхні. Із кожної насінини видалявся проросток (корінець та пагін). Із залишеними зернівками проводився аналіз.

Аналіз проводився відповідно до стандартного антронового методу визначення вуглеводів. Для аналізу знадобилися наступні реактиви:

- 1) антроновий реактив (160 мл антрону розчиняють в 100 мл сірчаної кислоти, приготовленої з 100 мл води та 600 мл сірчаної кислоти);
- 2) стандартний реактив глюкози (10 мл безводної глюкози розчиняють в 200 мл дистильованої води; для консервації додають 0,2 мл хлороформа та зберігають у холодильнику);
- 3) 0,2 % сульфат натрію;
- 4) 0,5 н сірчана кислота;
- 5) спирт ректифікат.

Визначення суми крохмалю та цукрів проходить наступним чином. В пробірку насипають 20 мг борошна одержаного з розмолотого насіння, додають 0,5 н сірчану кислоту. Нагрівають на киплячій водяній бані 30 хвилин. Вміст пробірки переносять в колбу на 50 мл. Розчин доводять до мітки водою. 5 мл фільтрату переносять в колбу на 50 мл та знову доводять водою до мітки. Далі 0,5 мл досліджуваного розчину заливають 2,5 мл антропного реактиву. Нагрівають 5 хвилин на киплячій водяній бані та охолоджують в холодній воді. Через 30 хвилин визначають екстинкцію на фотоелектроколориметрі при 630 нм проти контролю (0,5 води з 2,5 мл антропного реактиву). Визначають екстринцію стандартного розчину глюкози (0,5 мл розчину та 2,5 мл антропного реактиву).

$$C = \frac{50 \cdot 0.91 \cdot E_x \cdot 50 \cdot 50 \cdot 100}{E_{st} \cdot H \cdot 5 \cdot 1000}, \quad (2.2)$$

де, 50 – концентрація глюкози в стандартному розчині 50мкг/мл; 100 – перерахунок на %; E_{st} – екстинкція стандартного розчину; H – наважка в мг; 0,91 – поправка на вологість; 1000 – перерахунок в мг.

Такий аналіз проводився лише при температурі 22°C з метою більш детального вивчення процесу гідролізу запасів ендосперму.

2.2.2. Отримані результати спостережень.

В першу чергу розглянемо отримані результати спостережень за вологістю насіння, масою та довжиною пагонів.

Перша серія експериментів була проведена за умови підтримання постійної температури 22°C та оптимального зволоження.

З отриманих даних видно, що першу добу після висіву поглинання води відбувається значно швидше, ніж надалі (рис. 2.1). Від початкового значення, яке становило 12% від абсолютно сухої маси насіння, вологість за першу добу зростає до 27 – 29%, тобто швидкість поглинання води становила 17% за добу. Далі поглинання води сповільнювалося і становило вже 6% за добу при досягненні 35% вологості зернівки. Вже за третю добу у зернівці накопичилося 38 – 40% води, а приріст води склав лише 3%. Надалі вологість зернівки залишалася незмінною (рис. 2.2).

Отже, швидкість накопичення води насінням зменшується зі збільшенням вмісту води у насінні.

У другу добу після висіву проклонулося лише 10% насінин. У третю добу після висіву вже проклонулося біля 90% насінин, у деяких насінин довжина зародкового корінця досягала 8 мм. З отриманих даних видно, що на момент запуску ростових процесів у насінні вологість досягла 40%. Для початку росту знадобилося близько 2 діб.

На третю добу спостерігався початок росту колевотилі. Її довжина становила у середньому 4 мм. У свою чергу довжина коренів складала 20 – 30 мм. Абсолютно суха маса одного проростка становила 5 мг (рис. 2.3).

На четверту добу середня довжина пагонів складала у середньому 2 см (рис. 2.4), а абсолютно суха вага одного проростка 9 мг. Вже через 5 діб після висіву довжина пагонів досягла 3 см, вага проростка 14 мг. У шосту добу спостерігалися колевотелі довжиною 4 – 5 см. Вага одного проростка досягла 23 мг.

Беручи до уваги, що середня глибина загортання насіння під час висіву

становить 4 см, то можна констатувати появу сходів на 6 добу після висіву. На цьому етапі експеримент завершувався.

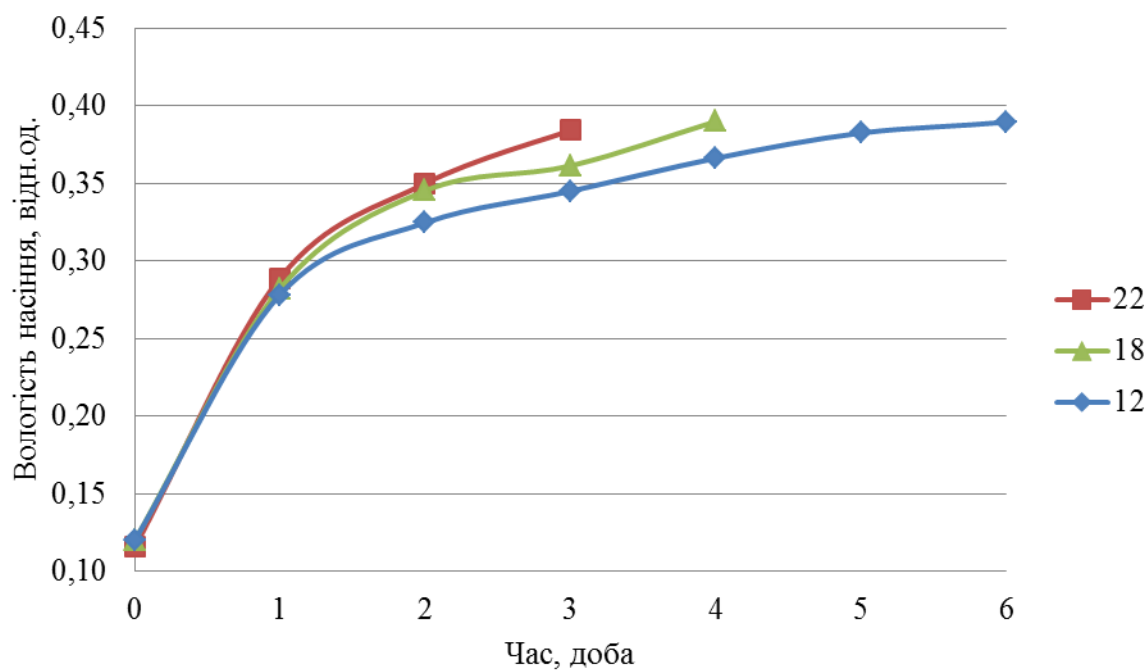


Рис. 2.1. Динаміка накопичення вологи насінням за температур 22, 18 та 12°C.

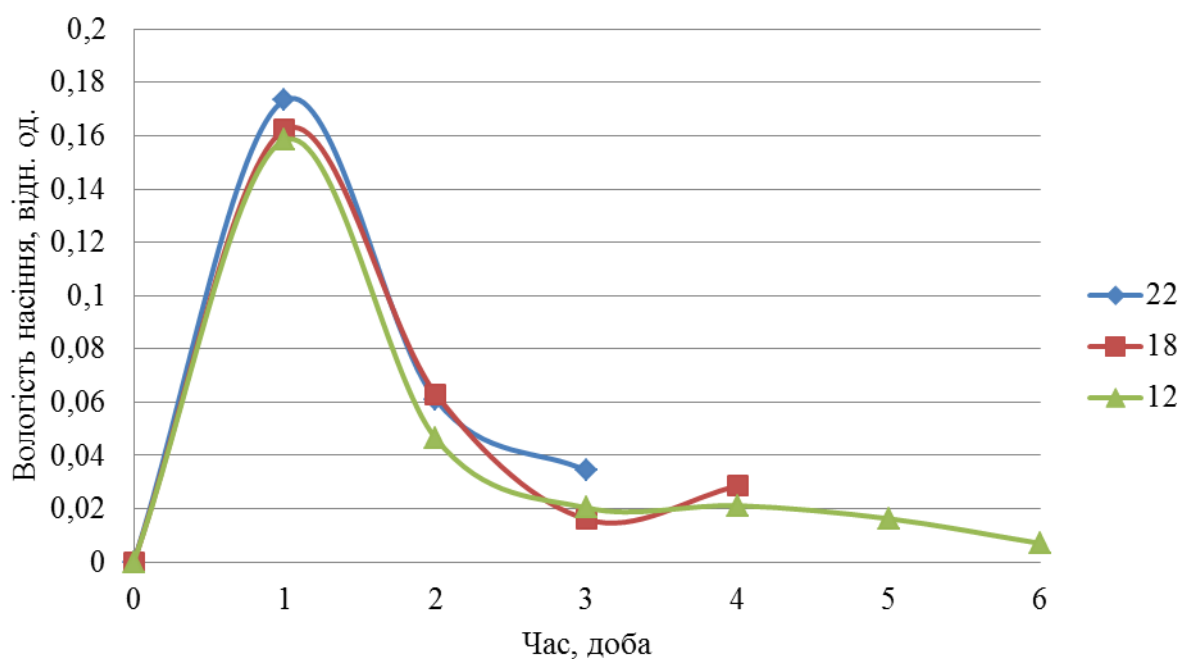


Рис. 2.2. Інтенсивність накопичення вологи насінням за температур 22, 18 та 12°C.

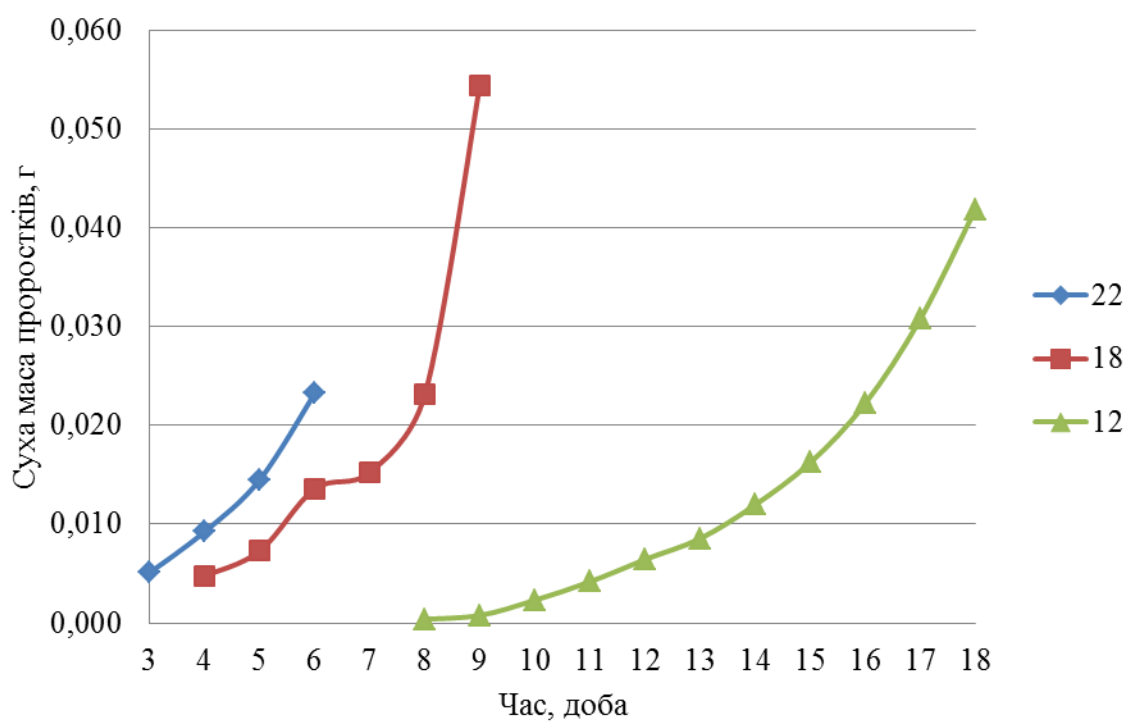


Рис. 2.3. Динаміка накопичення сухої маси проростка за температур 22, 18 та 12°C.

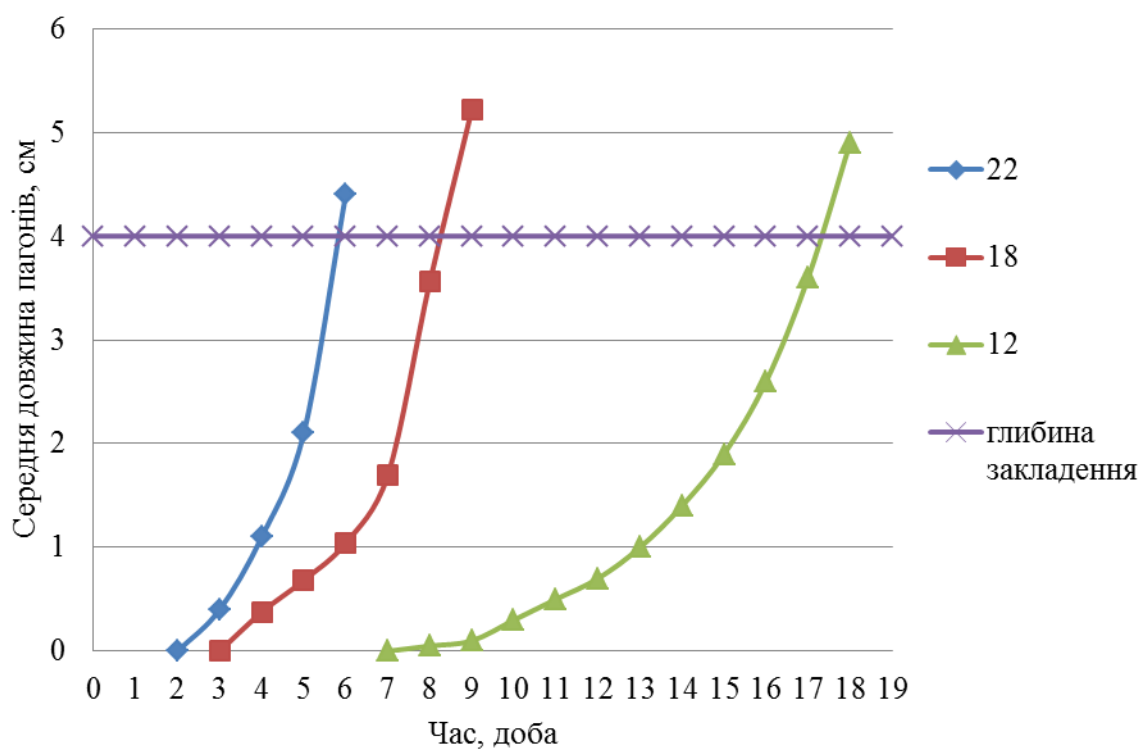


Рис. 2.4. Динаміка росту пагонів за температур 22, 18 та 12°C.

Друга серія експериментів проводилася за умови підтримання постійної температури 18°C та оптимального зволоження. Для запуску ростових процесів знадобилося 4 доби від початку експерименту. За першу добу вологість насіння збільшилася вже на 16% та склала 28% (рис. 2.1). Далі інтенсивність зменшувалася і вміст води зріс лише на 6% за другу добу та на 2% за наступні дві доби.

З четвертої доби розпочався ріст осьових органів проростка. Вже в першу добу після набубнявіння насіння середня маса одного сухого проростка склала майже 5 мг (рис. 2.3), та збільшилася на 2,5 мг за наступну добу, а довжина колеоптилю подвоїлася від початкової довжини трохи більшої 3 мм (рис. 2.4). У шості добу після висіву суха маса проростка становила вже 15 мг з довжиною колеоптилю 1 см. За наступні дві доби спостерігалось прискорення процесу подовження колеоптилю, коли середня довжина одного пагона досягла 3,6 см, його маса склала на цей момент 23 мг. На дев'яту добу після початку експерименту пагін перевищив умовне значення глибини закладення, була відмічена поява сходів.

Третя серія експериментів була проведена за умови підтримання постійної температури 12°C на протязі всього періоду та оптимального зволоження.

На відміну від досліду при 22°C, де запуск ростових процесів відбувся вже після другої доби від початку експерименту, насіння проклонулося лише через тиждень після висіву.

Накопичення води відбувалося досить повільно (рис. 2.1). Однак, слід зазначити, що інтенсивність накопичення води у першу добу після висіву була досить високою. Так за перші 24 години вона зросла на 16% від початкового значення, вологість насіння склала 28% (рис. 2.2). За другу добу вона збільшилася лише на 5%, у третю та четверту – лише на 2% за добу. У п'яту добу інтенсивність накопичення води склала лише 1,6%, та менше 1% у шосту добу.

Запуск ростових процесів відбувся лише на сьому добу, коли

проклонулося 85 % насінин.

Накопичення сухої маси проростком та подовження пагону відбувалися досить повільно. Від набубнявіння насіння до умовної появи сходів знадобилося 11 діб. Весь період від висіву до сходів склав 18 діб (що утричі довше, ніж за умови оптимальної температури 22°C).

Перші дві доби після того, як насіння проклонулося маса проростків та довжина практично не змінювалася, та помітного росту колеоптилю не спостерігалось. Лише на 9 добу після висіву з'явився пагін довжиною близько 1 мм. Вже на 10 добу він досяг довжини 3 мм, вага проростка склала 2 мг (рис. 2.3). На 13 добу довжина пагона досягла 1 см (рис. 2.4), а вага проростка майже 9 мг. Наступні кілька діб пагін подовжувався на 4-5 мм на добу, та приріст ваги проростка становив 3-4 мг. На 16 добу маса проростка склала 22 мг, а довжина пагона майже досягла 3 см.

Лише на 18 добу колеоптиль досяг довжини 4 см, а отже за умов експерименту – з'явилися сходи.

Слід відмітити, що коли насіння проклонулося першим починає рости корінець та інтенсивність його росту значно більша, аніж інтенсивність росту колеоптилю. Крім того, за 1 – 2 доби від першого зачаткового корінця починають рости додаткові корені. Але коли довжина колеоптилю складає близько 3 – 4 см, ріст коренів сповільнюється на користь росту пагона.

У середньому за період посів – сходи доля пагону у проростку складає 40% від його загальної маси.

У всіх проведених дослідках спостерігався різкий стрибок інтенсивності поглинання вологи насіння у першу добу після висіву. Надалі цей процес затухав та завершувався, коли вологість насіння досягала близько 38 – 40%. З моменту запуску ростових процесів у насінні у всіх випадках спостерігалось поступове збільшення сухої маси проростків та подовження колеоптиля. Їх інтенсивність прямо пропорційно залежала від температури, тобто її підвищення прискорювало зазначені процеси.

Отже, в результаті проведеного експерименту встановлено, що за умов

оптимального зволоження та без урахування опору ґрунту, температура оточуючого середовища в значній мірі впливає на всі процеси, що протікають у насінні під час його проростання. Тобто за таких умов саме температура є головним регулятором інтенсивності процесів та лімітуючим фактором. Так з підвищенням температури насіння інтенсивніше накопичує вологу та набубнявіє, а після покльовування осьові органи швидше накопичують суху масу та колеоптіль досягає глибини закладення.

Розглянемо отримані результати спостережень за вмістом вуглеводів. В результаті визначення вуглеводів встановлено, що з часом їх вміст зменшується, що пояснюється тим, що вони використовуються на утворення нової рослинної тканини для росту осьових органів. Було взято 3 зразки щодоби з вилученням проростка та 1 контрольний зразок (ціле зерно з зародком). У контрольному зразку вміст вуглеводів склав 68,46%. Зразок який був взятий у день запуску ростових процесі містив 66,54% вуглеводів, зразки взяті у наступні два дні містили 64,61 та 62,86 % відповідно. Отже, щодоби на ріст проростка витрачається близько 2 % сухої ваги зернівки.

2.2.3. Узагальнення отриманих результатів лабораторного експерименту.

Реалізація лабораторного експерименту з пророщування насіння кукурудзи дозволила більш детально вивчити процеси, що відбуваються у насінні у період від посіву до сходів. А також отримати фактичний матеріал з метою подальшого його використання для реалізації моделі та проведення чисельних експериментів. Отримані числові значення як початкових параметрів насіння, так і параметрів, що характеризують динаміку та співвідношення процесів, що відбуваються у насінні під час проростання.

Отримані нами результати проведення лабораторного експерименту близькі до результатів експериментальних досліджень попередніх авторів з пророщування насіння деяких культур. Так наприклад у роботі

О.В. Мушкетової та А.С. Казакової [55] описується процес набубнявіння ярового ячменю у перші години після змочування. Автори також наголошують на тому, що одразу після контакту з водою насіння поглинає воду значно швидше, аніж надалі, тобто спостерігається різкий стрибок інтенсивності проходження цього процесу. У випадку пророщування вівса авторами [107] також встановлено, що найбільша інтенсивність процесу спостерігається саме при температурі середовища 22°C, що обумовлюється дифузією води у насінні. У роботі [115] при пророщуванні насіння різних культур встановлено лімітуючу дію температури на проростання. Особливо підкреслюється прискорення процесів поглинання вологи насінням при зростанні температури.

Висновки до розділу 2

1. Ріст і розвиток рослин від посіву до сходів є критичним періодом, протягом якого закладаються основи майбутньої рослини, від умов його проходження залежить весь хід вегетаційного розвитку та врожай, як наслідок. Найбільший вплив на процес проростання мають температура, вологість ґрунту та глибина закладення насіння.

2. В ході проведеного лабораторного експерименту з пророщування насіння кукурудзи встановлено вплив температури на поглинання вологи насінням, накопичення сухої маси проростком та подовження колеоптиля. Представлені результати дозволяють детальніше вивчити процеси, що відбуваються у насінні в період від посіву до сходів, а також отримати фактичний матеріал для параметризації моделі та проведення чисельних експериментів.

3. Встановлено, що при температурі 22 °C інтенсивність накопичення вологи зернівкою становить 17% на добу (в перерахунку від сухої маси) за першу добу, та 6% на другу добу. У третю добу темпи накопичення вологи

сповільнюються до 3% на добу та на поверхню з'являється до 90% проростків. Надалі вологість насіння практично не змінюється. Довжина колеоптилю, необхідна для появи його на поверхні ґрунту (4 – 5 см), досягається за 6 діб, середня суха маса проростка у цей момент становить 23 мг.

4. При температурі 18 °C інтенсивність накопичення вологи зернівкою становить 16% на добу за першу добу, 6% за другу добу та 2% за наступні дві доби. Насіння набубнявіє на четверту добу після висіву. Сходи з'являються на дев'яту добу з середньою сухою масою проростка трохи більшою за 23 мг.

5. Температура 12 °C є найменш сприятливою для розвитку проростка. Темпи накопичення вологи та росту сповільнені. За першу добу після висіву насіння накопичує 16% вологи, за другу – 5%. Однак за послідовні дні цей показник становить лише 1 – 1,6%, а запуск ростових процесів відбувається лише за тиждень, коли набубнявіє 85% насіння. Сходи з'являються за 18 діб.

6. В результаті визначення вуглеводів встановлено, що протягом росту молодій рослині їх вміст зменшується, оскільки вони використовуються на утворення рослинної тканини осьових органів. Експериментально встановлено, що при оптимальних умовах з моменту набубнявіння насіння на ріст проростка щодоби витрачається близько 2 % сухої маси зернівки.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ СХОДІВ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

3.1. Сучасний стан розробки моделей розвитку зернових культур на ранніх етапах онтогенезу

На сьогоднішній день відома велика кількість моделей розвитку різних культур. Проблемою прогнозування урожайності в тій чи іншій мірі займаються науковці всіх країн з розвинутим сільським господарством. Найбільші досягнення в цьому плані мають Сполучені Штати Америки [114, 116, 118] та Європейська Комісія [112, 120, 126]. В Україні також було проведено низку досліджень, на основі яких розроблено статистично-біологічні моделі прогнозування урожайності сільськогосподарських культур. Ряд вчених займалися моделюванням врожаїв саме зернових культур, зокрема, А.М. Польовий, П.В. Дмитренко, О.М. Дрозд, В.С. Антоненко та інші. Такі моделі імітують ріст та розвиток рослин під впливом широкого ряду факторів навколишнього середовища [2, 25, 30, 65].

Більшість моделей ранніх етапів розвитку існують як складові блоки моделей «погода – врожай», але виділяються і деякі самостійні моделі. Моделюванням періоду розвитку від висіву до сходів займалися як вітчизняні, так і зарубіжні автори.

Моделі можуть враховувати широкий спектр факторів навколишнього середовища, що впливають на проростання, хоча існують і простіші моделі, які враховують вплив лише кількох факторів [7, 16, 20]. Такі моделі є простішими у застосуванні, але часом поступаються у точності багатофакторним моделям [28, 57]. Однак не можна однозначно сказати, які з них краще застосовувати на практиці, адже всі вони мають низку переваг та

недоліків [53].

В якості вхідної інформації моделі зазвичай використовують параметри ґрунту (його вологість, температуру, водний потенціал тощо) та посівного матеріалу (масу та розмір, вологість, водний потенціал, проникність оболонки насіння тощо). Результатами розрахунків моделей є терміни появи та повнота сходів. Детальніше зупинимось на існуючих моделях цього періоду.

Модель розроблена А.М. Польовим, М.А. Строгановою та А.І. Коровіним [93] складається з блоків, які описують послідовні та одночасні фізіолого-біохімічні процеси, такі як гідроліз запасів ендосперму, дихання, розподіл продуктів гідролізу між органами проростка та мобілізація їх для росту зародка, а потім проростка. Ці процеси визначають швидкість росту проростка та повноту сходів. Оскільки гідроліз та дихання регулюються вологістю насіння, тому в моделі врахована також швидкість поглинання води $\left(\frac{dm}{dt}\right)$, що складається з фаз простої дифузії та осмосу і представлена рівнянням

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} c(m_s - m) & \text{при } m_0 \leq m < m_{crit}^1, \\ k_w A(\psi^{out} - \psi^{in}) & \text{при } m_{crit}^1 \leq m < m_{crit}^2, \end{cases} \quad (3.1)$$

де m_s – максимальна кількість води, що може бути поглинута шляхом дифузії; m – кількість поглинутої води в момент t ; m_0 – вологість насіння при посіві; m_{crit}^1 , m_{crit}^2 – критичні значення вологості, що визначають початок гідролізу та час проростання насіння; c – коефіцієнт швидкості набухання; k_w – коефіцієнт проникності; A – коефіцієнт, що характеризує розміри насіння; ψ^{out} , ψ^{in} – водні потенціали середовища набухання та насіння.

Швидкість проростання оцінюється за співвідношенням

$$c = k_D D, \quad (3.2)$$

де k_D – коефіцієнт, який відображує вплив розмірів насіння;
 D – дифузивність.

Дифузивність, як функція температури, описується рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3.3)$$

де D_0 – дифузивність при нескінченно високій температурі; E – енергія активації дифузії; R – газова стала; T – абсолютна температура.

При описі процесів гідролізу запасів крохмалю і білка автором взято за основу рівняння кінетики ферментативного каталізу. При високій концентрації гідролізованого субстрату реакція гідролізу має псевдонульовий порядок з субстрату, а при низькій концентрації вона наближається до реакції псевдопершого порядку:

Наступний блок моделі присвячений диханню насіння. На першому етапі поступове посилення дихання обумовлене рівнем вологості, досягнутим насінням, а не утрудненим доступом кисню або нестачею дихальних субстратів. На другому етапі дихання різко посилюється, воно регулюється рівнем дихального субстрату і не залежить від подальшого підвищення оводненості. Третій етап відображає інтенсивність дихання зростаючих осьових органів, яким притаманні більш високі рівні вологості, оскільки клітини їх вакуолізуються і розтягуються. Дихання зародка і паростка моделюється як дихання росту і дихання підтримки структур [73].

У наступному блоці моделі описаний розподіл вуглецю та азоту. Авторами при побудові моделі було прийнято, що зародок і проросток складаються з двох компартментів: паростка (колеоптиля з вміщеним всередині нього листям) та кореня. Зародок розглядається як однорідна меристематична тканина. Колеоптиль проростка в період від проростання до

сходів проходить фазу поділу і розтягнення клітин, причому до моменту сходів колеоптиль вважають листом, що закінчив зростання. У корені як діляться, так і розтягуються клітини. Розподіл вуглеводів і азоту здійснюється за співвідношенням C/N, яке в процесі росту змінюється (в меристематичних клітинах воно мінімальне, при розтягуванні зростає). Приймаючи, що продукти гідролізу білка переміщуються в зародок (проросток) повністю і на даній фазі розвитку конкуренція за азот між органами відсутня [68], можна представити розподіл азоту і вуглецю наступними рівняннями:

$$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i \frac{dN_{end}^{RES}}{dt}, \text{ при } \frac{dN_{e(sl)}^W}{dt} = \frac{dN_{end}^F}{dt}, \quad (3.4)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i k_m \frac{dN_i}{dt}, (i \in r, sh), \quad (3.5)$$

де $\frac{dN_i}{dt}, \left(\frac{dC_i}{dt}\right)$ – швидкість розподілу азоту (вуглеводів) в i -тий орган; α_i – постійний коефіцієнт швидкості розподілу азоту; γ_i – коефіцієнт швидкості розподілу азоту в i -тий орган; k_m – коефіцієнт, який враховує вплив вологості ґрунту.

Вищезазначене рівняння (3.5) дійсне за умови

$$\frac{dC_r}{dt} + \frac{dC_{sh}}{dt} = \left(\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} - \frac{dR_{e(sl)}}{dt} \right) + \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} k_{PR}, (i \in r, sh), \quad (3.6)$$

де k_{PR} – коефіцієнт для розрахунку кількості вуглецю в гідролізованому білку.

Накопичення сухої маси i -тим органом описується рівнянням

$$\frac{dW_i}{dt} = k_c \frac{dC_i}{dt} + \frac{dN_i}{dt}, \quad (3.7)$$

де $\frac{dW_i}{dt}$ – швидкість накопичення сухої маси; k_c – коефіцієнт для перерахунку вуглецю на органічну речовину.

Швидкість подовження пагона визначається як функція швидкості накопичення сухої маси пагоном з урахуванням опору ґрунту. Механічний опір ґрунту завдає істотного впливу на швидкість лінійного росту проростків в період до появи сходів.

Описані авторами в моделі процеси і зв'язки між ними представлені за допомогою символіки Форрестера. Модель була чисельно реалізована на ЕОМ, програма записана на мові Фортран IV.

Простіші моделі ранніх етапів розвитку зернових розглядають динаміку процесів, що відбуваються в насінні, як перерозподіл мас між запасними та зростаючими органами. Тобто після набору необхідної кількості вологи насінням активізуються ростові процеси у проростку, з цього моменту запасні речовини ендосперму поступово витрачаються на ріст осьових органів. У такому випадку враховується лише фізика процесу проростання.

Згідно моделі В.М. Павлової [63], набухання зернівки можна описати таким рівнянням

$$\theta^{j+1} = \theta^j + \delta_w \xi(T) \eta(j) (\theta_s - \theta^j), \quad (3.8)$$

де θ – вологість зерна в j -ту та $(j+1)$ -у добу; θ_s – вологість зерна, при якій насіння наклюнується; $\xi(T)$, $\eta(j)$ – функції, що враховують вплив навколишнього середовища; δ_w – одинична функція, яка дорівнює одиниці в діапазоні доступної вологи та нуль – поза цим діапазоном. Розрахунок ведеться доки $\theta^{j+1} \leq \theta_s$.

Динаміка маси зернівки, кореня та пагона представлена системою рівнянь

$$\begin{cases} m_S^{j+1} = m_S^j - (m_S^j R_0 \varphi_T + \Delta m_S^j), \\ m_h^{j+1} = m_h^j + \alpha_h(T, W) \Delta m_S^j, \\ m_r^{j+1} = m_S^j - m_h^{j+1}, \end{cases} \quad (3.9)$$

де m_P ($P \in S, h, r$) – маса органа в j -ту та $(j+1)$ -у добу; R_0 – коефіцієнт дихання підтримки; φ_T – температурний коефіцієнт дихання; $\alpha_h(T, W)$ – частка поживних речовин, направлена на ріст; Δm_S^j – зміна маси зерна за j -ту добу.

Складнішу модель проростання та формування сходів запропонував В.С. Антоненко [3]. В ній враховані водні потенціали насіння та ґрунту, гідроліз запасних речовин та дихання зернівки і проростка.

Швидкість гідролізу $\left(\frac{dm_{cem}^{гидр}}{dt} \right)$ в моделі описана рівнянням

$$\frac{dm_{cem}^{гидр}}{dt} = K_{cem}^{гидр} m_{cem} k_{cee}(T_n), \quad (3.10)$$

де $K_{cem}^{гидр}$ – коефіцієнт швидкості гідролізу; m_{cem} – маса насіння; $k_{cem}(T_n)$ – функція впливу температури ґрунту на глибині закладки насіння на швидкість гідролізу запасних речовин.

Витрати на дихання насіння $\left(\frac{dR_{cem}}{dt} \right)$ представлені у вигляді рівняння

$$\frac{dR_{cem}}{dt} = c_m m_{cem} Q_R(T_n), \quad (3.11)$$

де c_m – коефіцієнт витратна дихання підтримки; $Q_R(T_n)$ – функція впливу температури ґрунту на інтенсивність дихання насіння. Частина поживних

речовин, що залишилися після витрат на дихання є резервом для росту кореня та колеоптилю.

В моделі О.А. Немченко та Л.І. Мусаменко росту та метаболізму рослин на ранніх етапах онтогенезу [58] аналізувалися три основні складові процесу проростання: гідроліз запасних речовин і утворення фондів, транспорт фондових речовин проростку, синтез з них нової структурної фітомаси. Моделювалися перетворення і динаміка вуглеводів і азотовмісних речовин при постійних умовах зовнішнього середовища. Із структурних речовин у модель були включені складні вуглеводи і білки. У кожному компартменті виділено два фонди лабільних речовин – фонд вуглеводів, що складається з моно- і олігосахаридів, і фонд азоту, який складається з амінокислот. Підтримання життєздатності насіння і проростків, що включають білковий обмін, і підтримка іонного градієнта на мембранах вимагає витрат енергії, які враховуються в моделі у вигляді дихання підтримання. Витрати енергії, необхідні для створення нової структурної маси, характеризуються диханням росту.

В імітаційній системі AGROTOOL основою є динамічна модель, яка описує продукційний процес польових культур. Вона має блочну структуру і включає опис процесів, що мають місце в системі «грунт – рослинний покрив – приземний шар повітря» [106]. Ця система була побудована на основі моделі Р.А. Полуектова [71].

Вся модель поділена на послідовні підмоделі: поглинання води насінням, вуглеводно-азотного метаболізму, вуглеводно-азотної взаємодії в ендоспермі, вуглеводно-азотної взаємодії в проростку.

При моделюванні балансу вологи відображені процеси поглинання вологи із зовнішнього середовища через поверхню ендосперму та зародку і транспорту вологи з ендосперму у проросток. Крім того, враховано, що при появі кореня баланс вологи проростка може поповнитися і за рахунок кореневого поглинання [6]. Також автор описує водний режим єдиною динамічною змінною, без розподілу на вегетаційні органи та зародок.

Згідно Р.А. Полуектова, динаміку росту основних біометричних показників моделі можна описати наступною системою диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dB_l}{dt} = SHARE \cdot \frac{dB_{st}}{dt}, \\ \frac{dB_r}{dt} = (1 - SHARE) \cdot \frac{dB_{st}}{dt}, \\ L_l = BL_l \cdot B_l, \\ L_r = BL_r \cdot B_r, \end{cases} \quad (3.12)$$

де B_l , B_r – суха біомаса пагона та кореня, L_l , L_r – довжина листа та кореня, BL_* – коефіцієнт конверсії сухої структурної біомаси в довжину для обраного органа рослини. Алгоритм ростової регуляції, виражений за допомогою змінної $SHARE$, набуває значення від 0 до 1.

Недоліком існуючих вітчизняних моделей прогнозування врожайності є те, що вони враховують лише декілька основних метеорологічних параметрів, зокрема середньодобову температуру та кількість опадів. Майже всі інші параметри не враховуються взагалі, або враховуються опосередковано. Залучення до моделі прогнозування врожайності якнайбільшої кількості метеорологічних та агрометеорологічних параметрів є запорукою покращення якості прогнозу та підвищення його завчасності [42].

Зарубіжними авторами [123] було проведено ряд експериментів з пророщування насіння в закритому ґрунті, на основі яких було визначено загальну бета-функцію, що описує залежність рівня проростання від температури

$$GR = \exp(\mu)(T)\alpha(42 - T)\beta. \quad (3.13)$$

В моделі за найнижчу температуру, при якій припиняється будь-який ріст, представлений $T_b = 0^\circ\text{C}$; $T_c = 42^\circ\text{C}$ – критичний рівень температури. На основі регресійного аналізу було визначено значення параметрів бета-

функції: $\mu = -8.0166$, $\alpha = 1.80$ та $\beta = 0.72$.

Для бета-функції оптимальна температура (T_0) та оптимальне значення DDR (рівень щоденного розвитку) – T_0 (DDR_0) можна визначити на основі зазначених п'яти параметрів моделі:

$$T_0 = \frac{\alpha T_c + \beta T_b}{\alpha + \beta}, \quad (3.14)$$

$$DDR_0 = \exp(\mu) \alpha^\alpha \beta^\beta \left(\frac{T_c - T_b}{\alpha + \beta} \right)^{\alpha + \beta}. \quad (3.15)$$

Визначено, що за оптимальної температури, біля 30°C , рівень проростання при T_0 становить близько 0,9 на день.

Автори [113] пропонують визначати швидкість проростання насіння за таким рівнянням

$$CGV = \frac{\sum N_j}{\sum N_j d_j}, \quad (3.16)$$

де N_j – кількість пророслих насінин за d_j днів після початкового поливу (посадки) та j – номер спостереження. CGV змінюється в межах від 0 до 1. Крім того, визначався індекс температури проростання (GPI). Рівень проростання при нормальних умовах (GR_i^{REF}) прямо пропорційний кількості днів після посадки (DAP_i)

$$GR_i^{REF} = 1 / DAP_i. \quad (3.17)$$

Рівень появи сходів (ER_i) можна розрахувати за такою формулою

$$ER_i = ER^{REF} \cdot ETI \cdot EWI, \quad (3.18)$$

де ER^{REF} – рівень появи сходів за нормальних умов; а ETI та EWI – функції впливу температури та осмотичного потенціалу на подовження осьових органів відповідно.

Автор [121] відокремлює стан спокою насіння. Модель базується на припущенні, що для початку розвитку необхідно накопичення «термічного часу». Для цього розраховується сума ефективних температур згідно рівняння, наведеного нижче,

$$TT_{ar} = (T_s - T_l)t_{ar}, \quad (3.19)$$

де TT_{ar} – термічний час розвитку; T_s – накопичення температур; T_l – критичний рівень температури, при якому розвиток не відбувається; t_{ar} – час, що потрібен для досягання.

Також модель розраховує втрати після початку розвитку насіння через зміну водного потенціалу середовища, що дозволяє отримати 50% пророслого насіння ($\psi_{b(50)}$). Модель припускає, що ($\psi_{b(50)}$) є лінійною функцією TT_{ar} . Зменшення $\psi_{b(50)}$ за весь період виражене рівнянням

$$\psi_{b(50)decrement} = \frac{\psi_{b(50)initial} - \psi_{b(50)final}}{TT_{ar}}. \quad (3.20)$$

Крім основних факторів ґрунту, що визначають проростання насіння, зазначених у моделях попередніх авторів тут включається також якість повітря у ґрунті.

За останні кілька десятиліть було створено ряд математичних моделей росту культур, таких як CERES, WOFOST, SUCROS, APSIM, InfoCrop тощо, які також враховують ранні етапи розвитку [112, 126].

Механістичні моделі зростання використовуються для дослідження процесу засвоєння вуглецю і приросту біомаси. Як правило, моделюється ріст рослин під впливом метеорологічних параметрів, характеристик ґрунту і складу внесених добрив. Типовими вхідними даними є температура, кількість опадів, кількість сонячної радіації; кількість і тип добрив, щільність насаджень, параметри іригації і обробки, тип, глибина верхнього шару, вміст гумусу в ґрунті. Більшість моделей застосовні тільки до одного виду рослин, наприклад, SOYGRO для бобових, CERES-Maize для кукурудзи, CERES-Wheat для пшениці, WARM для рису. Відомі також універсальні моделі SUCROS (Simple and Universal Crop growth Simulator), STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard), WOFOST. Переваги механістичних моделей – фізична обґрунтованість і менші вимоги до обсягів калібрувальних даних у порівнянні зі статистичними моделями. Серед недоліків розглянутих моделей – обчислювальна складність [48, 26].

Так, наприклад, фізіологічна модель росту сільськогосподарських культур WOFOST імітує ріст пшениці в заданих ґрунтових і метеорологічних умовах з кроком у часі в один день. Накопичення біомаси обчислюється як функція метеопараметрів, таких як: радіація, температура, опади тощо. Показниками продуктивності є повна біомаса, листовий індекс, фенологічні стадії зростання, врожайність. Як і всі математичні моделі, WOFOST дає спрощене уявлення про реальність. Але передбачається ідеальний стан культури за відсутності засмічення і хвороб [95].

Деякі моделі врожаю також використовують данні дистанційного зондування Землі. Так, наприклад, проект моніторингу агроресурсів та прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за допомогою методів дистанційного зондування MARS (Monitoring of Agriculture with Remote Sensing) було започатковано в 1988 році Об'єднаним науково-дослідним центром JRC (Joint Research Center, м. Іспра, Італія) з метою отримання незалежної та своєчасної інформації про посівні площі основних сільськогосподарських культур, їх стан, біопродуктивність та прогнози

врожайності з використанням інформації дистанційного зондування землі.

Оперування агрометеорологічними моделями та базою даних включає поєднання метеорологічних даних з процесами формування біомаси з використанням допоміжної інформації (параметри сільськогосподарських культур та ґрунту, дані адміністративних одиниць), введеної у вигляді фундаментальних доповнень для даного моделювання [34].

Параметри сільськогосподарських культур поділяють на дві категорії. Перша – описує ріст і розвиток культури, друга – просторове і часове розповсюдження певної культури та прив'язку до кліматичної мережі. Ґрунтові параметри визначають придатність певного типу ґрунту для вирощування тієї чи іншої культури. До таких параметрів відносять клас глибини проникнення коріння, фізичну групу, – тобто ті, які впливають на вологозабезпеченість рослин. Також розрізняють параметри ґрунту, які обмежують ріст рослин, наприклад, кут схилу, кислотність, засоленість тощо [43].

Метою проекту MARS є адаптація європейської системи моніторингу агроресурсних систем до умов основних ґрунтово-кліматичних зон України. Серед головних завдань системи – впровадження та калібрування системи моніторингу росту сільськогосподарських культур (CGMS – Crop Growth Monitoring System), адаптація моделі та розробка рекомендацій з прогнозування врожайності основних сільськогосподарських культур в умовах різних ґрунтово-кліматичних зон України [42].

Досить поширеною імітаційною моделлю врожаю є модель розроблена у США CERES (оцінка врожаю через синтез ресурсів і навколишнього середовища) для пшениці та спеціалізована для кукурудзи (CERES-Maize). Ця модель була успішно протестована з даними різних країн світу (Канада, США, Бразилія тощо) [124].

CERES-Maize дає повний прогноз врожайності, а також окремо описує основні етапи розвитку кукурудзи, а саме: проростання, викидання волоті, кінець вегетативного розвитку, колосіння, дозрівання насіння. Довжина

кожної фенологічної фази моделюється виходячи з генетики рослин, погоди та інших факторів навколишнього середовища. Температура повітря врахована в якості основного фактору впливу на розвиток рослин. Темпи розвитку пропорційні температурі повітря, коли вона знаходиться в інтервалі 8 – 36°C. Деякі фази контролюються лише температурою повітря, як наприклад, період від проростання до появи сходів, від появи сходів до кінця фази дозрівання, коли решта мають значний вплив інших факторів. Слід зазначити, що період від висіву до проростання також залежить від рівня зволоженості ґрунту. Крім того, використовуються генетичні коефіцієнти для установки генотипово-специфічних аспектів розвитку кукурудзи.

Прогнози отримані за допомогою цієї моделі були оцінені, як ті, що добре узгоджені з натурними даними вимірювань, зазначаючи, що моделювання з використанням комбінації історичних кліматичних і поточних погодних даних забезпечують вичерпну оцінку показників врожаю. Використання цих передбачень дозволяє виробникам та громадянам зайнятим у сфері агробізнесу обирати альтернативні дії для мінімізації втрат, у разі очікування малих врожаїв [128].

Однак, слід зазначити, що у більшості експериментів, в 50% випадків згідно прогнозу моделі сходи повинні були з'явитися через 3 дні після посіву, але фактично вони спостерігалися через 8 днів, як описано в історичних підбірках даних. Затримку появи сходів було складно змодельовати за допомогою CERES-Maize. Тому в більшості випадків в якості дати настання фази сходів була встановлена фактична дата появи сходів. Зазначений факт ще раз підкреслює необхідність розробки моделі розвитку зернових на ранніх етапах, а саме від висіву до появи сходів [117].

Співвідношення потенційно доступного та фактичного вмісту вологи у ґрунті в моделі CERES запропоновано визначати для кожного шару ґрунту послідовно від верхнього шару. На стадії проростання насіння важливим є значення лише для верхнього шару, котре визначається за наступною формулою:

$$SWR = \frac{SW(1) - LL(1)}{DUL(1) - LL(1)}, \quad (3.21)$$

де SWR – безпосередньо співвідношення вмісту води; $SW(1)$ – початковий вміст води у верхньому шарі ґрунту (шар 1); $LL(1)$ – нижня межа використання рослиною ґрунтової води з шару 1; $DUL(1)$ – верхня суха межа шару 1 [118].

Рівень появи листя (X_n) у моделі CERES визначається згідно наступного рівняння

$$X_n = A \cdot (CUMDTT)^B, \quad (3.22)$$

де X_n – кількість листів на пагоні; $CUMDTT$ – загальний денний рівень, розрахований як сума різниць між середньою добовою температурою та ефективною температурою (8°C); A та B – емпіричні коефіцієнти (0,0105 та 1,1116 відповідно). Слід зазначити, що це рівняння використовується і для визначення появи першого листка, тобто для появи сходів [125].

Розглянемо статистичні підходи моделювання та методи прогнозів періоду «посів – сходи» зернових культур.

Прогноз строків появи сходів для кукурудзи було розроблено Ю.І. Чірковим. Даний метод прогнозу заснований на залежності швидкості розвитку кукурудзи в період «посів – сходи» від температури та вологості ґрунту з урахуванням глибини загортання насіння. Вихідними даними у цьому прогнозі є температура ґрунту на глибині загортання насіння та запаси продуктивної води в орному шарі та шарі 0 – 10 см, а також безпосередньо сама глибина загортання насіння. Згідно прогнозу погоди та кліматичних даних визначається очікуваний температурний режим найближчих декад. Далі розраховується дата накопичення суми температур за наступним рівнянням

$$D = D_1 + \frac{83 + 7(h - 4)}{K_w(t - 8)}, \quad (3.23)$$

де D – прогнозна дата появи сходів; D_1 – вихідна дата прогнозу; t – середня температура ґрунту; h – глибина загортання насіння; K_w – коефіцієнт. Цей прогноз має практичне значення як у північних, так і в південних районах вирощування кукурудзи. Однак, на думку автора прогнозу, даний прогноз дає кращі результати в умовах поля, на котрому визначається температура ґрунту, оскільки різна експозиція схилів на різних полях може викликати нерівномірний прогрів та просихання шарів ґрунту. Саме тому даний прогноз має найбільш високу виправданість, коли враховуються умови конкретних господарств [108].

В.П. Дмитренко була отримана залежність між тривалістю періоду «посів – сходи» та середньою температурою [23]. На основі експериментальних даних Т.Д. Лисенка в котрих був виключений випадковий вплив вологості ґрунту, розмір насіння і глибина його закладення, а також неточність фенологічних спостережень, були отримані графіки залежності появи 50% сходів від середньої температури цього періоду для ячменю, вівса, жита та пшениці [49]. Для аналітичного вираження отриманих кривих було підібране наступне рівняння, за умови, що y – це функція, а x – аргумент

$$y = e^{f(x)}. \quad (3.24)$$

Після перетворення рівняння набуває наступного вигляду та з нього визначають $f(x)$:

$$\lg y = f(x) \lg e, \quad (3.25)$$

$$f(x) = \frac{\lg y}{\lg e}. \quad (3.26)$$

Далі було побудовано графік в координатах x і $f(x)$, якому в даному випадку відповідає рівняння

$$f(x) = \frac{1}{ax^2 + bx + c}. \quad (3.27)$$

Після дослідження рівняння (3.27) підставляють його праву частину у рівняння (3.26)

$$\frac{1}{ax^2 + bx + c} = \frac{\lg y}{\lg e}. \quad (3.28)$$

Рівняння вирішують відносно коефіцієнтів a , b та c після чого будують теоретичну криву та перевіряють її збіжність з дослідною. Отриманий експериментальний графік описують наступним рівнянням

$$y = e^{\frac{1}{ax^2 + bx + c}}. \quad (3.29)$$

Враховуючи попередні вирази рівняння записується наступним чином

$$\tau = e^{\frac{1}{at^2 + bt + c}}. \quad (3.30)$$

Способом найменших квадратів В.П. Дмитренком були отримані

наступні значення коефіцієнтів: для ячменю, вівса та жита $a=0,0006$; $b=0,0175$; $c=0,21$; для пшениці $a=0,000275$; $b=0,015$; $c=0,2$.

Відношення найменшої тривалості періоду розвитку до тривалості при даній температурі відображено за допомогою швидкості розвитку рослин у відносних одиницях, та описує так званий коефіцієнт корисної дії температури для розвитку. Після деяких перетворень це вираження представлено рівнянням

$$\eta = 4e^{-\frac{1}{at^2+bt+c}}. \quad (3.31)$$

У такому разі відносна швидкість добового розвитку при даній температурі η_c рівна

$$\eta_c = e^{-\frac{1}{at^2+bt+c}}. \quad (3.32)$$

Далі послідовно складаються значення відносної швидкості добового розвитку, отримують сумарний ефект швидкості розвитку рослин в залежності від температурних умов. Прийнято вважати, що термічний режим сприяв настанню тої чи іншої фази розвитку, при інших рівних умовах, якщо величина сумарного ефекту за деякий період рівна або трохи більше одиниці.

На основі проведених чисельних експериментів В.П. Дмитренко та порівнянь з іншими існуючими методиками прогнозів настання фази сходів було виявлено, що даний підхід дозволяє досить точно прогнозувати дату появи сходів з можливим відхиленням у один – три дні. Також було проведено співставлення значень швидкості розвитку різних культур. Незначні розбіжності були обумовлені недостатньою точністю визначення коефіцієнтів. Незначна похибка значень при порівнянні з польовими даними була обумовлена неточністю проведення фенологічних спостережень, адже у

більшості польових книжок згідно з вимогами Настанови дається окомірною оцінка [24].

А.П. Федосєєвим були описані зональні особливості появи сходів залежно від умов зволоження та виникнення ґрунтових кірок [102]. Було виявлено кореляційну залежність, описану наступним рівнянням

$$x_6 = 40,22 - 26,39 \lg x_7, \quad (3.33)$$

де x_6 – тривалість періоду, x_7 – середня температура повітря за цей період.

Н.А. Зубарєвим були встановлені деякі залежності між швидкістю проростання насіння та строками появи сходів зернових культур при різних агрометеорологічних умовах, а також розроблена методика визначення вологості ґрунту математичним способом [31]. При достатньому зволоженні ґрунту швидкість проростання насіння залежить лише від температури та може бути виражена за допомогою гідротермічного коефіцієнту проростання (ГТК), за яким визначається строк появи сходів посівів. Ці коефіцієнти показують, у скільки разів швидше або повільніше йде проростання при будь-якій даній температурі, у порівнянні зі швидкістю проростання за температури $+5^\circ\text{C}$. Експериментально встановлено, що масові сходи зернових з'являються тоді, коли сума добових коефіцієнтів проростання досягає 14.

Для багатьох кормових злаків константа для появи сходів складає суму гідротермічних коефіцієнтів близько 20, для кукурудзи – 25.

Також Н.А. Зубарєвим встановлено, що при недостатньому зволоженні ґрунту швидкість набубнявіння насіння залежить не лише від проникності плазми та кінетичної енергії молекул води, а і від швидкості пересування крапельно-рідкої води у ґрунті, тобто не лише від температури, а і від вологості ґрунту. Чим слабше зволоження ґрунту, тим менше значення має зміна температури і тим більшого впливу набуває зміна вологості ґрунту. При сильному недозволоженні процес проростання насіння незалежно від

температури припиняється. Через це для самих ранніх посівів ярових або лише у самі сприятливі по зволоженню роки швидкість проростання насіння та строки появи сходів можна визначити за ходом однієї лише температури. Тому у більшості випадків процеси проростання насіння (особливо озимих) сповільнюються нестачею вологи в ґрунті і для визначення строків появи сходів необхідно крім температури враховувати вологість ґрунту, що значно ускладнює процес. На основі своїх додаткових методичних розробок та приймаючи до уваги деякі опосередковані показники, Н.А. Зубарєвим прийнято, що достатнє зволоження ґрунту, при якому визначення строків появи сходів можна розраховувати лише враховуючи хід температури, буває у тому випадку, якщо вологість на глибині загортання насіння складає не менше 22% ваги сухого ґрунту плюс максимальна гігроскопічність ґрунту, виражена також в процентах від ваги сухого ґрунту. Коли вологість ґрунту перевищує максимальну гігроскопічність лише на 2 % – проростання насіння практично припиняється. На основі цього були розраховані гідрометричні коефіцієнти проростання для будь-якого поєднання температури та вологості ґрунту на глибині закладення насіння.

Обчислення проводилися на основі наступних тверджень. Вологість ґрунту до початку кожного дня рівна вологості до початку попереднього дня плюс зволоження за рахунок опадів, мінус затрати води на випаровування і, нарешті, плюс або мінус між шарове переміщення ґрунтової вологи (також за попередню добу). Один відсоток вологості ґрунту (відсоток від сухої маси ґрунту) для шару ґрунту товщиною 1 см приблизно відповідає десятій частині її об'ємної ваги, а отже, він рівний 0,125 мм для суглинкових ґрунтів. Тому кожний міліметр засвоєної або втраченої вологи змінює вологість шару суглинкового ґрунту товщиною 1 см приблизно на 8% від ваги сухої наважки.

Як висушування, так і зволоження оголеного ґрунту відбувається з поверхні і з кожним сантиметром глибини послаблюється, до того ж зволоження послаблюється з глибиною повільніше, аніж осушення, оскільки

по некапілярним проміжкам вода вниз йде швидше, аніж по капілярним, а на гору по некапілярним проміжкам вода зовсім не переміщується.

При однакових умовах, чим більше ґрунт зволожений, тим гірше він споживає вологу і тим більше витрачає на випаровування та просочування донизу. При вологості ґрунту 2% понад максимальної гігроскопічної вологи подальша втрата вологи практично припиняється, а при 22% – досягає максимуму.

Ступінь засвоєння опадів ґрунтом залежить також і від їх інтенсивності. У разі зливових опадів, чим більше випало опадів, тим менше засвоюється ґрунтом. Тому під час розрахунків слід враховувати не фактичну кількість опадів, а поглинуту ґрунтом. Н.А. Зубарєв запропонував використовувати для цього коефіцієнт засвоєння опадів різної інтенсивності та враховувати, що загальні затрати води на випаровування при хорошому зволоженні залежать головним чином від температури та вологості повітря (табл. 3.1, 3.2).

Таблиця 3.1

Загальні витрати вологи на випаровування (в мм) при оптимальному зволоженні ґрунту в залежності від температури та вологості повітря.

Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %								
	100	90	80	70	60	50	40	30	20
1	0	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,16	1,33
5	0	0,24	0,46	0,69	0,91	1,14	1,36	1,59	1,81
10	0	0,31	0,61	0,91	1,21	1,51	1,81	2,11	2,41
15	0	0,39	0,77	1,14	1,52	1,89	2,27	2,64	3,02
20	0	0,47	0,92	1,37	1,82	2,27	2,72	3,17	3,62
25	0	0,55	1,07	1,60	2,12	2,65	3,17	3,70	4,22
30	0	0,62	1,22	1,82	2,42	3,02	3,62	4,22	4,82

Таблиця 3.2

Коефіцієнти засвоєння опадів різної інтенсивності.

Опади, мм	Коефіцієнт засвоєння	Засвоєння води, мм	Опади, мм	Коефіцієнт засвоєння	Засвоєння води, мм
1	1,00	1,0	27	0,48	20,0
2	0,98	2,0	28	0,46	20,4
3	0,96	2,9	29	0,44	20,9
4	0,94	3,9	30	0,42	21,3
5	0,92	4,8	31	0,40	21,7
6	0,90	5,7	32	0,38	22,1
7	0,88	6,6	33	0,36	22,4
8	0,86	7,4	34	0,34	22,8
9	0,84	8,3	35	0,32	23,1
10	0,82	9,1	36	0,30	23,4
11	0,80	9,9	37	0,28	23,7
12	0,78	10,7	38	0,26	23,9
13	0,76	11,4	39	0,24	24,2
14	0,74	12,2	40	0,22	24,4
15	0,72	12,9	41	0,20	24,6
16	0,70	13,6	42	0,18	24,8
17	0,68	14,3	43	0,16	24,9
18	0,66	14,9	44	0,14	25,1
19	0,64	15,6	45	0,12	25,2
20	0,62	16,2	46	0,10	25,3
21	0,60	16,8	47	0,08	25,4
22	0,58	17,4	48	0,06	25,4
23	0,56	17,9	49	0,04	25,5
24	0,54	18,5	50	0,02	25,5
25	0,52	19,0	51	0,00	25,5
26	0,50	19,5	52	0,00	25,5

3.2. Модель формування сходів зернових культур**3.2.1. Концепція моделювання.**

Головна концепція, яка була використана під час моделювання формування сходів зернових культур, полягає в тому, що проростання насіння та формування сходів розглядаються як сукупність цілої низки фізіологічних процесів, інтенсивність яких визначається як факторами

зовнішнього середовища, так і біологічними особливостями рослини, а також тісною взаємодією між самими процесами. Розглядається процес накопичення вологи насінням, досягнення критичних значень вологи, запуск процесів гідролізу запасів ендосперму та початок росту зародкового проростка, який складається з пагона та кореня.

Модель створено на основі досягнутого рівня моделювання проростання насіння та формування сходів із внесенням певних модифікацій та доробок [2, 63, 72].

Модель описує основні фізичні та біохімічні процеси, що відбуваються у насінні під час проростання та формування сходів. Деякі з цих процесів відбуваються одночасно, однак деякі змінюють один одного, тобто відбуваються послідовно [97].

Модель складається з шести блоків:

- 1) блок поглинання вологи насінням;
- 2) блок гідролізу запасів ендосперму;
- 3) блок дихання;
- 4) блок накопичення маси;
- 5) блок росту колеоптиля;
- 6) блок визначення повноти сходів.

Блок-схема моделі представлена на рисунку 3.1..

Перший блок моделі є дещо відокремленим від інших, оскільки головними результатами його роботи є час початку гідролізу та дихання, а також запуску ростових процесів у насінні або його «накльовування». Оскільки далі вміст вологи в насінні залишається незмінним на протязі всього періоду та безпосередньо не впливає на протікання процесів, тому надалі застосування цього блоку не представляє інтересу.

Гідроліз запасів ендосперму, дихання, накопичення маси осьовими органами та подовження колеоптиля відбувається одночасно. Але слід зауважити, що робота блоку гідролізу та блоку дихання починається ще до початку безпосереднього росту.

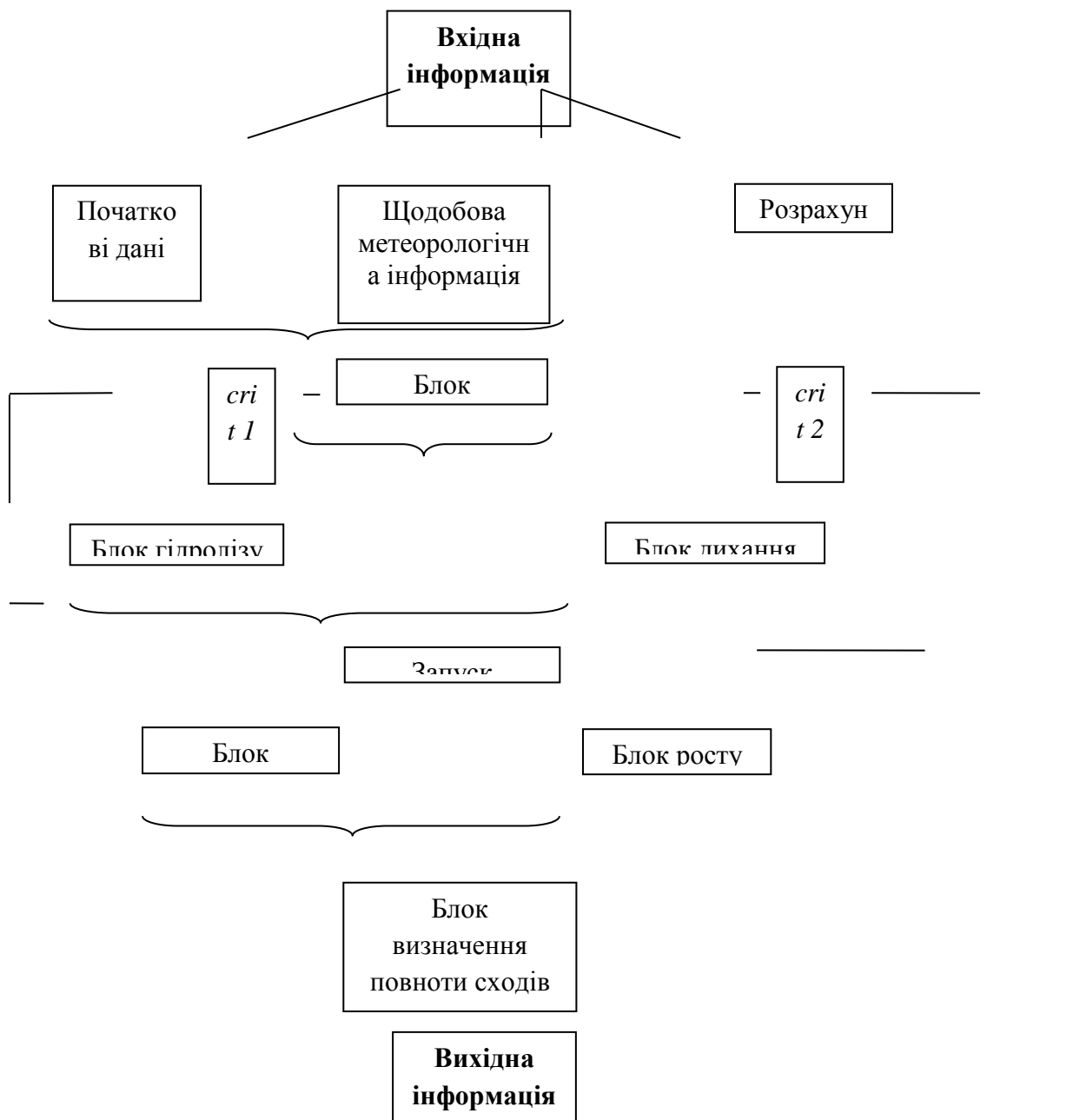


Рис. 3.1. Блок-схема моделі проростання насіння та формування сходів зернових культур.

Для кращого розуміння послідовності процесу дихання органів насіння блок дихання умовно можна поділити на три підблоки:

- 1) підблок дихання ендосперму;
- 2) підблок дихання зародка;
- 3) підблок дихання проростка (кореня і пагона).

Перший підблок використовується до кінця періоду проростання. Останні два змінюють один одного. Така особливість обумовлена тим, що

після запуску ростових процесів зародок переходить у стан проростка, а отже складається з двох новоутворених органів.

Найбільший інтерес представляє блок росту колеоптиля, адже виходячи з нього можна визначити довжину колеоптиля і час появи сходів як наслідок.

Наступний блок дає можливість оцінити повноту сходів та особливості їх розподілення по території.

Більш детально розглянемо процеси покладені в основу моделі. На першому етапі моделі описується лише поглинання вологи насінням. Швидкість цього процесу залежить як від умов навколишнього середовища, так і від характеристик висіяного насіння. Значний вплив має саме температура та вологість ґрунту [77]. Поступово вміст вологи зернівки досягає певного критичного значення (*crit 1*), і з цього моменту починається гідроліз запасного білка, крохмалю та дихання зародка і ендосперму. Запасні речовини переходять у доступну форму і вже одразу починають використовуватися на дихання. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення (*crit 2*) починається ріст проростка (органа пророслого насіння, який в свою чергу складається із зачатків корінця та пагона) і далі вже враховується дихання проростка. Визначення вологості насіння припиняється. Далі визначається швидкість гідролізу і перерозподіл азоту і вуглецю між осьовими органами та накопичення сухої маси. Цей процес також регулюється факторами зовнішнього середовища. Утворені речовини використовуються на ріст. На розвиток кореня і накопичення його маси йде близько 60% перетворених поживних речовин для синтезу нових клітин. Речовини, що залишилися транспортуються до колеоптиля. Для того, щоб зафіксувати момент появи сходів, паралельно обчислюється довжина пагона. Коли його довжина дорівнює глибині закладення насіння спостерігаються сходи. Далі визначається розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі, тобто польова схожість насіння. Подовження кореня не впливає на появу сходів, тому його

розрахунком можна знехтувати. Схема процесів покладених в основу моделі представлена на рисунку 3.2. [79].

Далі розглянемо рівняння, покладені в основу моделі [64, 76].

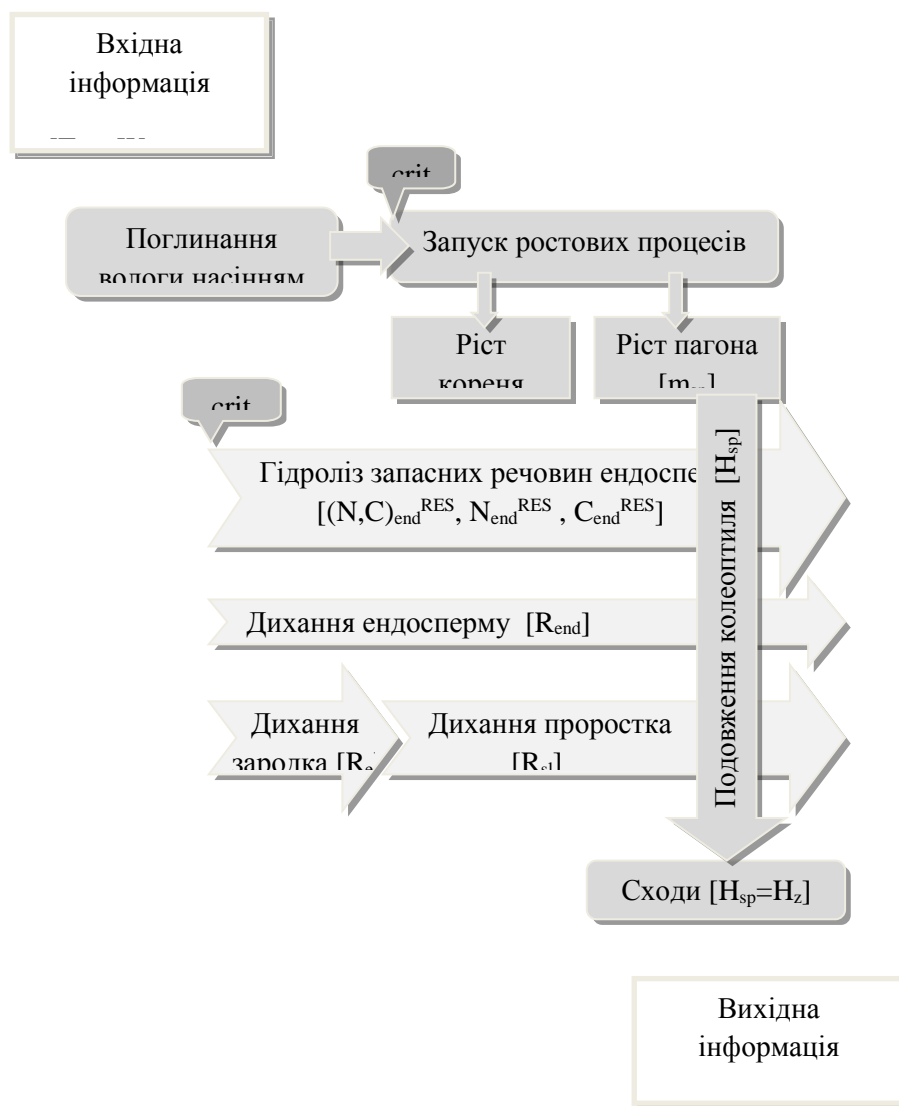


Рис.3.2. Схема процесів покладених в основу моделі формування сходів зернових культур.

3.2.2. Моделювання поглинання води насінням.

Потрапивши у ґрунт, насіння починає інтенсивно поглинати вологу. Цей процес відбувається завдяки різниці водних потенціалів ґрунту та

насіння [80]. Рівняння, що описує процес накопичення води насінням, наведене нижче.

$$\Delta W_s^j = S_s P_s k_1 (\psi_{soil}^{j-1} - \psi_s^{j-1}), \quad (3.34)$$

де ΔW_s^j – потік води, що надходить в насіння, г·доба⁻¹; j – крок у часі, доба; S_s – поглинальна поверхня насіння, см²; P_s – проникність оболонки насіння, сек·см⁻¹; k_1 – коефіцієнт для перерахунку одиниць вимірювання; ψ_{soil} – водний потенціал ґрунту, МПа; ψ_s – водний потенціал насіння, МПа [110].

Водні потенціали ґрунту та насіння можна визначити за такими рівняннями:

$$\psi_{soil}^j = 1,5 \exp \left(-7,76 \frac{W_{soil}^j - B3}{PB - B3} \right), \quad (3.35)$$

$$\psi_s^j = k_2 \frac{R_{const} T_{soil}^j}{\bar{V}_m} \ln m, \quad (3.36)$$

де W_{soil}^j – вологість ґрунту, мм; $B3$ та PB – вологість в'янення та повна вологоємність ґрунту відповідно, мм; k_2 – коефіцієнт для перерахунку одиниць вимірювання; R_{const} – газова стала, Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T_{soil}^j – температура ґрунту на глибині закладки насіння, °С; \bar{V}_m – порційний молярний об'єм, см³·моль⁻¹; m – кількість поглинутої води, г [88]. Емпірична формула (3.35) була запропонована О.Д. Сиротенко [87].

Основними частинами насіння є ендосперм та зародок. Відомо, що білки поглинають воду інтенсивніше, ніж вуглеводи. У складі зародка переважає запасний білок, саме тому зародок набухає швидше, збільшує свої

розміри і створює певне загострення, що виступає під оболонкою зерна. Цей стан прийнято називати наклёвуванням зерна [59]. Він викликаний ще не ростом зародка, а лише розтягненням клітин.

3.2.3. Моделювання гідролізу запасів ендосперму та дихання насіння.

Коли вологість насіння досягає певного першого критичного значення, починається гідроліз запасного білка та крохмалю, що містяться в ендоспермі

$$\Delta(N,C)_{end}^{RES^j} = K_s^{zid} m_s k_s(T_{soil}^j), \quad (3.37)$$

де $\Delta(N,C)_{end}^{RES^j}$ – загальна швидкість гідролізу запасних речовин ендосперму, $г \cdot (г \text{ сухої маси насіння})^{-1} \cdot \text{доба}^{-1}$; K_s^{zid} – коефіцієнт швидкості гідролізу запасних речовин насіння, $г \cdot \text{доба}^{-1}$; m_s – маса насіння, $г$; $k_s(T_{soil}^j)$ – функція впливу температури ґрунту на глибині закладення на швидкість гідролізу, визначається за наступною системою рівнянь

$$k_s(T_{soil}^j) = \begin{cases} 0,058 + 0,773x_1 + 1,913x_1^2 + 5,400x_1^3 - 3,322x_1^4 & \text{при } T < T_{opt_1} \\ 1 & \text{при } T_{opt_1} \leq T \leq T_{opt_2} \\ -11,47 + 29,87x_2^2 + 5,43x_2^3 & \text{при } T > T_{opt_2} \end{cases} \quad (3.38)$$

$$x_1 = \frac{T^j - T_{min}}{T_{opt_1} - T_{min}}, \quad (3.39)$$

$$x_2 = \frac{T^j - T_{opt_2}}{T_{max} - T_{opt_2}}, \quad (3.40)$$

де T^j – температура, °C; $T_{min(max)}$ – мінімальні та максимальні значення температури, при якій починається та припиняється процес життєдіяльності; $T_{opt_1(opt_2)}$ – верхня та нижня межа оптимуму для протікання процесу. Ця функція була отримана В.С. Антоненко на основі експериментальних даних, матеріалів масових агрометеорологічних спостережень за культурою озимої пшениці, а також літературних джерел, шляхом узагальнення відгуків, що відображають реакцію рослин на зміну фактора навколишнього середовища, що розглядається [2].

Далі визначити вміст азоту та вуглецю окремо можна виходячи з припущення, що їх співвідношення у ендоспермі залишається постійним і може бути виражене за допомогою певного коефіцієнта α

$$\Delta C_{end}^{RES^j} = \alpha \Delta(N, C)_{end}^{RES^j}, \quad (3.41)$$

$$\Delta N_{end}^{RES^j} = (1 - \alpha) \Delta(N, C)_{end}^{RES^j}, \quad (3.42)$$

де $\Delta C_{end}^{RES^j}$ – швидкість гідролізу вуглецю, г·(г сухої маси насіння)⁻¹·доба⁻¹;
 $\Delta N_{end}^{RES^j}$ – швидкість гідролізу азоту, г·(г сухої маси насіння)⁻¹·доба⁻¹;
 α – коефіцієнт для перерахунку продуктів гідролізу [94].

Речовини, утворені в результаті гідролізу, використовуються на дихання зародка та ендосперму. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення, відбувається запуск ростових процесів у насінні. Починає розвиватися проросток, який складається з кореня та пагона (колеоптиля). З цього моменту зародок переходить у стан проростка та продовжує своє дихання у новому стані.

Визначити інтенсивність дихання ендосперму можна за формулою, запропонованою В.С.Антоненко [3], що також враховує вплив температури на даний процес

$$\Delta R_{end}^j = c_m m_s Q_R(T_{soil}^j), \quad (3.43)$$

де ΔR_{end}^j – інтенсивність дихання ендосперму, г·(г сухої маси насіння)⁻¹доба⁻¹;
 c_m – коефіцієнт витрат на дихання підтримки, г·(г сухої маси насіння)⁻¹доба⁻¹;
 $Q_R(T_{soil}^j)$ – функція впливу температури ґрунту на інтенсивність дихання насіння, яку можна описати наступним рівнянням:

$$Q_R(T_{soil}^j) = 2^{0,1(T_{soil}^j - T_{opt})}. \quad (3.44)$$

Швидкість дихання зародку ΔR_e^j в перерахунку на інтенсивність дихання ендосперму визначимо згідно А.І. Носатовського, враховуючи, що зародок дихає інтенсивніше, аніж ендосперм (10% від інтенсивності дихання зародка) [59]

$$\Delta R_e^j = 10 \Delta R_{end}^j. \quad (3.45)$$

Інтенсивність дихання пагона та кореня опишемо наступними формулами:

$$\Delta R_{sp}^j = \beta \Delta N_{end}^{RESj} Q_R(T_{soil}^j), \quad (3.46)$$

$$\Delta R_r^j = (1 - \beta) \Delta N_{end}^{RESj} Q_R(T_{soil}^j), \quad (3.47)$$

де ΔR_{sp}^j – швидкість дихання пагона, г·(г сухої маси насіння)⁻¹ доба⁻¹;
 ΔR_r^j – швидкість дихання кореня, г·(г сухої маси насіння)⁻¹ доба⁻¹;

β – коефіцієнт розподілу запасів білка на дихання між колеоптилем та коренем.

3.2.4. Моделювання росту осьових органів та визначення повноти сходів.

Поживні речовини, що залишилися після витрат на дихання використовуються на ріст кореня та колеоптиля

$$\Delta m_{sp(r)}^j = \left(\gamma \Delta C_{end}^{RES^j} + \eta \Delta N_{end}^{RES^j} \right) - \Delta R_{sp(r)}^j, \quad (3.48)$$

де $\Delta m_{sp(r)}^j$ – швидкість накопичення сухої маси пагоном (коренем), г·доба⁻¹; γ і η – коефіцієнти перерахунку вуглецю в органічну речовину. На основі проведених лабораторних дослідів встановлено, що частка колеоптилю в проростку на протязі періоду від початку росту осьових органів до появи сходів в середньому складає 40%.

Маса кореня та проростка збільшується в залежності від щоденного її приросту

$$m_{sp(r)}^j = m_{sp(r)}^{j-1} + \Delta m_{sp(r)}^j, \quad (3.49)$$

де $m_{sp(r)}^j$ – маса пагона (кореня) на j -ту добу, г.

Колеоптиль представляє собою циліндр постійного радіусу. Швидкість подовження колеоптиля описана як функція накопичення його маси із врахуванням механічного опору ґрунту, що визначається щільністю ґрунту ρ_{soil} та його вологістю [81]. В результаті лабораторних експериментів встановлено, що подовження колеоптиля до появи сходів відбувається експоненційно, що враховано у математичному вираженні процесу

$$H_{sp}^j = \exp\left(m_{sp}^j \frac{1}{\rho_{sp}}\right) \frac{1}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}^j), \quad (3.50)$$

де H_{sp}^j – довжина пагона, см; ρ_{sp} – питома щільність рослинної маси пагона, г·см³; r_{sp} – радіус основи пагона, см; $k_{sp}(\rho_{soil})$ – функція впливу щільності ґрунту на ріст пагона; $k_{sp}(W_{soil})$ – функція впливу вологості верхніх шарів ґрунту на подовження пагону.

Функції впливу щільності та вологості ґрунту на подовження були отримані В.С. Антоненком на основі даних [114].

$$k_{sp}(\rho_{soil}) = 3,725 - 4,465\rho_{soil} + 1,674\rho_{soil}^2 - 0,177\rho_{soil}^3, \quad (3.51)$$

$$k_{sp}(W_{soil}) = 0,020 + 2,602x_3 - 2,593x_3^2 + 0,977x_3^3, \quad (3.52)$$

$$x_3 = \frac{W_{soil}}{W_{soil}^{opt}}. \quad (3.53)$$

Коли довжина пагона дорівнює глибині закладення насіння, пагін досягає поверхні землі – спостерігаються сходи. Пагін припиняє свій ріст, а крізь верхівку колеоптиля проривається перший лист.

Глибина закладки насіння може змінюватися в залежності від мікрорельєфу ґрунту. Згідно моделі В.М. Павлової [63], на основі опосередкованих даних була обрана функція розподілу кількості рослин з різною глибиною закладення насіння

$$P(H_{sp})^j = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(H_{sp}^j - H_z^p)^2 / 2\sigma^2}, \quad (3.54)$$

де σ – розрахунковий коефіцієнт, що дорівнює 0,75, а H_z^p – найімовірніша глибина закладення насіння, см.

Після визначення H_{sp} на кожному кроці визначається ймовірнісний інтеграл функції щільності нормального розподілення

$$\int P(H_{sp})^j = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{H_{sp}^j - H_z^p}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right). \quad (3.55)$$

Якщо значення інтеграла функції перевищує 0,6, то вважається, що настали масові сходи.

Кількість рослин на одиницю площі (N_p) визначається, як добуток норми висіву (N_s) на вищезгаданий інтеграл функції розподілу кількості рослин з різною глибиною закладення насіння

$$N_p = N_s \cdot \int P(H_{sp})^j. \quad (3.56)$$

Запропонована низка рівнянь дозволяє визначити тривалість періоду від посіву до сходів, кількість рослин на одиницю площі, а також масу новоутворених органів молодшої рослини на момент появи сходів.

Висновки до розділу 3

1. На сьогоднішній день існує певний ряд моделей врожаїв сільськогосподарських культур, які в різній мірі включають в себе моделювання періоду від посіву до сходів, деякі виділяють окремий блок проростання насіння. Однак, з ряду обставин у більшості моделей на

практиці використовують фактичні дані про появу та повноту сходів. Самостійні моделі формування сходів зазвичай враховують вплив зовнішніх факторів, не враховуючи якість та параметри посівного матеріалу.

2. Розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур, яка враховує як вплив агрометеорологічних умов, так і характеристики самого насіння. Модель описує динаміку накопичення вологи насінням, гідроліз запасних речовин насіння, дихання та ріст органів проростка.

3. Головна концепція, яка була використана під час моделювання, полягає в тому, що проростання насіння та формування сходів розглядаються як сукупність цілої низки фізіологічних процесів, інтенсивність яких визначається як факторами зовнішнього середовища, так і біологічними особливостями рослини, а також тісною взаємодією між самими процесами.

4. Модель дозволяє визначити терміни тривалості періоду «посів – сходи», повноту сходів, а також масу новоутворених органів.

РОЗДІЛ 4

ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ТА ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

4.1. Перевірка адекватності моделі

Перевірка адекватності роботи моделі велася наступним чином. Були проведені розрахунки по моделі на основі агрометеорологічних даних по станціям та постам Одеської, Херсонської, Запорізької та Луганської областей за період з 2009 по 2013 рр.. Для моделі були взяті фенологічні дані фаз розвитку кукурудзи, середньодобова температура ґрунту та запаси вологи на глибині 10 см періоду від посіву до сходів, а також данні візуальних спостережень за вологістю верхніх шарів ґрунту. Щільність ґрунту на станціях взята із Довідника агрофізичних властивостей ґрунту по кожній станції (в табл. 4.1 наведені приклади щільності ґрунту по станціям Одеської області) [90]. Загалом розглядалося 80 випадків появи сходів. Далі розрахований по моделі час появи сходів був порівняний з фактичними даними, отримано відхилення та відносна похибка розрахованих даних (табл. 4.2) та побудовано графік взаємозв'язку фактичних та отриманих даних.

Таблиця 4.1

Щільність ґрунту по станціям (Одеська область).

№ п/п	Станція	Щільність ґрунту, г / см ³
1	Любашівка	1,10
2	Роздільна	1,13
3	Сарата	1,00
4	Шевченкове	1,10
5	Татарбунари	1,10
6	Тарутино	1,10

Таблиця 4.2

**Порівняння фактичних та розрахованих по моделі значень тривалості
періоду від посіву до появи сходів (по областях).**

Одеська				Херсонська				Запорізька				Луганська			
Тривалість періоду, днів		Відхилення, днів	Похибка, %	Тривалість періоду, днів		Відхилення, днів	Похибка, %	Тривалість періоду, днів		Відхилення, днів	Похибка, %	Тривалість періоду, днів		Відхилення, днів	Похибка, %
фактичні	розраховані			фактичні	розраховані			фактичні	розраховані			фактичні	розраховані		
7	8	-1	14	6	7	-1	15	8	7	1	13	10	12	-2	15
8	8	0	0	7	9	-2	25	8	7	1	15	10	12	-2	16
9	9	0	0	9	11	-2	18	8	6	2	19	11	9	2	17
10	11	-1	10	10	12	-2	17	9	7	2	18	12	15	-3	24
10	10	0	0	10	9	2	15	9	10	-1	12	12	14	-2	16
10	11	-1	10	11	13	-2	21	10	8	3	25	12	14	-2	13
14	12	2	14	12	11	1	11	10	10	0	0	13	11	2	18
14	10	4	29	13	15	-2	14	11	9	2	19	13	11	2	18
14	15	-1	7	13	14	-1	8	12	8	4	30	14	12	2	14
14	15	-1	7	13	15	-2	15	12	10	2	15	14	12	2	13
14	14	0	0	14	16	-2	16	13	12	1	10	15	17	-2	14
14	13	1	7	14	11	3	21	14	12	2	12	15	17	-2	15
14	14	0	0	14	16	-2	16	14	16	-2	16	15	17	-2	16
14	14	0	0	15	17	-2	14	15	13	2	11	15	11	4	25
15	15	0	0	15	13	2	15	15	17	-2	12	15	12	3	18
16	13	3	19	15	12	3	17	16	16	0	0	16	13	3	17
16	16	0	0	16	14	2	15	16	14	2	13	17	14	3	18
16	15	1	6	16	18	-2	15	17	19	-2	11	17	17	0	2
18	17	1	6	18	15	3	16	18	16	2	11	17	15	2	12
19	18	1	5	19	17	2	9	20	20	0	1	19	19	0	2

В цілому модель дала досить адекватні результати. Середня похибка між фактичними та розрахованими значеннями становить 13% та змінюється в межах від 7 % (Одеська область) до 16% (Херсонська область). Максимальне відхилення розрахованої дати від фактичної складає 4 дні, що трапляється у трьох випадках, близькі до максимального відхилення – 9 випадків з відхиленням у 3 доби. У цих випадках модель прогнозує передчасну появу сходів в порівнянні з фактичними даними. У решті

випадків відхилення становить 0 – 2 доби. Такий результат цілком прийнятний, оскільки точність спостережень за фенологією культур по мережі агрометеорологічних станцій, згідно з Настанови гідрометеорологічним станціям і постам становить дві доби [56]. На підставі такої перевірки можна зробити висновок, що метод в цілому себе виправдав. Точність розрахунків досить висока і узгоджується з точністю спостережень на реальному сільськогосподарському полі за фенологією культур.

Розходження в фактичних та розрахованих датах також можна пояснити можливими неточностями фактичних даних спостережень, адже згідно Настанови гідрометеорологічним станціям та постам спостереження за фазами розвитку ведуться здебільшого окомірно, що може спричиняти саме такі незначні відхилення в один день, особливо між фазами появи сходів «а» і «б».

Сівба відбувається протягом усього дня, що також деякою мірою впливає на накопичення майбутніми рослинами необхідної кількості тепла та вологи.

В моделі враховані середньодобові температурні дані, однак, на протязі доби значення температури змінюються як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення, що в свою чергу відповідно прискорює або сповільнює проростання насіння. Значні зміни, що відбуваються в обміні речовин, а також хімічному складі рослин під впливом умов зовнішнього середовища тісно пов'язані з відповідними змінами в ферментних системах рослин. Встановлено, що активність ферментів в рослині змінюється на протязі доби. Ця обставина також не могла не вплинути на точність моделювання появи сходів.

Розрахунки по моделі проводилися виходячи з припущення, що насіння рівномірно висіяне на глибину 4 см. Однак дані про фактичну глибину загортання насіння відсутні, а також не відомо на скільки рівномірно було розподілено насіння з глибиною, що також могло спричинити неточність розрахунків.

Для більш детального представлення результатів в таблиці 4.3 наведені розраховані по моделі значення довжини колеоптиля для станцій Одеської області. Кольорами виділений фактичний час появи сходів, розрахований по моделі та випадки повної збіжності розрахованих та фактичних значень.

В моделі враховано, що масові сходи настають, коли значення інтегралу ймовірності перевищує 0,6 (табл. 4.4). Для більш наочного представлення результатів в таблиці 4.4, так само, як і у таблиці 4.3 кольорами виділений фактичний і розрахований по моделі час появи сходів та випадки повної збіжності отриманих значень з фактичними. При порівнянні з фактичними даними видно, що масові сходи найчастіше настають при значеннях інтегралу функції розподілу 0,4 – 0,5.

На основі отриманих даних побудовано графік порівняння розрахованої по моделі та фактичної тривалості періоду (рис. 4.1) [75]. Отримано лінійну залежність вигляду

$$y = 0,8785x + 1,2745 \quad (4.1)$$

Достовірність апроксимації (коефіцієнт кореляції) склала $R=0,8$. Тобто можна стверджувати, що зв'язок даних є досить тісним, що дає нам підстави стверджувати, що модель досить адекватно відображає описані процеси та може бути запропонована для подальшого використання.

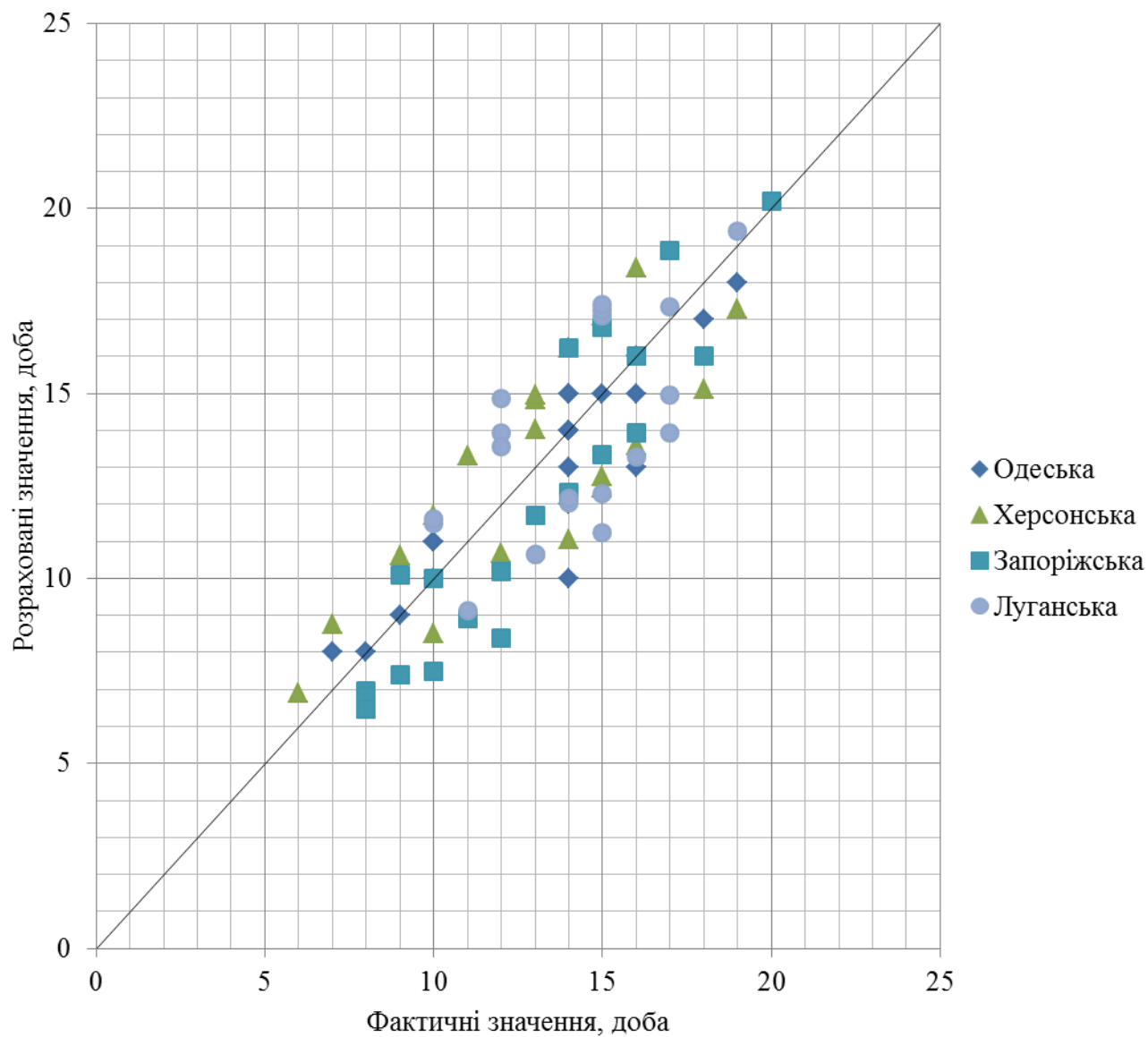


Рис. 4.1. Порівняння розрахованої по моделі з фактичною тривалістю періоду від посіву до появи сходів кукурудзи.

Таблиця 4.3

Розрахована по моделі довжина колеоптиля та час появи сходів (Одеська область).

Рік	Станція	Час, доба																	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		Довжина колеоптиля, см																	
2009	Роздільна	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	1,1	2,0	4,0	5,5	7,6	12,1	19,9	-	-	-	-	-	
	Сарата	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,5	2,7	5,2	6,4	9,5	16,7	-	-	-	-	-	-	
	Татарбунари	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	1,1	2,6	3,6	5,8	9,9	18,8	-	-	-	-	
2010	Роздільна	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,2	2,0	3,6	5,5	17,2	-	-	-	-	-	-	
	Сарата	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	1,4	2,6	5,2	7,5	10,4	15,4	21,8	-	
	Татарбунари	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,7	1,0	1,5	2,1	3,7	6,0	10,3	-	-	-	
2011	Любашевка	0,0	0,2	0,2	0,3	0,6	1,1	2,2	5,0	10,7	22,9	-	-	-	-	-	-	-	
	Роздільна	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	1,0	1,6	2,9	4,0	7,1	12,4	20,9	20,9	-	
	Сарата	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	2,1	3,5	5,9	11,1	22,8	-	-	-	
	Шевченково	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,8	1,4	2,6	5,0	8,5	13,8	-	
	Татарбунари	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	1,5	2,4	4,0	7,4	11,3	19,4	-	-	
	Тарутино	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7	1,1	2,5	3,4	5,7	9,7	18,4	-	-	-	-	
2012	Любашевка	0,3	0,5	0,9	2,1	4,6	7,3	10,6	17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Сарата	0,0	0,2	0,5	1,0	1,9	3,7	7,7	15,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Татарбунари	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,0	1,4	2,3	3,9	7,9	17,5	-	-	-	-	-	-	
	Тарутино	0,3	0,7	1,5	3,2	6,3	12,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2013	Любашевка	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,5	2,6	4,7	9,2	18,9	-	-	-	-	-	-	-	
	Сарата	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,8	1,6	2,8	5,0	-	-	-	-	-	-	
	Шевченково	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	1,0	1,9	3,9	7,5	-	-	-	-	-	
	Тарутино	0,1	0,3	0,6	1,3	2,5	5,0	8,3	14,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Примітка. Фактичні значення
 Розраховані значення
 Повна збіжність

Таблиця 4.4

Розрахований по моделі ймовірнісний інтеграл функції розподілу довжини колеоптиля з глибиною та час появи сходів (Одеська область).

Рік	Станція	Час, доба																
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		Значення інтегралу функції розподілу, відн. од.																
2009	Роздільна	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Сарата	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Татарбунари	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2010	Роздільна	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Сарата	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Татарбунари	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0
2011	Любашевка	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Роздільна	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
	Сарата	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0
	Шевченково	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9
	Татарбунари	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,0
	Тарутино	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
2012	Любашевка	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Сарата	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Татарбунари	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Тарутино	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2013	Любашевка	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Сарата	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
	Шевченково	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0
	Тарутино	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Примітка. Фактичні значення
Розраховані значення
Повна збіжність

4.2. Оцінка чутливості моделі

З метою визначення можливостей моделі та меж її адекватності, а також особливостей її роботи при різних вхідних параметрах було проведено низку чисельних експериментів з дослідження її чутливості.

Під час розрахунків по моделі на кожному етапі змінювалися значення одного параметру, однак значення всіх останніх параметрів залишалися оптимальними [67]. Кожний досліджуваний параметр змінювався на певний крок у декілька відсотків у бік збільшення або зменшення по відношенню до оптимуму. Для зручності представлення результатів у більшості випадків значення кожного з параметрів змінювалися з кроком у десяті або соті від цілого у межах їх розмірності.

В ряді експериментів проводився аналіз чутливості моделі до зміни її параметрів. Визначався вплив зміни початкових значень маси та вологості насіння на інтенсивність процесів у насінні, що покладені в основу моделі, таких як накопичення вологи насінням, гідроліз запасів ендосперму та їх розподіл, подовження колеоптилю. Отже, дослід проводився у три етапи:

- 1) визначення чутливості моделювання накопичення вологи насінням до зміни конкретного параметру;
- 2) визначення чутливості моделювання гідролізу запасів ендосперму до зміни конкретного параметру;
- 3) визначення чутливості моделювання подовження колеоптиля до зміни конкретного параметру.

Експеримент проводився за методом «однієї відмінності», у таблиці 4.5 представлені значення оптимальних для моделі показників досліджуваних параметрів та коефіцієнтів.

Визначався вплив параметрів самого посівного матеріалу, а саме: поглинальної поверхні, початкової вологості, маси та проникності оболонки насіння. На наступному кроці визначався вплив параметрів новоутвореної

рослини (питома щільність рослинної маси та радіус основи пагона) та коефіцієнтів моделі (швидкості гідролізу запасних речовин насіння, розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем, перерахунку продуктів гідролізу, витрат на дихання підтримки).

Таблиця 4.5

Оптимальні значення параметрів та коефіцієнтів моделі.

Параметр	Умове позначення	Оптимальне значення	Одиниці вимірювання
Температура ґрунту	T_{soil}	22	°C
Вологість ґрунту	W_{soil}	7	мм
Щільність ґрунту	ρ_{soil}	1,2	г·см ⁻³
Поглиналина поверхня насіння	S_s	2,5	см ²
Вологість насіння (початкова)	W_s	0,16	відн. од.
Маса насіння	m_s	0,28	г
Проникність оболонки насіння	P_s	0,0001	сек·см ⁻¹
Питома щільність рослинної маси пагона	ρ_{sp}	0,12	см
Радіус основи пагона	r_{sp}	0,34	г·см ⁻³
Коефіцієнт швидкості гідролізу запасних речовин насіння	K_s^{gid}	0,195	г·доба ⁻¹
Коефіцієнт розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем	γ	0,4	відн. од.
Коефіцієнт перерахунку продуктів гідролізу	α	0,8	відн. од.
Коефіцієнт витрат на дихання підтримки	c_m	0,015	мг (г сух) ⁻¹ доба ⁻¹

4.2.1. Чутливість моделі до зміни початкових параметрів насіння.

Було проведено низку аналізів чутливості моделі до зміни початкових параметрів посівного матеріалу.

Розглянемо чутливість моделі до зміни початкової вологості насіння.

В ході дослідів початкова вологість насіння змінювалася на 0,01 в інтервалі від 0,11 до 0,2, зазвичай під час висіву середня вологість насіння становить близько 0,14 – 0,16. Встановлено, що модель чутлива до зміни даного параметру, однак значного впливу на час початку росту проростку не виявлено. Але слід зазначити, що коли насіння лише потрапило в ґрунт, інтенсивність накопичення вологи більша у насіння, вологість якого менша (рис. 4.2). У таблиці 4.6 представлено чисельне вираження отриманих результатів, градієнт забарвлення змінюється на кожну 0,1 відн. од. вологості.

На графіках (рис. 4.3, 4.4) добре видно, що досліджуваний параметр має не значний вплив на гідроліз запасних речовин. На шосту добу різниця кількості накопичених вуглеводів у випадку вологості насіння 0,11 та 0,2 буде лише 370 мг, азоту – 93 мг (табл. 4.7, 4.8).

Таблиця 4.6

Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни початкової вологості насіння.

Початкова вологість насіння, відн. од.	Час, доба							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	Вологість насіння, відн. од.							
0,11	0,11	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,12	0,12	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,13	0,13	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,14	0,14	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,15	0,15	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,16	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,17	0,17	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,18	0,18	0,33	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,19	0,19	0,33	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,2	0,2	0,34	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

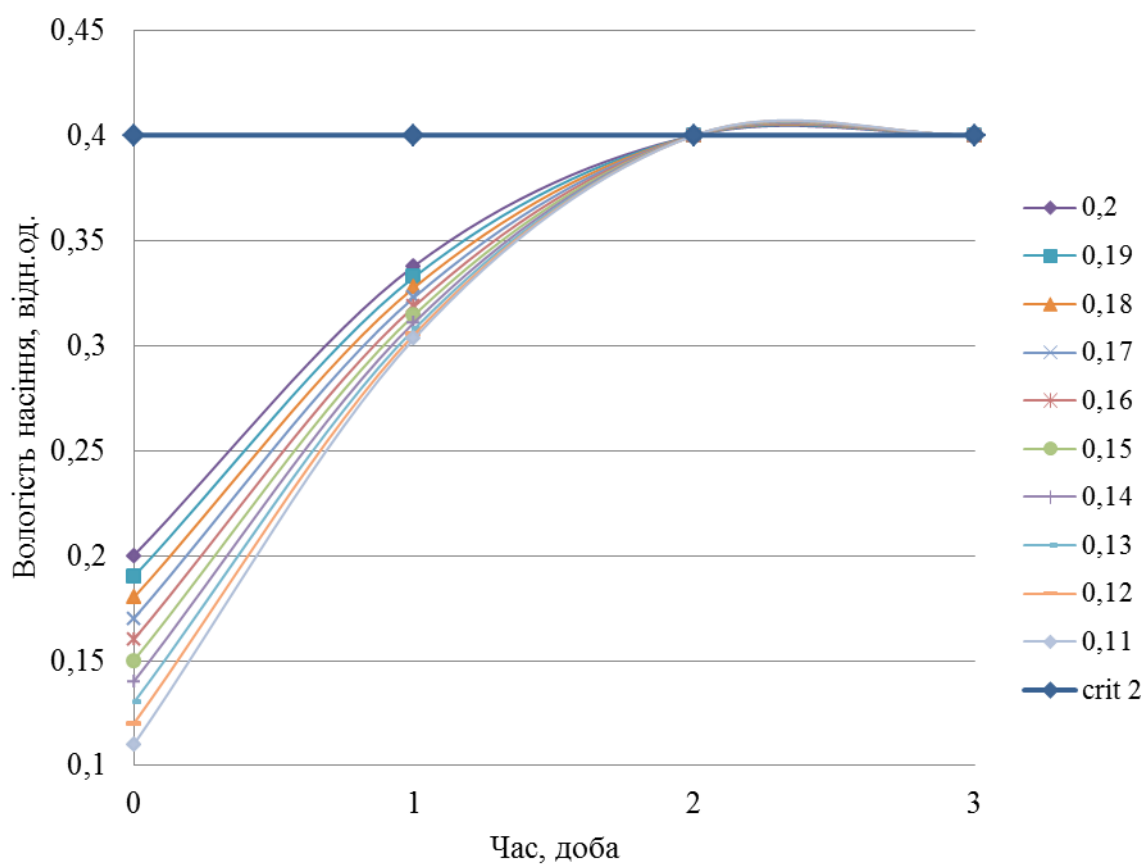


Рис. 4.2. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни початкової вологості насіння (0,11 – 0,2).

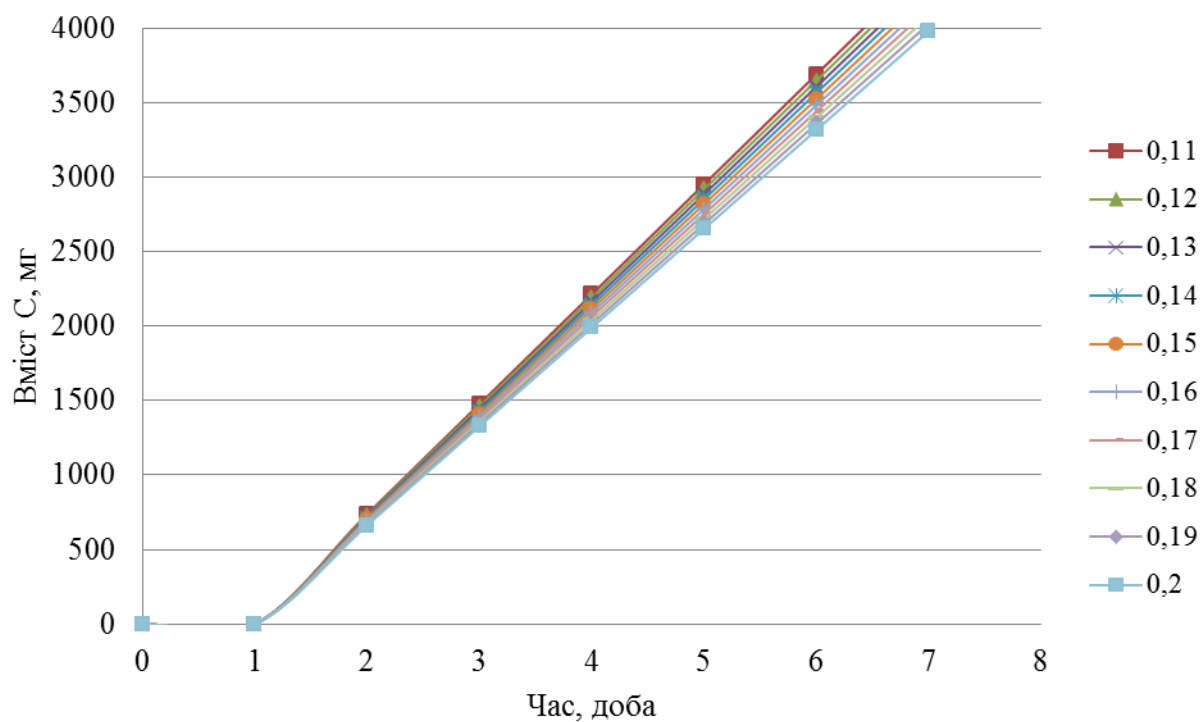


Рис. 4.3. Чутливість моделювання накопичення вуглеводів до зміни початкової вологості насіння (0,11 – 0,2).

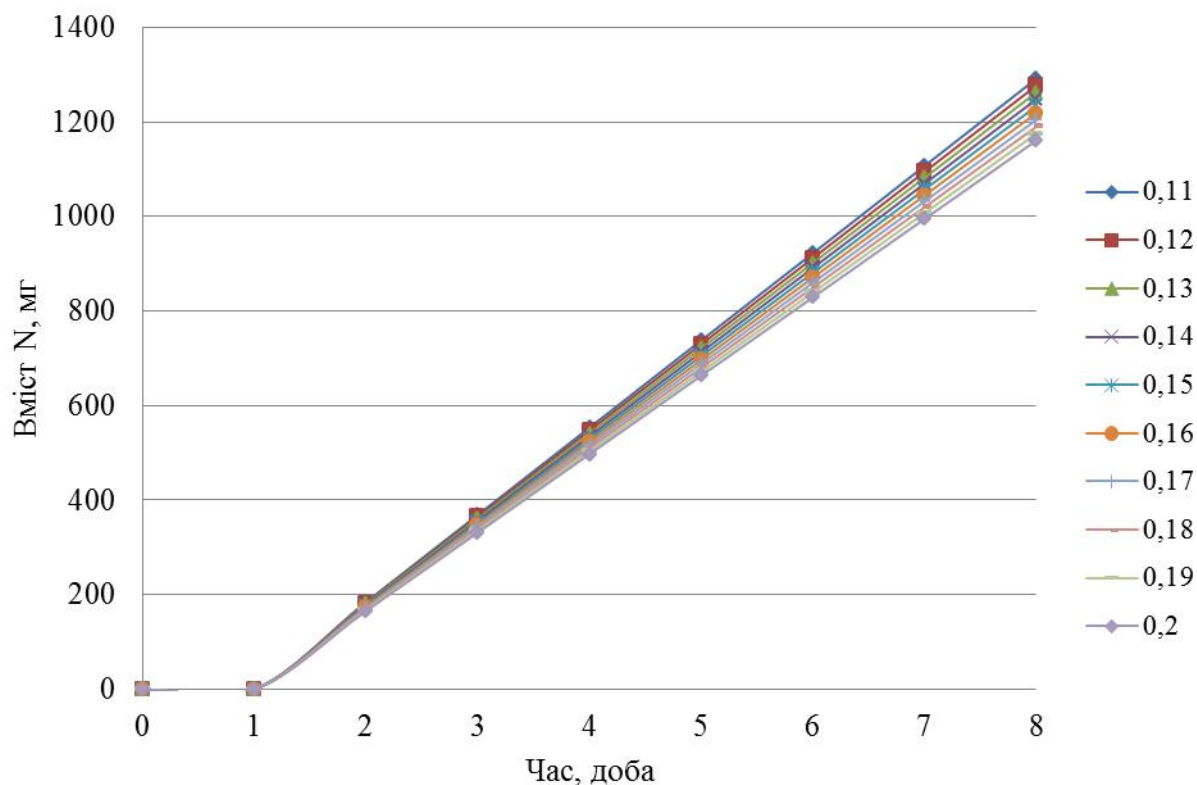


Рис. 4.4. Чутливість моделювання накопичення азоту до зміни початкової вологості насіння (0,11 – 0,2).

Таблиця 4.7

Чутливість моделювання гідролізу вуглеводів до зміни початкової вологості насіння.

Початкова вологість насіння, відн.од.	Час, доба							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	Вміст вуглецю, мг							
0,11	737,86	1475,73	2213,59	2951,46	3689,32	4427,19	5165,05	737,86
0,12	729,57	1459,15	2188,72	2918,30	3647,87	4377,45	5107,02	729,57
0,13	721,28	1442,57	2163,85	2885,14	3606,42	4327,70	5048,99	721,28
0,14	712,99	1425,99	2138,98	2851,92	3564,97	4277,96	4990,95	712,99
0,15	704,70	1409,41	2114,11	2818,81	3523,51	4228,21	4932,92	704,70
0,16	696,41	1392,82	2089,24	2785,65	3482,06	4178,47	4874,88	696,41
0,17	688,12	1376,24	2064,36	2752,49	3440,61	4128,73	4816,85	688,12
0,18	679,83	1359,66	2039,49	2719,32	3399,15	4078,98	4758,81	679,83
0,19	671,54	1343,08	2014,62	2686,16	3357,70	4029,24	4700,78	671,54
0,2	663,25	1326,50	1989,75	2653,00	3316,25	3979,50	4642,75	663,25

Таблиця 4.8

**Чутливість моделювання накопичення азоту до зміни початкової
вологості насіння.**

Початкова вологість насіння, відн.од.	Час, доба							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	Вміст азоту, мг							
0,11	184,47	368,93	553,40	737,86	922,33	1106,80	1291,26	184,47
0,12	182,39	364,79	547,18	729,57	911,97	1094,36	1276,76	182,39
0,13	180,32	360,64	540,96	721,28	901,60	1081,93	1262,25	180,32
0,14	178,25	356,50	534,74	712,99	891,24	1069,49	1247,74	178,25
0,15	176,18	352,35	528,53	704,70	880,88	1057,05	1233,23	176,18
0,16	174,10	348,21	522,31	696,41	870,51	1044,62	1218,72	174,10
0,17	172,03	344,06	516,09	688,12	860,15	1032,18	1204,21	172,03
0,18	169,96	339,92	509,87	679,83	849,79	1019,75	1189,70	169,96
0,19	167,89	335,77	503,66	671,54	839,42	1007,31	1175,20	167,89
0,2	165,81	331,62	497,44	663,25	829,06	994,87	1160,69	165,81

Початкова вологість насіння має певний вплив на швидкість подовження пагону. Як і у випадку динаміки накопичення вологи, сухіше насіння буде рости швидше, однак у будь-якому випадку сходи з'являться у межах однієї доби.

Таблиця 4.9

**Чутливість моделювання подовження колеоптилю до зміни
початкової вологості ґрунту.**

Початкова вологість насіння, відн.од.	Час, доба					
	2	3	4	5	6	7
0,11	0,22	0,52	1,22	2,87	6,70	-
0,12	0,22	0,51	1,19	2,76	6,39	-
0,13	0,22	0,50	1,16	2,65	6,09	-
0,14	0,22	0,49	1,12	2,56	5,81	-
0,15	0,22	0,48	1,09	2,46	5,54	-
0,16	0,21	0,48	1,06	2,37	5,28	-
0,17	0,21	0,47	1,03	2,28	5,03	-
0,18	0,21	0,46	1,00	2,19	4,80	10,50
0,19	0,21	0,45	0,97	2,11	4,58	9,92
0,2	0,21	0,44	0,95	2,03	4,36	9,37

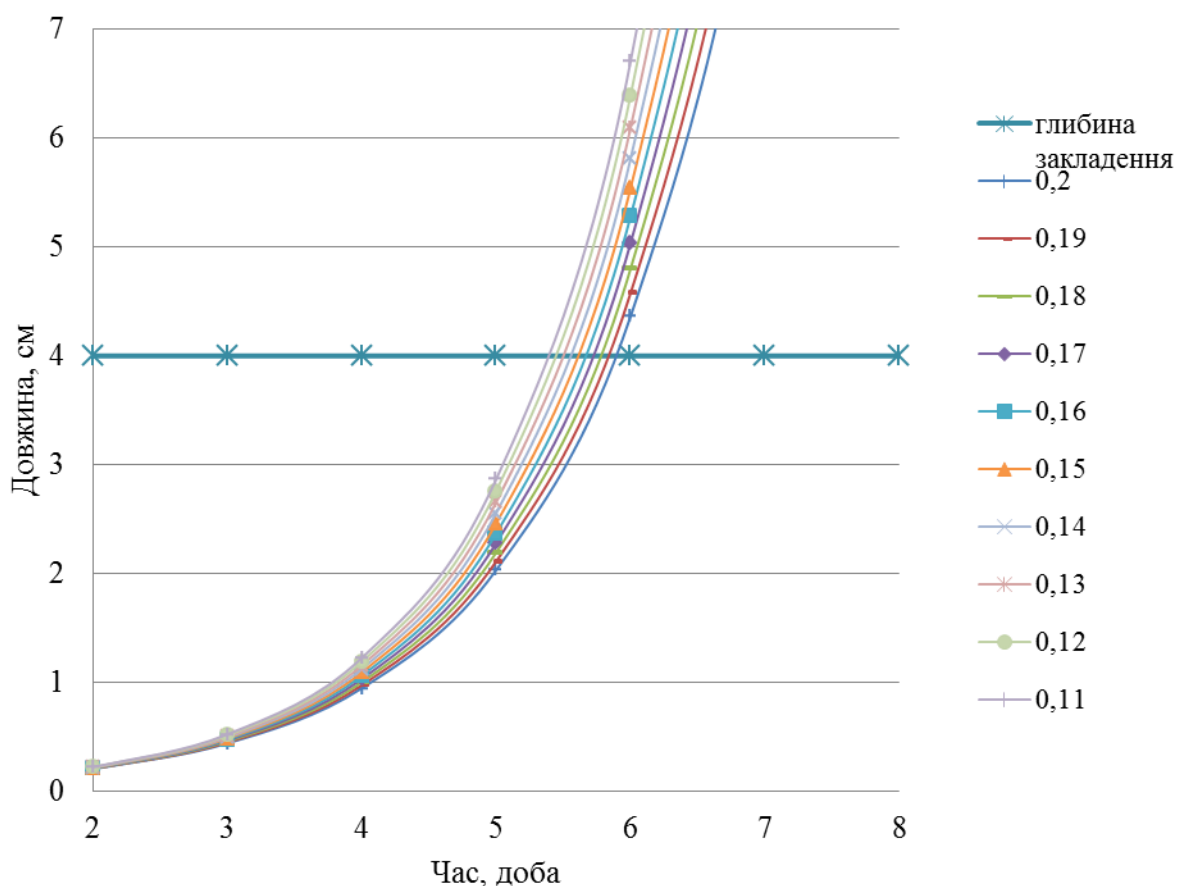


Рис. 4.5. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни початкової вологості насіння (0,11 – 0,2).

Далі розглянемо чутливість моделі до зміни початкової маси насіння.

Модель чутлива до зміни початкової маси насіння. Була обрана маса однієї насінини у інтервалі від 0,23 г до 0,32 г, через 0,01 г. Встановлено наступну залежність: зі збільшенням маси насіння швидкість накопичення ним води сповільнюється (табл. 4.10, рис.4.6). Цей факт можна пояснити твердженням А.І. Носатовського про те, що менші насінини мають більшу сисну силу, а також результатами, отриманими Г.П. Лафондом та Р. Бейкером, про те, що насіння меншого розміру починає проростати швидше, аніж насіння великого розміру [123, 124].

Однак, коли маса насіння перевищує 0,3 г, воно не здатне накопичити необхідну кількість води для початку росту осьових органів.

Таблиця 4.10

Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни маси насіння.

Маса насіння, г	Час, доба								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Вологість насіння, відн. од.								
0,23	0,16	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,24	0,16	0,34	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,25	0,16	0,34	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,26	0,16	0,33	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,27	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,28	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,29	0,16	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,3	0,16	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,31	0,16	0,30	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
0,32	0,16	0,30	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39

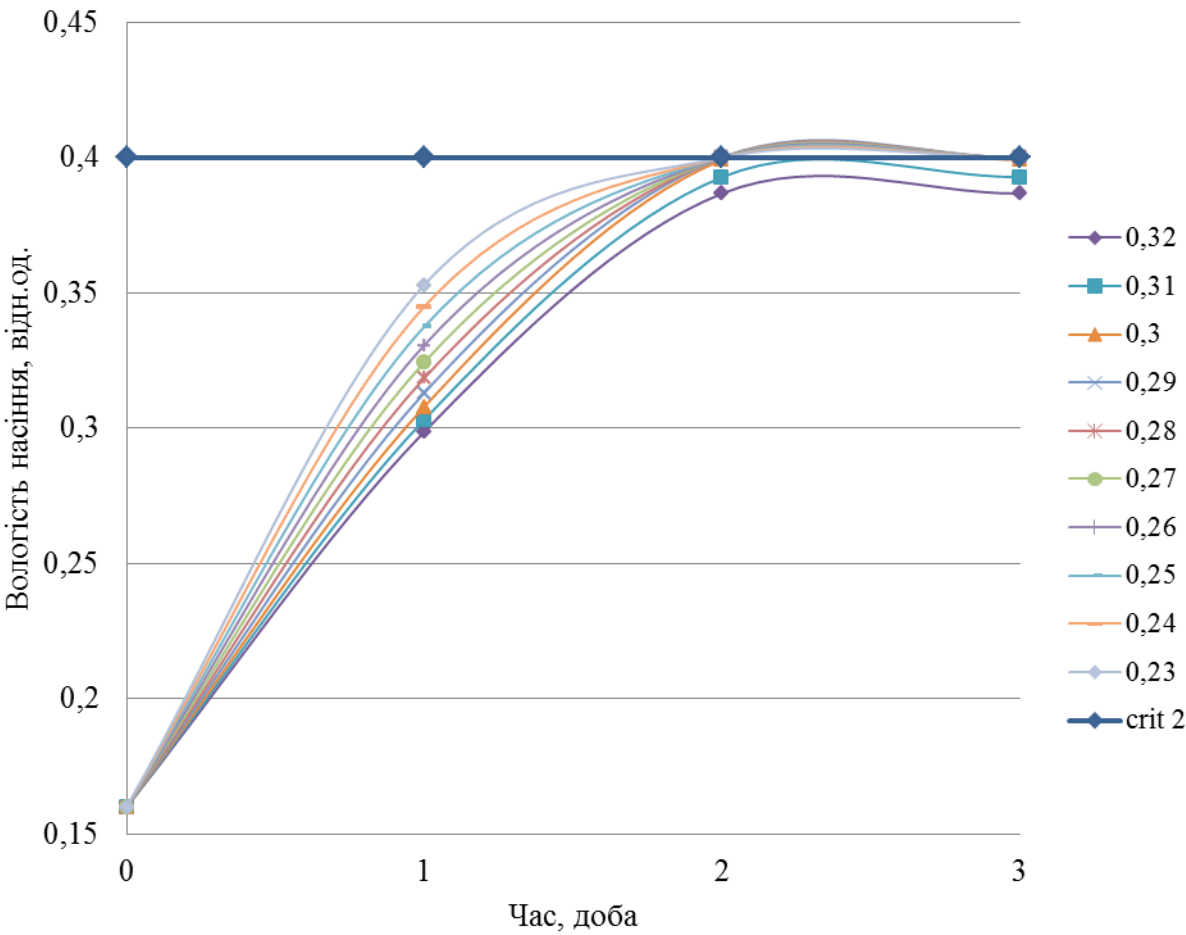


Рис. 4.6. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни маси насіння (0,23 – 0,3 г).

Через те, що ендоспермі насіння з більшою вагою міститься більше поживних речовин, тому їх гідроліз дещо прискорюється. За 6 діб може накопичитися близько 3600 мг вуглецю (табл. 4.11, рис. 4.7) та 900 мг азоту (табл. 4.12, рис. 4.8), коли вага насіння становить 0,29 г, та лише 2900 мг вуглецю і 715 мг азоту за маси насіння 0,23 г.

Таблиця 4.11

Чутливість моделювання накопичення вуглеводів до зміни маси насіння.

Маса насіння, г	Час, доба						
	2	3	4	5	6	7	8
	Вміст вуглецю, мг						
0,23	572,05	1144,11	1716,16	2288,21	2860,26	3432,32	4004,37
0,24	596,92	1193,85	1790,77	2387,70	2984,62	3581,55	4178,47
0,25	621,80	1243,59	1865,39	2487,19	3108,98	3730,78	4352,57
0,26	646,67	1293,34	1940,00	2586,67	3233,34	3880,01	4526,68
0,27	671,54	1343,08	2014,62	2686,16	3357,70	4029,24	4700,78
0,28	696,41	1392,82	2089,24	2785,65	3482,06	4178,47	4874,88
0,29	721,28	1442,57	2163,85	2885,14	3606,42	4327,70	5048,99
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

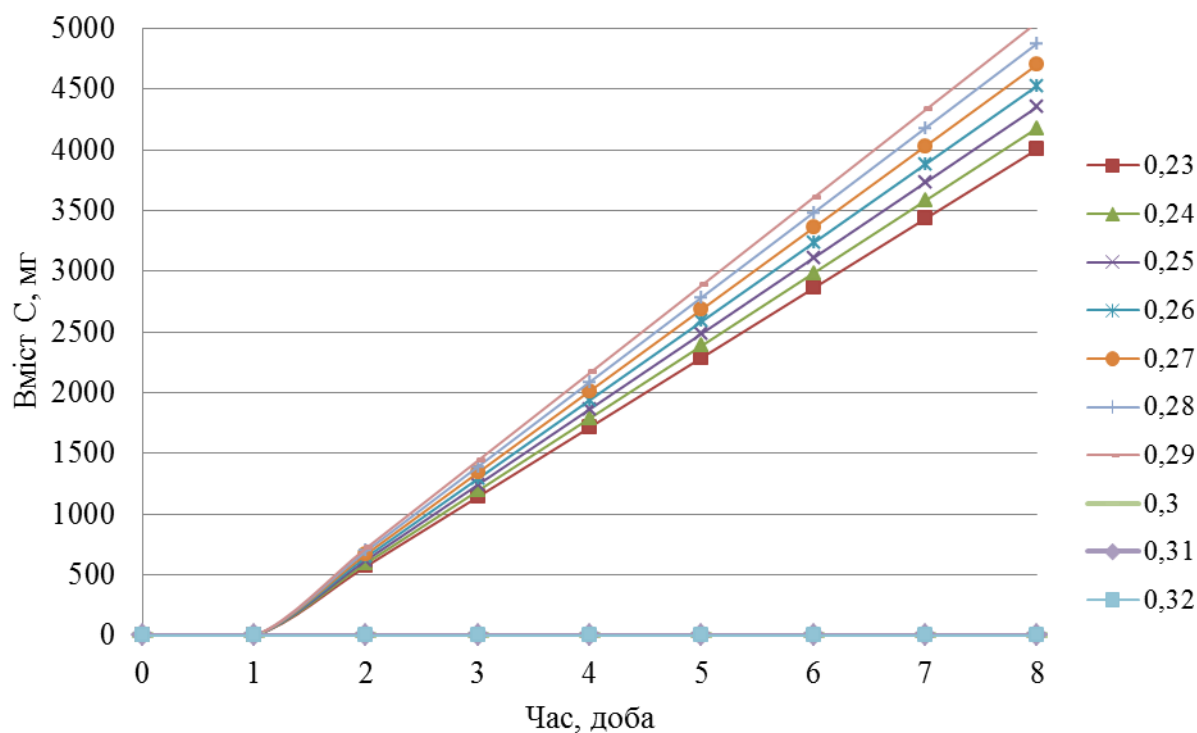


Рис. 4.7. Чутливість моделювання накопичення вуглеводів до зміни маси насіння (0,23 – 0,3 г).

Таблиця 4.12

Чутливість моделювання накопичення азоту до зміни маси насіння.

Маса насіння, г	Час, доба						
	2	3	4	5	6	7	8
	Вміст азоту, мг						
0,23	143,01	286,03	429,04	572,05	715,07	858,08	1001,09
0,24	149,23	298,46	447,69	596,92	746,16	895,39	1044,62
0,25	155,45	310,90	466,35	621,80	777,25	932,69	1088,14
0,26	161,67	323,33	485,00	646,67	808,34	970,00	1131,67
0,27	167,89	335,77	503,66	671,54	839,43	1007,31	1175,20
0,28	174,10	348,21	522,31	696,41	870,51	1044,62	1218,72
0,29	180,32	360,64	540,97	721,29	901,60	1081,93	1262,25
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

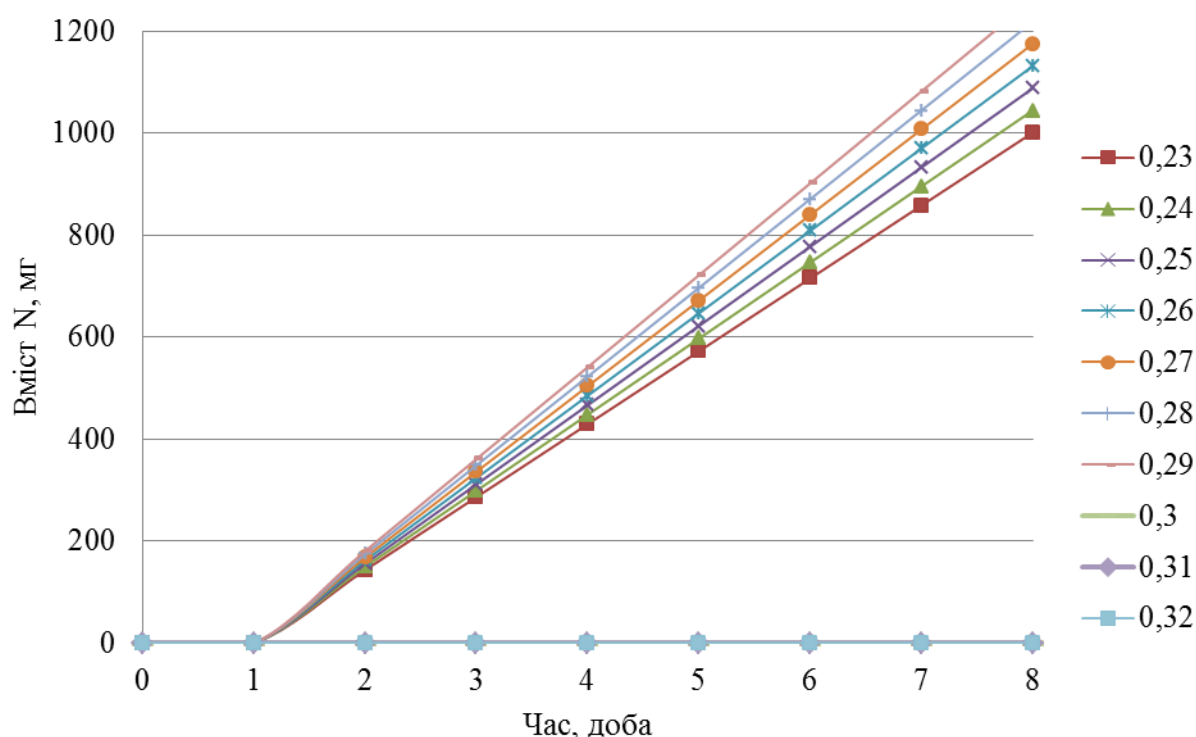


Рис. 4.8. Чутливість моделювання накопичення азоту до зміни маси насіння (0,23 – 0,3 г).

Оскільки насіння з великою масою так і не накопичують необхідну кількість вологи для початку росту осьових органів, тому в моделі зазначена відсутність росту колеоптиля з насіння вагою більше 0,3 г.

На відміну від процесу поглинання вологи під час росту пагона спостерігається протилежна залежність. Оскільки насінини з більшою масою

мають значніші запаси поживних речовин для підтримки та росту, тому подовження їх пагонів відбувається інтенсивніше. Так колеоптиль насіння з вагою 0,27 – 0,29 г досягне поверхні вже за 6 діб, а з масою 0,23 – 0,26 г – лише за 7 діб (табл. 4.13, рис. 4.9).

Таблиця 4.13

Чутливість моделювання подовження колеоптилю до зміни початкової маси насіння.

Маса насіння, г	Час, доба						
	2	3	4	5	6	7	8
	Довжина колеоптиля, см						
0,23	0,18	0,36	0,69	1,33	2,58	4,99	9,64
0,24	0,19	0,38	0,75	1,50	2,98	5,92	-
0,25	0,20	0,40	0,82	1,68	3,44	7,03	-
0,26	0,20	0,42	0,89	1,88	3,96	8,35	-
0,27	0,21	0,45	0,97	2,11	4,58	9,92	-
0,28	0,21	0,48	1,06	2,37	5,28	-	-
0,29	0,22	0,50	1,16	2,65	6,09	-	-
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

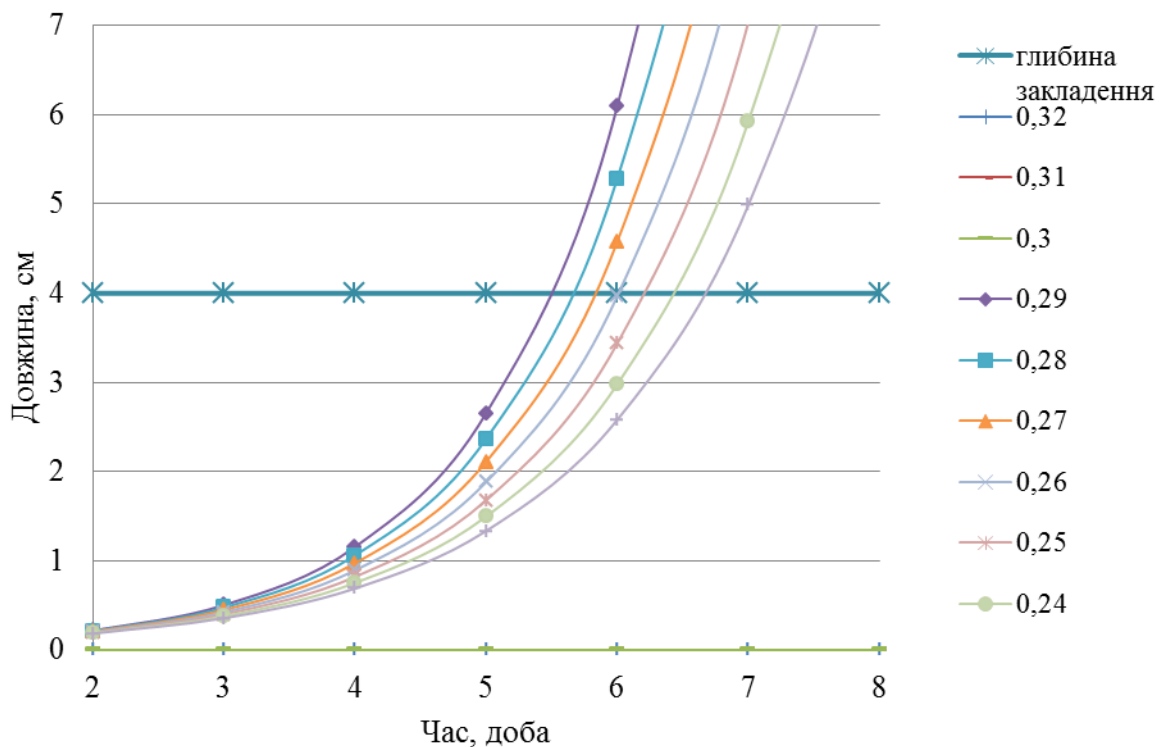


Рис. 4.9. Чутливість моделювання подовження колеоптилю до зміни початкової маси насіння.

4.2.2. Чутливість моделі до зміни параметрів моделі.

Розглянемо чутливість моделі до зміни поглинальної поверхні насіння. Даний параметр змінювався на 5, 10, 15 та 20% в обидві сторони від оптимального значення $2,5 \text{ см}^2$.

Збільшення поглинальної поверхні насіння призводить до прискорення поглинання води, оскільки збільшується саме активна поверхня. Так якщо значення даного параметру знаходяться в інтервалі $3,0 - 2,38 \text{ см}^2$, то насіння наклюнется вже за 2 доби (рис. 4.10). Якщо значення даного параметру становить $2,25 - 2,0 \text{ см}^2$, то початок росту затримується ще на добу.

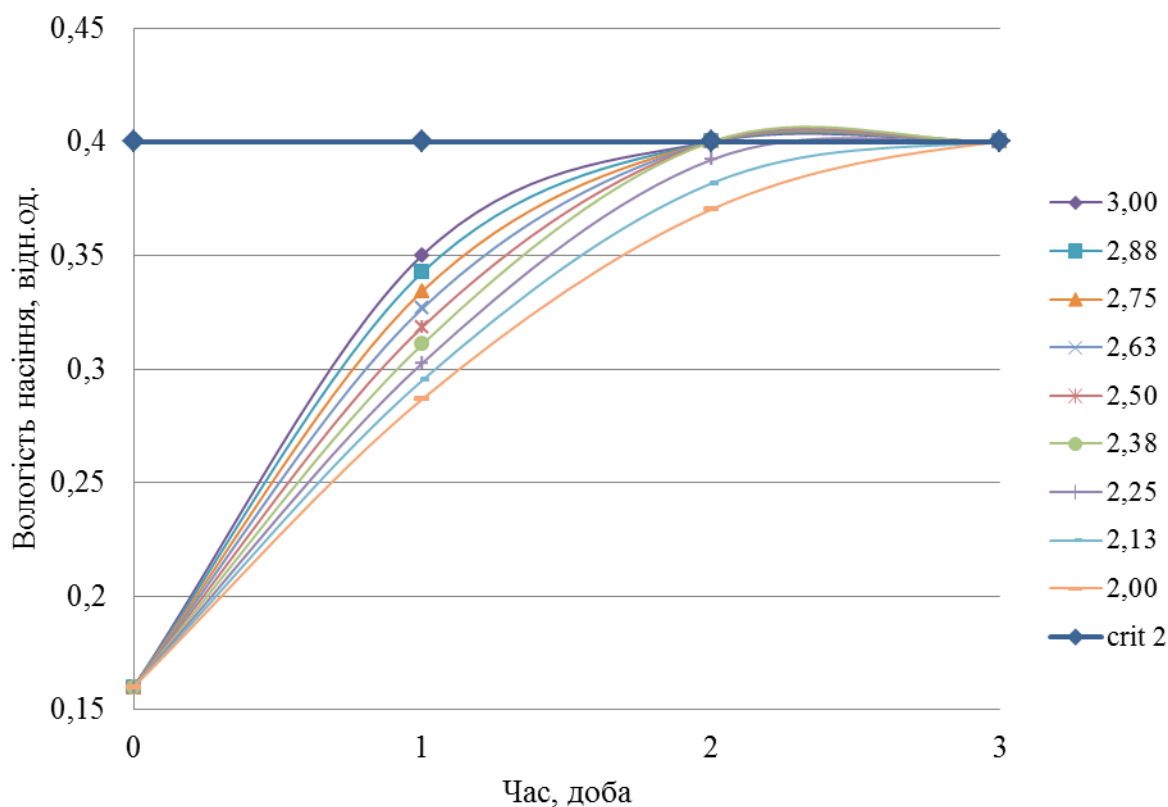


Рис. 4.10. Чутливість моделювання накопичення води насінням до зміни поглинальної поверхні насіння ($2 - 3 \text{ см}^2$).

Зміна поглинальної поверхні насіння лише опосередковано впливає на швидкість гідролізу та подовження пагона, адже інтенсивність цих процесів залишається незмінною, змінюється лише час їх початку. Так якщо площа

поглинальної поверхні становить $2,25 - 2,0 \text{ см}^2$, то зазначені процеси починаються на 1 добу пізніше.

Далі дамо оцінку чутливості моделі до зміни проникності оболонки насіння. Виявлено чутливість моделі до зміни проникності оболонки насіння. Даний параметр змінювався на 5, 10, 15 та 20% в обидві сторони від оптимального значення $0,0001 \text{ с / см}$.

Збільшення проникності оболонки насіння призводить до прискорення поглинання води (рис. 4.11). Так якщо значення даного параметру знаходяться в інтервалі $0,00012 - 0,000095 \text{ с / см}$, то насіння наклюється вже за 2 доби. Якщо значення даного параметру становить $0,0009 - 0,00008 \text{ с / см}$, то початок росту затримується ще на добу.

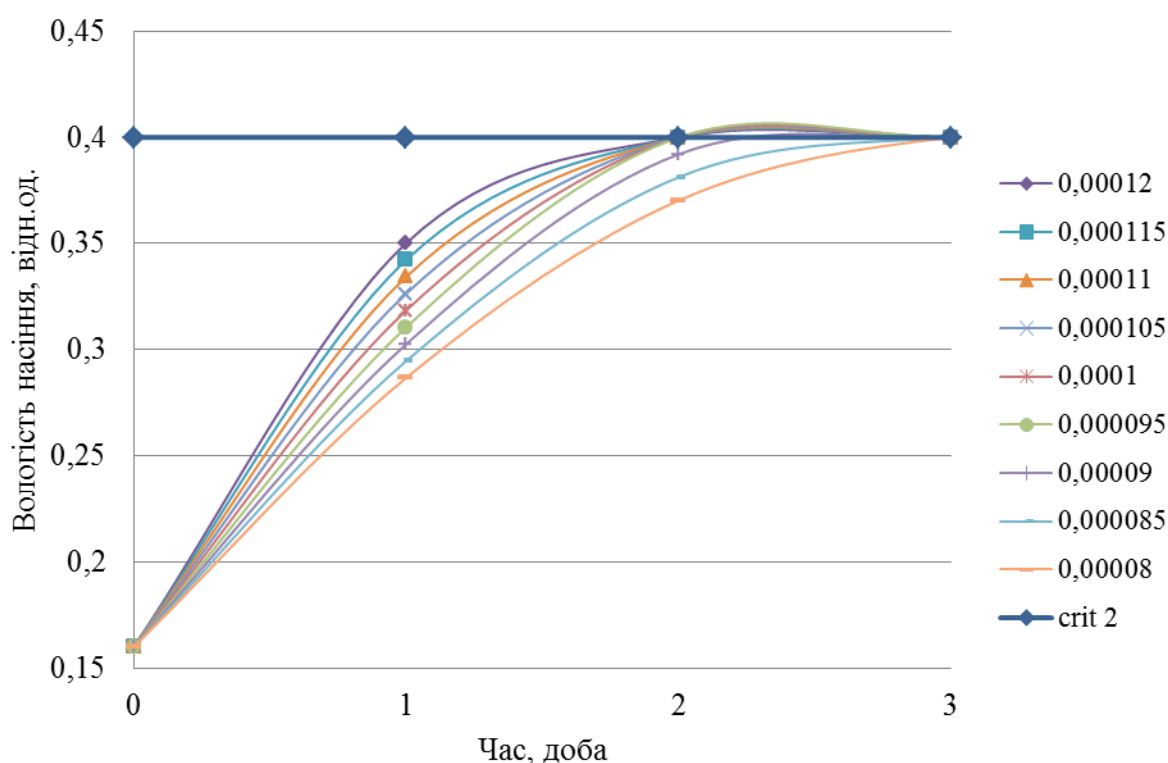


Рис. 4.11 Чутливість моделювання накопичення води насінням до зміни проникності оболонки насіння.

Зміна проникності оболонки насіння лише опосередковано впливає на швидкість гідролізу та подовження пагона, адже інтенсивність цих процесів залишається незмінною, змінюється лише час їх початку. Так якщо

проникності оболонки становить $0,0009 - 0,00008$ с / см, то зазначені процеси починаються на 1 добу пізніше.

Розглянемо чутливість моделі до зміни коефіцієнту швидкості гідролізу. Даний параметр змінювався на 5, 10, 15 та 20% в обидві сторони від оптимального значення $0,195$ г / добу.

Зміна даного параметру не впливає на поглинання води насінням. Однак його зменшення призводить до збільшення швидкості процесу гідролізу (рис. 4.12, 4.13). У випадку, якщо коефіцієнт гідролізу становить $0,156$ г / добу, то вже за 5 діб вміст доступного для росту вуглецю становитиме близько 3500 мг та 870 мг азоту.

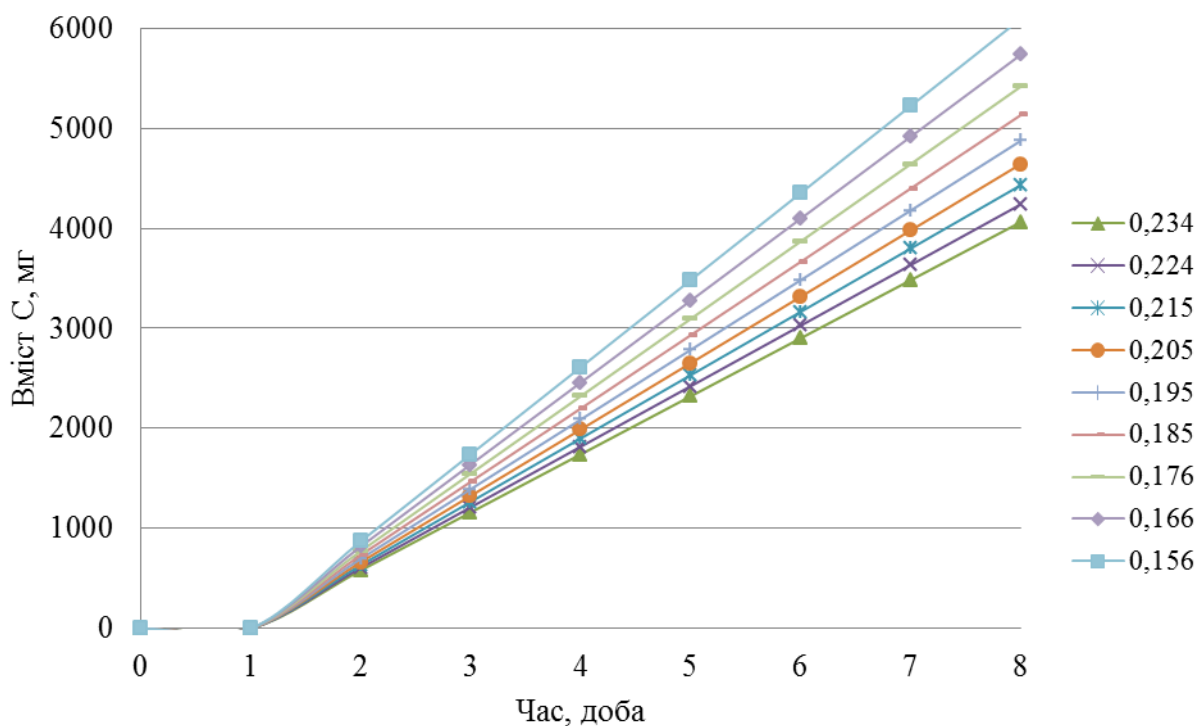


Рис. 4.12. Чутливість моделювання гідролізу вуглецю до зміни коефіцієнту швидкості гідролізу.

Проте, збільшення коефіцієнту швидкості гідролізу призводить до сповільнення процесу подовження пагона (рис. 4.14). Так якщо значення даного параметру знаходяться в інтервалі $0,156 - 0,166$ г / добу, то колеоптіль досягне поверхні вже за 5 діб. Якщо значення даного параметру

становить 0,176 – 0,205 г / добу, то поява сходів затримається на добу, а у випадку значення коефіцієнту швидкості гідролізу 0,215 г / добу та більше – появу сходів можна очікувати лише за тиждень.

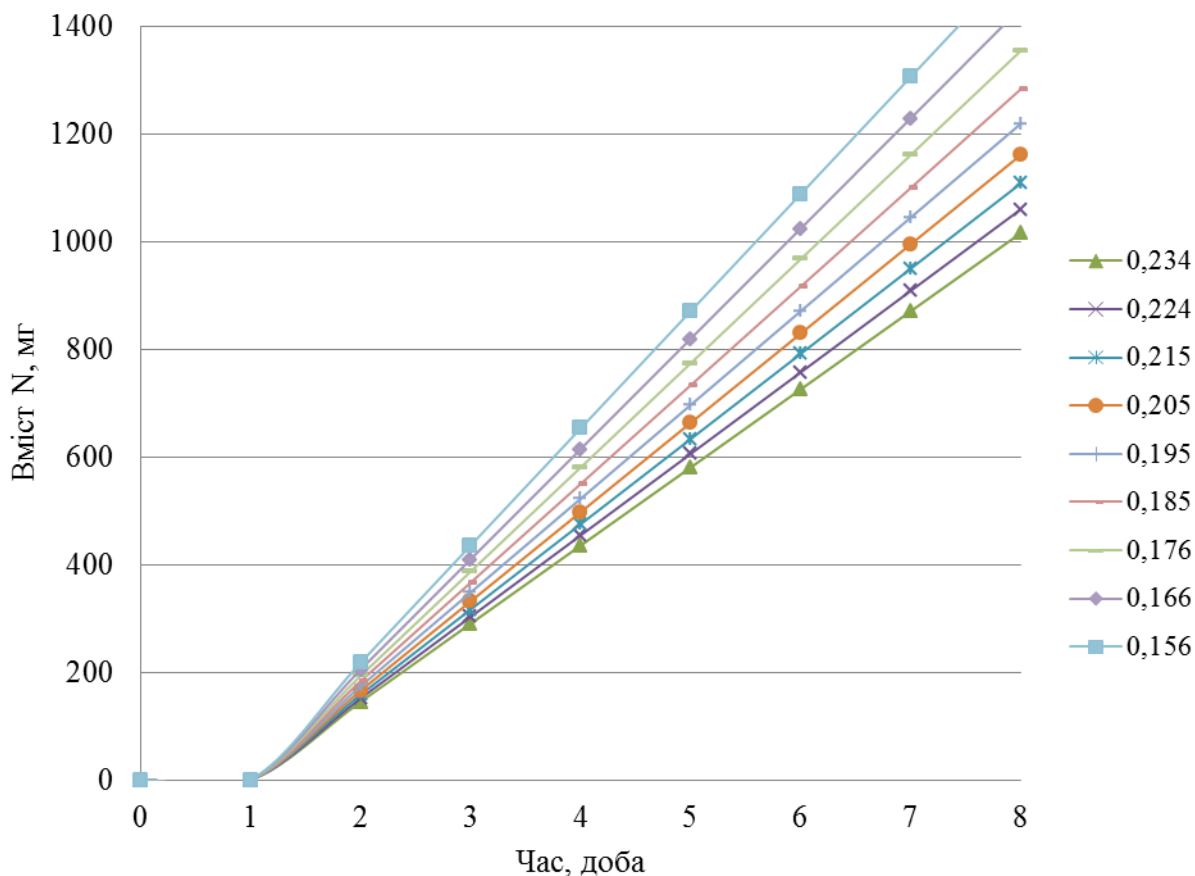


Рис. 4.13. Чутливість моделювання гідролізу азоту до зміни коефіцієнту швидкості гідролізу.

Дамо оцінку чутливості моделі до зміни коефіцієнту перерахунку речовин гідролізу. Зміна коефіцієнту перерахунку речовин гідролізу не впливає на швидкість поглинання води насінням. Однак, виявлено значний вплив на швидкість гідролізу запасних речовин та на подовження колеоптиля.

Зі збільшенням даного коефіцієнту зростає інтенсивність гідролізу вуглецю (рис. 4.15). Так на 5 добу, якщо $\alpha=0,64$, то кількість вуглецю становить близько 2200 мг, а якщо $\alpha=0,96$, то його вміст становить близько

3300 мг. У той самий час спостерігається протилежна залежність швидкості гідролізу азоту: на 5 добу, якщо $\alpha=0,64$, кількість азоту становить близько 1300 мг, а якщо $\alpha=0,96$, то його вміст становить лише 130 мг (рис. 4.16).

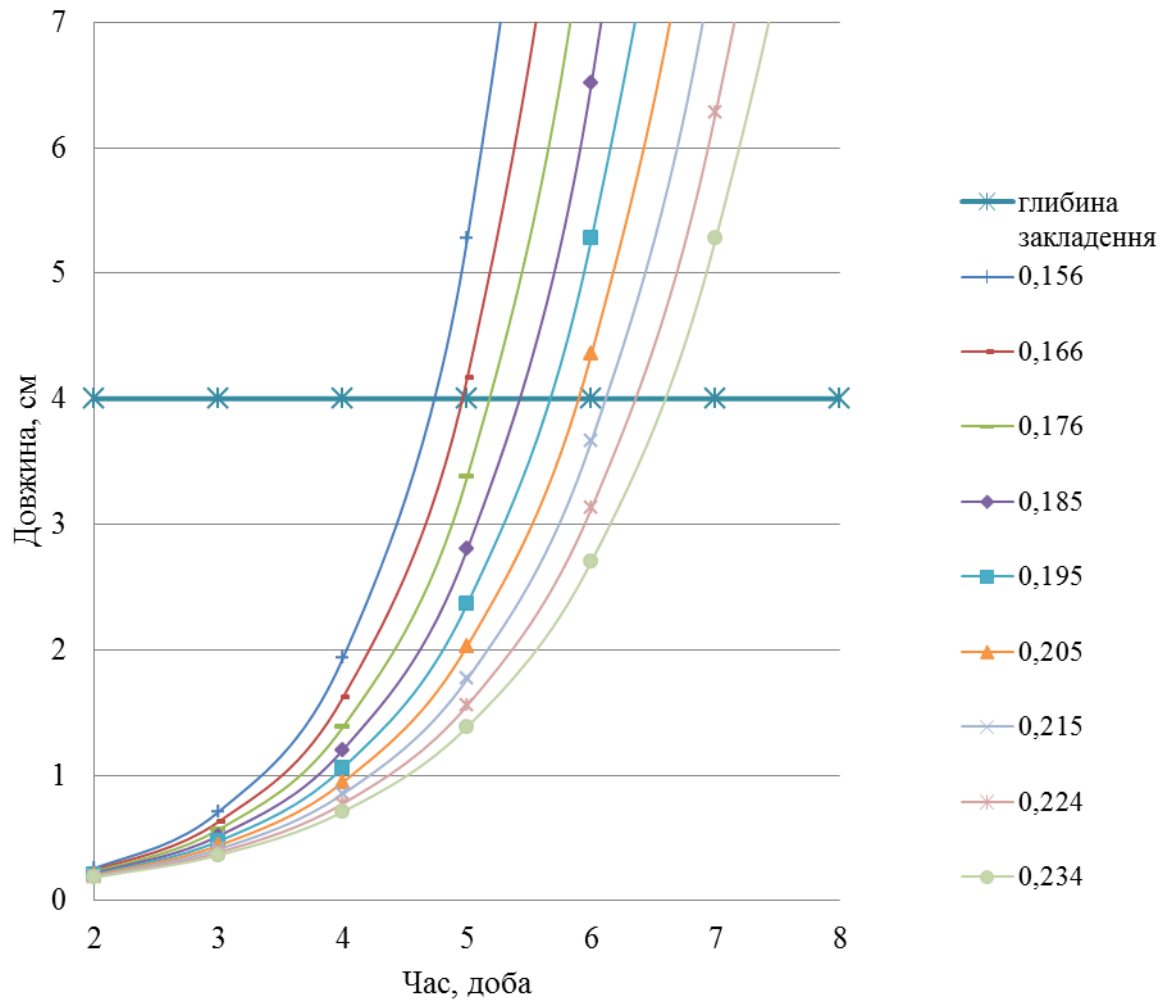


Рис. 4.14. Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни коефіцієнту швидкості гідролізу.

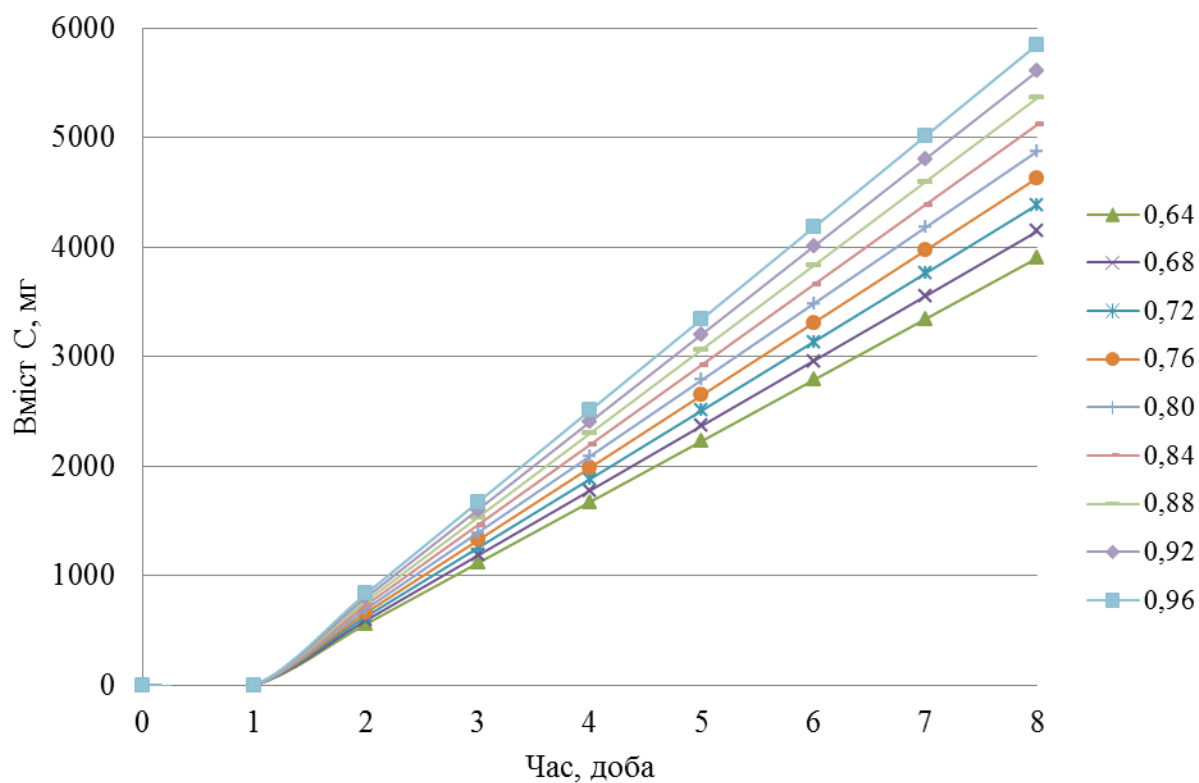


Рис. 4.15. Чутливість моделювання гідролізу вуглецю до зміни коефіцієнту перерахунку речовин.

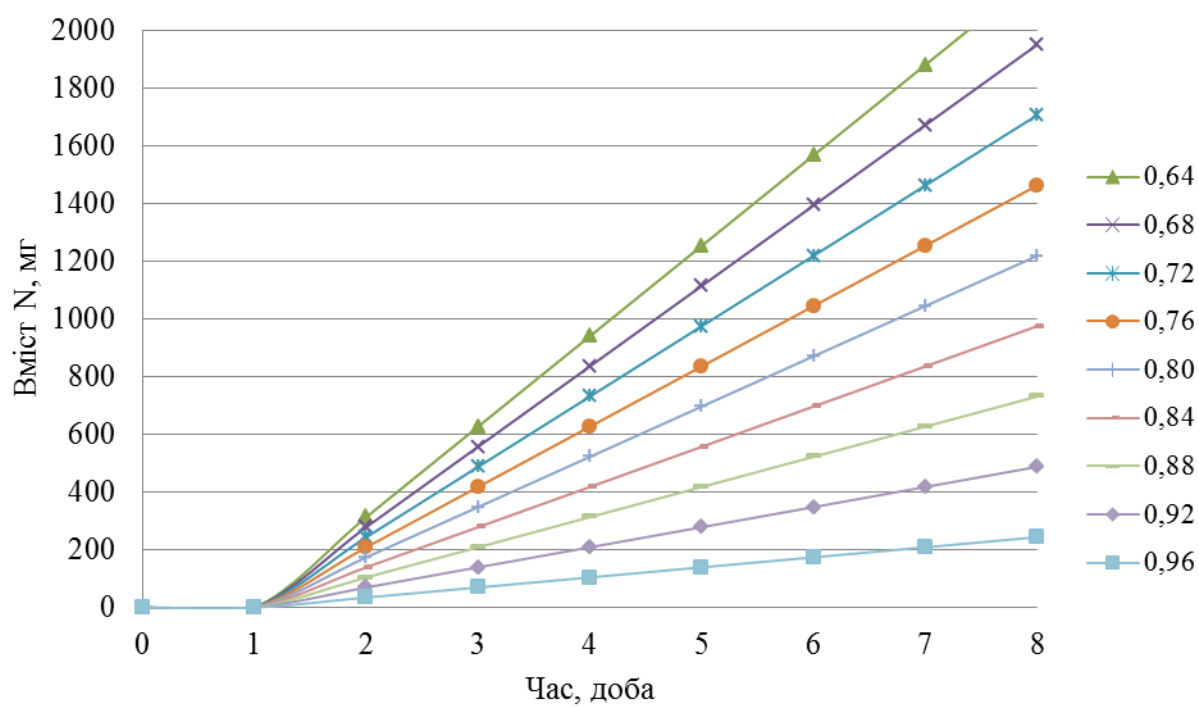


Рис. 4.16. Чутливість моделювання гідролізу азоту до зміни коефіцієнту перерахунку речовин.

Слід зазначити, що збільшення даного коефіцієнту призводить до прискорення процесу подовження пагону, а отже зменшення часу необхідного для появи сходів (рис. 4.17). Якщо α становить 0,92 – 0,96, сходи з'являться вже за 5 діб, 0,76 – 0,88 – за 6 діб. Колеоптіль досягне поверхні лише за тиждень, якщо α становить 0,64 – 0,72. Дану залежність можна пояснити тим, що на утворення сухої маси та ріст осевих органів витрачається більша частина вуглецю, що утворився в результаті гідролізу, у той час, коли утворений азот витрачається на дихання зернівки та проростка.

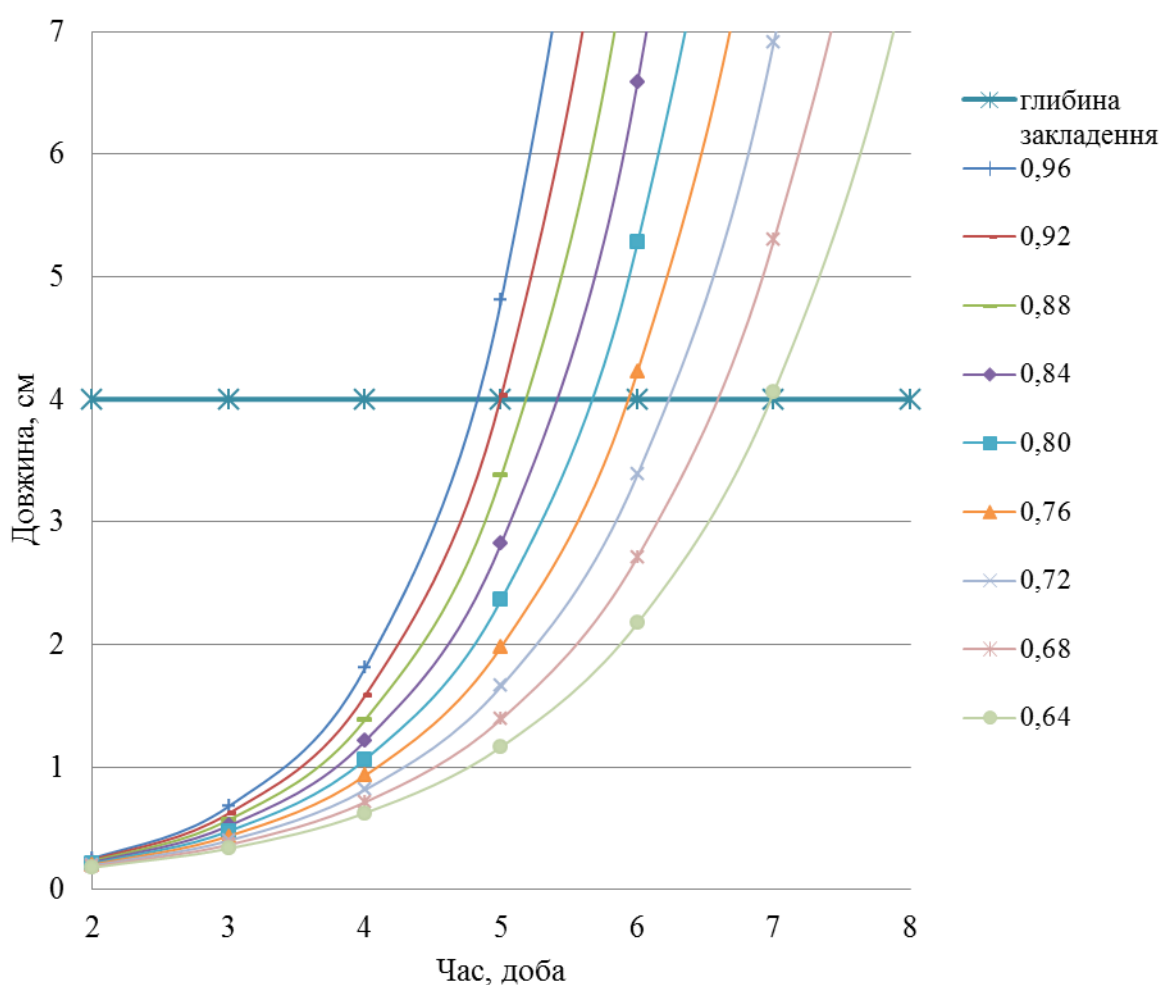


Рис. 4.17. Чутливість моделювання подовження пагону до зміни коефіцієнту перерахунку речовин.

Розглянемо чутливість моделі до зміни питомої щільності рослинної маси пагона. Даний параметр змінювався на 5, 10, 15 та 20% в обидві сторони

від оптимального значення $0,34 \text{ г / см}^3$.

Зміна даного параметру ніяким чином не впливає ані на поглинання води насінням, ані на швидкість гідролізу, однак збільшення питомої щільності рослинної маси пагона призводить до сповільнення процесу подовження пагона (рис. 4.18). Так якщо значення даного параметру знаходяться в інтервалі $0,27 - 0,29 \text{ г / см}^3$, то колеоптіль досягне поверхні вже за 5 діб. Якщо значення даного параметру становить $0,31 - 0,36 \text{ г / см}^3$, то поява сходів затримається ще на добу, а у випадку питомої щільності пагона $0,37 \text{ г / см}^3$ та більше – появу сходів можна очікувати лише за тиждень.

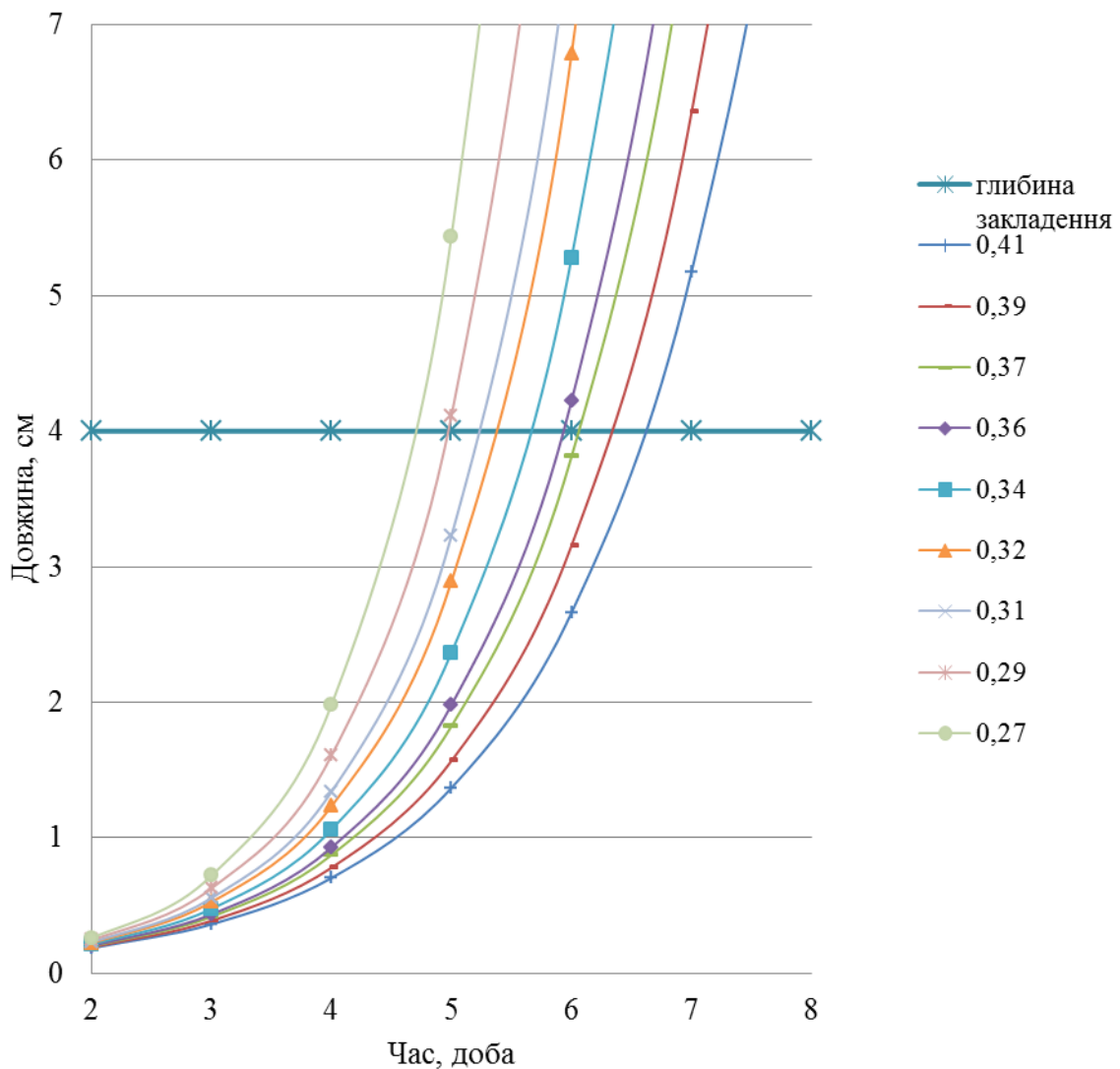


Рис. 4.18. Чутливість моделювання подовження пагону до зміни питомої щільності рослинної маси пагона.

4.2.3. Узагальнена оцінка чутливості моделі.

Кожен з параметрів моделі різною мірою впливає на адекватність роботи моделі. Неточність вимірювання початкових параметрів насіння неминуче призведе до похибки вихідних значень, розрахованих по моделі. Також це стосується параметрів та коефіцієнтів, що містяться в самій моделі.

Розглянемо залежність подовження колеоптилю від початкових параметрів насіння та коефіцієнтів моделі. З цією метою були проведені розрахунки по моделі за методом єдиного розходження зі зміною параметрів на 5, 10, 15 та 20%.

Коли значення параметрів моделі обрані на рівні оптимальних, то сходи з'являться на шосту добу, а розрахована довжина колеоптилю складатиме 5,28 см. Отже, при зміні кожного з параметрів під час дослідів відзначалася довжина колеоптилю саме на шосту добу, а значення 5,28 см було обране за середнє (табл. 4.14). Далі визначалося відхилення від середнього значення та вплив похибки визначення параметрів і коефіцієнтів на результати роботи моделі (табл. 4.15).

Зміна поглинальної поверхні насіння, так само, як проникності оболонки, стрибкоподібно впливає на подовження колеоптиля, лише її зменшення на 10 – 20% спричиняє затримання його росту. Це можна пояснити тим, що ці параметри є більш критичними під час накопичення вологи насінням, тому впливають на час початку ростових процесів, що і відображується у такому стрибку чутливості.

Модель досить рівномірно реагує на зміну початкової вологи насіння. Зменшення даного параметру пропорційно сповільнює ріст пагона.

Що стосується маси насіння, то її збільшення більше ніж на 5% призводить до значної похибки, що визначає межу чутливості моделі. Така особливість пояснюється тим, що насіння з великою масою, незважаючи на значні запаси поживних речовин, має дуже малу здатність накопичувати

вологу, тому неспроможне досягти необхідного рівня вологості для початку росту.

Зменшення питомої щільності рослинної маси пагона значно прискорює подовження пагона, її збільшення – навпаки. Оскільки щільність колеоптиля менша, то і сухої маси на побудову кожного його сантиметру необхідно менше, що у свою чергу і прискорює появу сходів. Аналогічна залежність спостерігається і з радіусом основи пагона.

Зростання коефіцієнту швидкості гідролізу запасних речовин насіння прискорює появу сходів, оскільки таким чином усе більша маса поживних речовин в результаті гідролізу стає доступною для утворення нових клітин молодій рослини.

Очевидним є вплив коефіцієнту розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем на появу сходів. Чим більше даний коефіцієнт, тим більше сухої маси утвореної в результаті перетворення продуктів гідролізу ендосперму використовується саме на ріст пагона. Збільшення цього коефіцієнту на 15% удвічі прискорює процес подовження колеоптиля.

Встановлено, що коефіцієнт витрат на дихання підтримки не впливає на подовження колеоптиля.

4.3. Деталізація (з погодинним кроком) вивчення чутливості процесу

З метою уточнення та деталізації роботи моделі, а також більш детального вивчення процесу проростання насіння у першу та другу добу розрахунки велися із кроком в одну годину. Оскільки у зазначений період переважно відбувається лише накопичення вологи насінням, тому проведено повторний аналіз чутливості інтенсивності накопичення вологи до змін параметрів навколишнього середовища та посівного матеріалу, але з кроком у 1 годину.

Таблиця 4.15

Вплив похибки визначення параметрів моделі на точність розрахунків довжини колеоптиля (похибка розрахунку довжини колеоптиля, %).

Параметр	Умовне позначення	зменшення, %				середнє	збільшення, %			
		20	15	10	5		5	10	15	20
Поглиналина поверхня насіння	S_s	55,2	55,2	55,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Вологість насіння початкова	W_s	-16,5	-12,1	-7,9	-3,9	0,0	3,7	7,4	10,8	14,2
Маса насіння	m_s	55,2	45,2	18,2	18,2	0,0	-22,2	100,0	100,0	100,0
Проникність оболонки насіння	P_s	55,2	55,2	55,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Питома щільність рослинної маси пагона	ρ_{sp}	-182,9	-99,7	-47,4	-28,5	0,0	20,0	27,8	40,2	49,6
Радіус основи пагона	r_{sp}	-56,3	-38,4	-23,5	-10,8	0,0	9,3	17,4	24,4	30,6
Коефіцієнт швидкості гідролізу запасних речовин насіння	K_s^{gid}	48,8	40,7	30,6	17,4	0,0	-23,5	-56,2	-103,0	-172,6
Коефіцієнт розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем	γ	60,2	49,9	36,9	24,2	0,0	-25,9	-58,5	-99,6	-151,4
Коефіцієнт для перерахунку продуктів гідролізу	α	55,2	55,2	55,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Коефіцієнт витрат на дихання підтримки	c_m	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Проведено порівняння моделювання інтенсивності процесу накопичення води насінням при оптимальних умовах (температурі ґрунту 22°C та вологості 7 мм) з кроком у часі 1 доба та 1 година. Графічне вираження отриманих результатів на рівняння отриманих кривих представлені на рисунку 4.19. На основі кривих накопичення води насінням за оптимальних умов шляхом апроксимації були отримані лінійні тренди та рівняння вигляду

$$y = 0,005x + 0,1728 \quad (4.2)$$

для моделювання з кроком в 1 годину та рівняння вигляду

$$y = 0,0045x + 0,1742 \quad (4.3)$$

для моделювання з кроком в 1 годину. Такі залежності свідчать про досить тісний зв'язок отриманих результатів.

При порівнянні отриманих результатів моделювання встановлено, що при деталізації моделі швидкість накопичення води дещо зменшується, через що момент досягнення критичного рівня вологості змінюється у бік подовження. Так, наприклад, у разі оптимальних умов на другу добу вологість насіння при моделюванні з кроком в 1 день досягне значення 0,4, коли при проведенні аналогічних розрахунків з кроком 1 година – лише 0,38. Таке відхилення пояснюється не лінійністю процесу поглинання води. Однак, відхилення складає лише 0,02, що лежить в межах допустимої похибки.

Детальний розгляд процесу накопичення води та чутливості моделювання до зміни параметрів навколишнього середовища і початкових характеристик насіння показав збіг направленості процесу в порівнянні із стандартним моделюванням з кроком в 1 добу, відмінності виявлені в абсолютних значеннях. Погодинне моделювання показує дещо сповільнене набухання насіння.

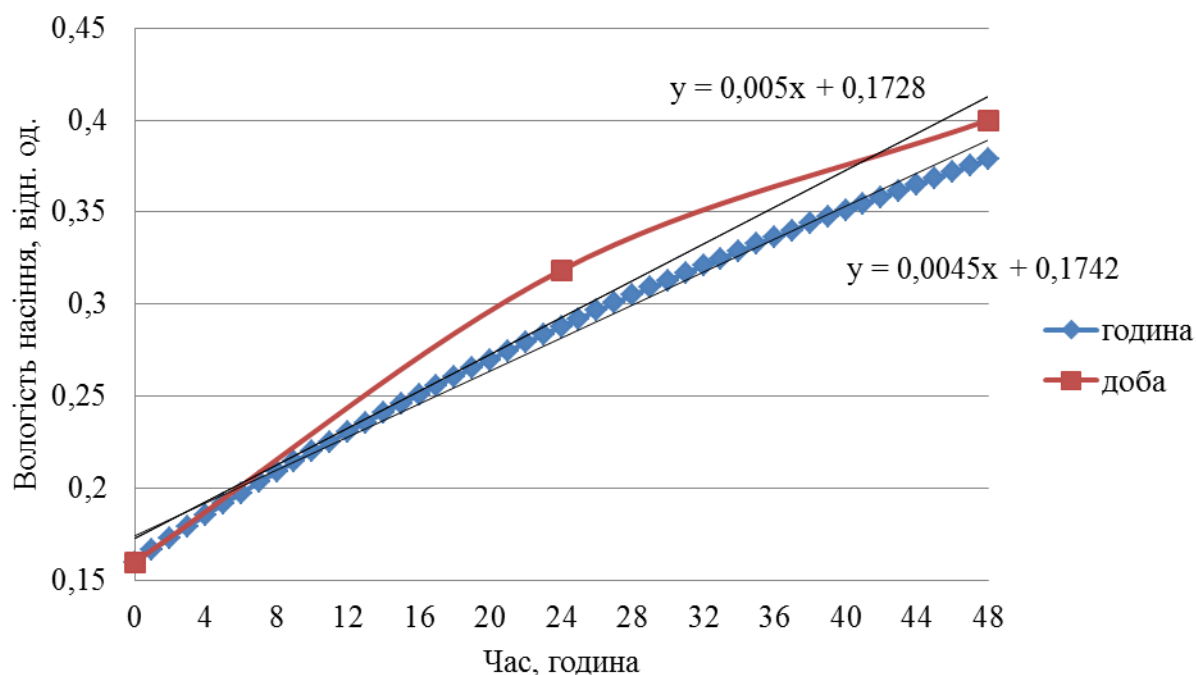


Рис. 4.19. Моделювання накопичення вологи насінням за оптимальних умов та з кроком у часі 1 година та 1 доба.

Звісно, підвищення температури покращує засвоєння насінням води з ґрунту (рис. 4.20), так само, як і збільшення вологості ґрунтового середовища (рис. 4.21), але за 48 годин насіння не досягне необхідного рівня зволоженості, в той час коли при по-добовому моделювання цей рівень досягнуто рівно за 2 доби. Незважаючи на це розбіжність невелика, оскільки насінню знадобиться для цього лише приблизно 2 – 3 години. В якості прикладу розрахованих числових значень наведено таблицю 4.16, чутливості моделювання накопичення вологи до температури ґрунту.

Схожа картина спостерігається при зміні початкової вологості насіння (рис. 4.22). Зменшення маси насіння прискорює процес поглинання вологи і коли початкова маса становить 0,23 – 0,25 г (рис. 4.23) – початок ростових процесів можливий за 48 годин.

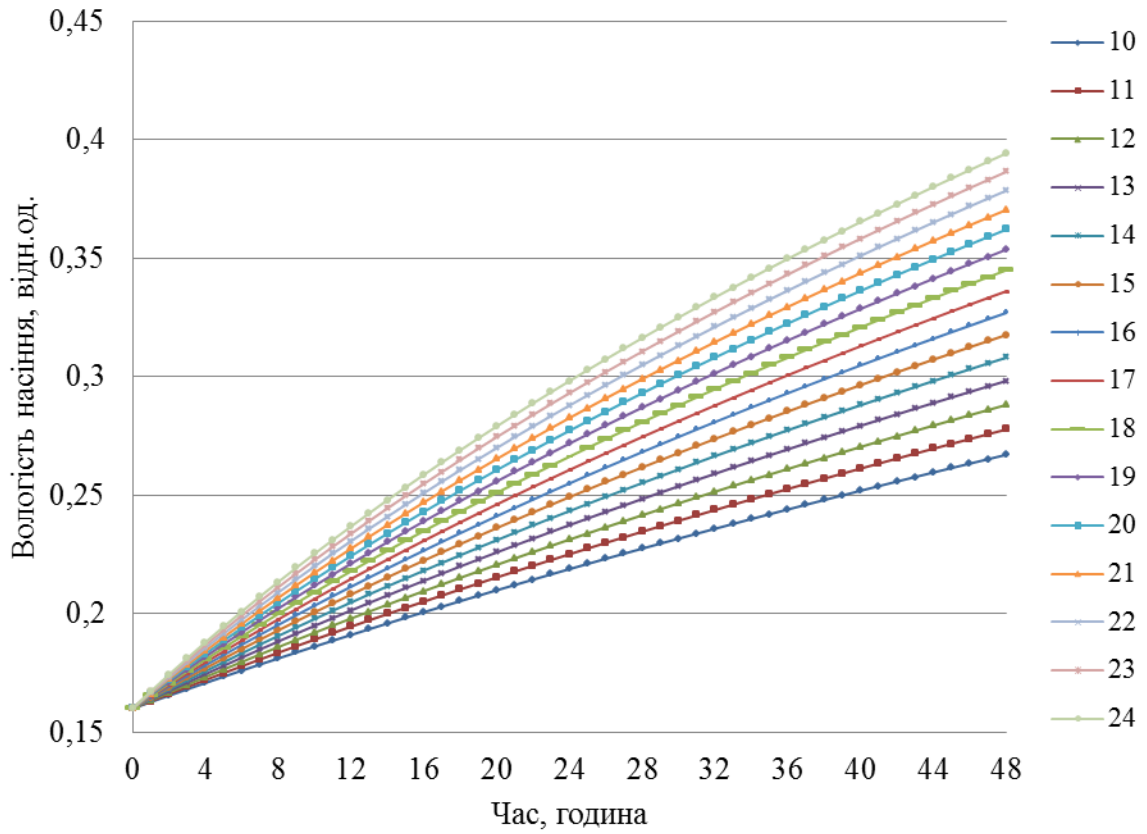


Рис. 4.20. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до температури ґрунту (10 – 24°C).

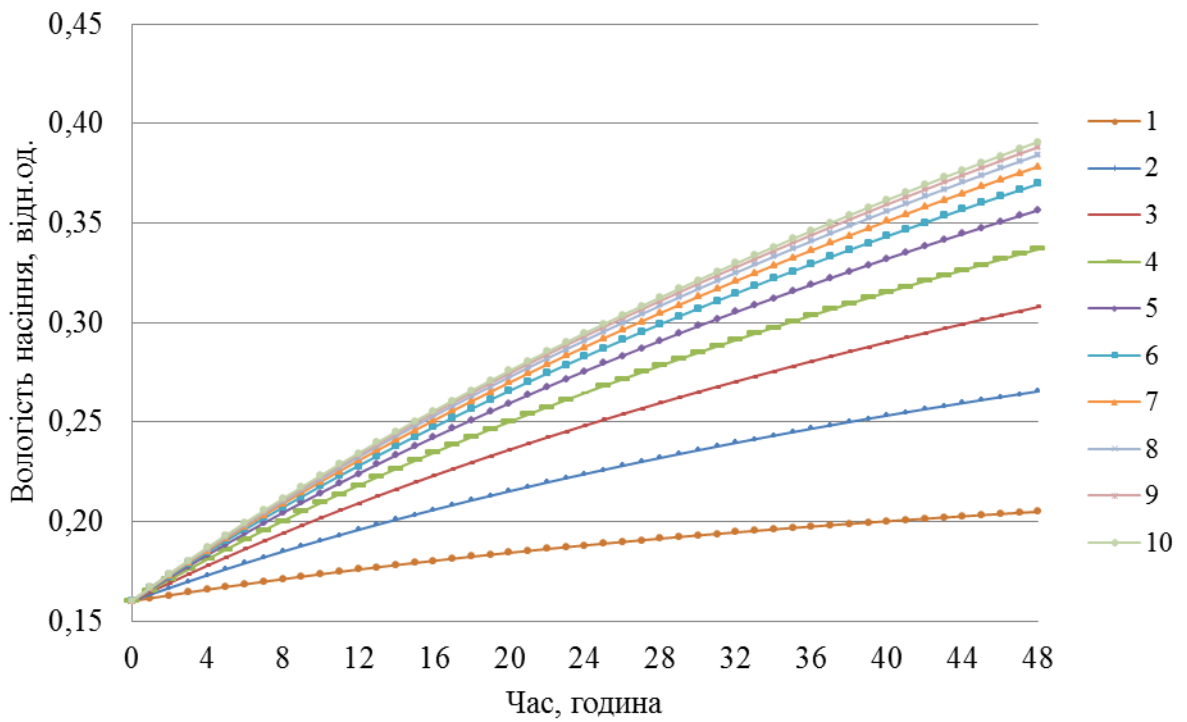


Рис. 4.21. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до вологості ґрунту (1 – 10 мм).

Таблиця 4.16

Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до зміни температури ґрунту.

Температура ґрунту, °C	Час, година																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Вологість насіння, відн. од.																							
10	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
11	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23
12	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23
13	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24
14	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25
17	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
18	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27
19	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27
20	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28
21	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28
22	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29
23	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29
24	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,2	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,3

Примітка. Вологість 0,16 – 0,19 відн. од.

Вологість 0,2 – 0,29 відн. од.

Вологість 0,3 – 0,39 відн. од.



Продовж. табл. 4.16.

Температура грунту, °C	Час, година																							
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	Вологість насіння, відн. од.																							
10	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27
11	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28
12	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29
13	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3
14	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31
15	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32
16	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33
17	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34
18	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34
19	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35
20	0,28	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36
21	0,29	0,29	0,29	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37
22	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38
23	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39
24	0,3	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39

Примітка. Вологість 0,16 – 0,19 відн. од.

Вологість 0,2 – 0,29 відн. од.

Вологість 0,3 – 0,39 відн. од.



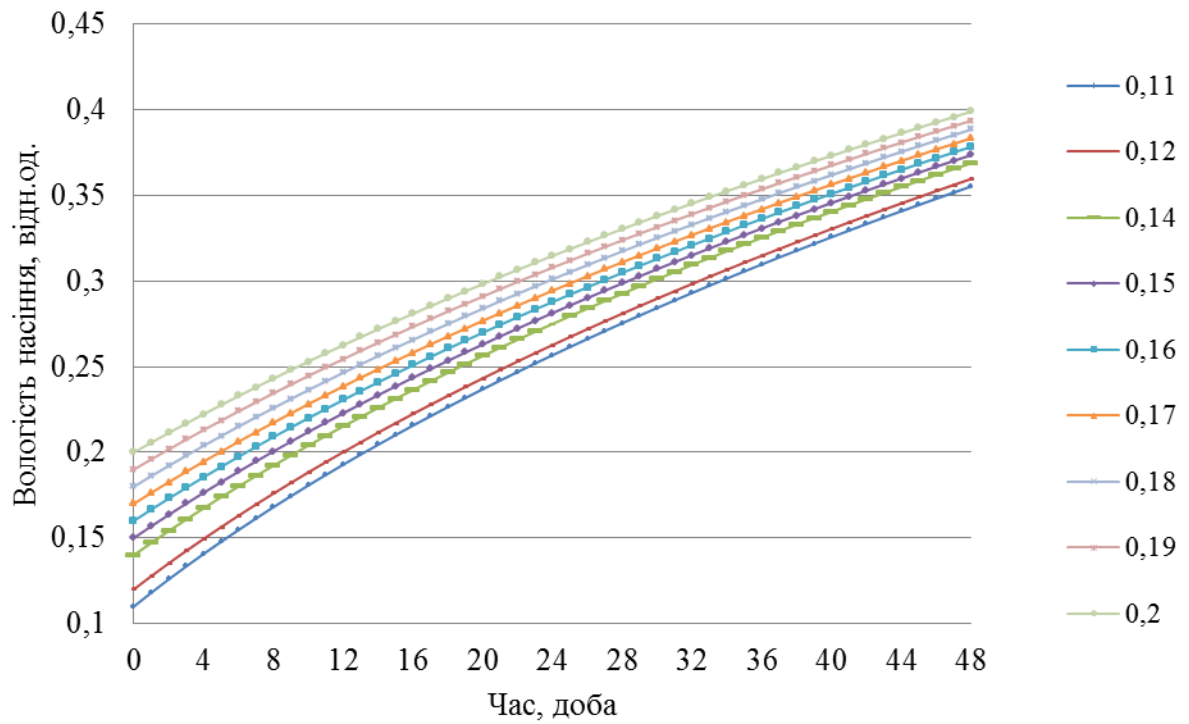


Рис. 4.22. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до початкової вологості насіння (0,11 – 0,20 від. од.).

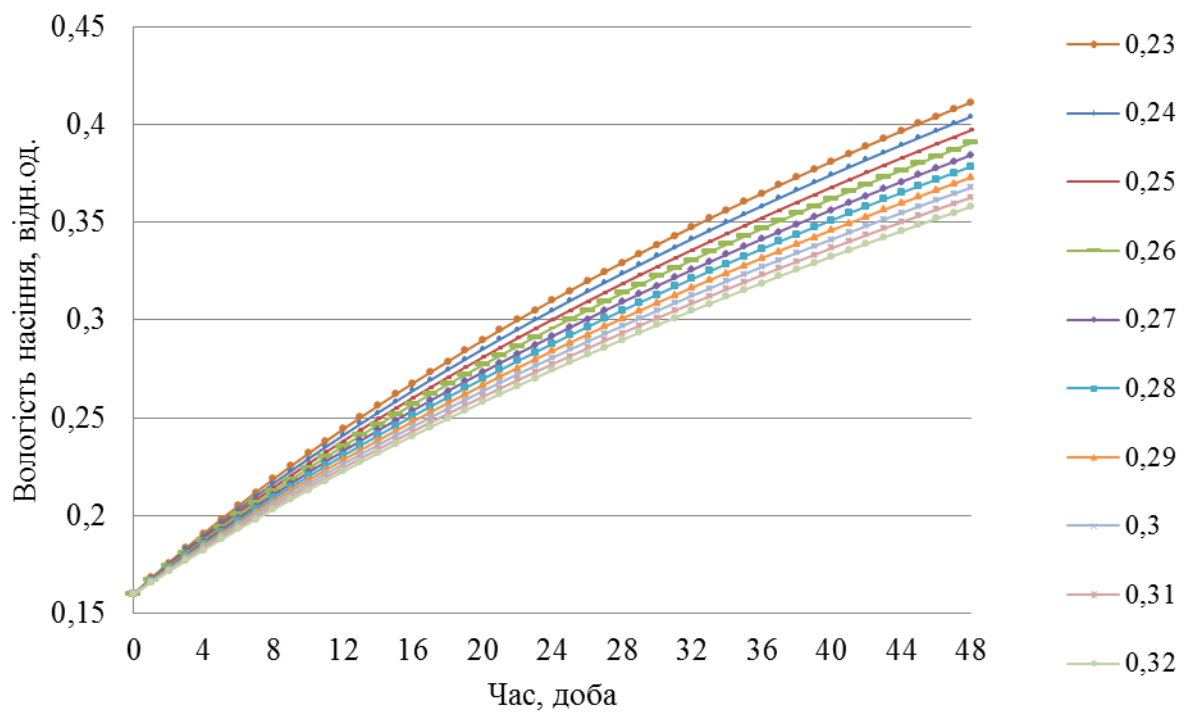


Рис. 4.23. Чутливість моделювання накопичення вологості насінням до маси насіння (0,23 – 0,32 г).

Висновки до розділу 4

1. Проведена оцінка адекватності моделі. Модель дає досить адекватні результати, що підтверджується достовірністю апроксимації (коефіцієнтом кореляції) $R^2=0,8$, тобто зв'язок фактичних та розрахованих за моделлю даних є досить тісним.

2. Визначена чутливість до зміни параметрів моделі. Визначено вплив параметрів посівного матеріалу (поглинальної поверхні, початкової вологості, маси та проникності оболонки насіння), параметрів новоутвореної рослини (питома щільність рослинної маси та радіус основи пагона) та коефіцієнтів моделі (швидкості гідролізу запасних речовин насіння, розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем, перерахунку продуктів гідролізу, витрат на дихання підтримки).

3. Встановлено, що зміна поглинальної поверхні насіння та проникності його оболонки, стрибкоподібно впливає на подовження колеоптиля, тобто лише зменшення цих параметрів на 10 – 20% спричиняє затримання його росту, оскільки ці параметри є більш критичними під час накопичення вологи насінням та впливають на час початку ростових процесів.

4. Збільшення поглинальної поверхні насіння призводить до прискорення поглинання вологи. Коли площа поверхні насіння становить $3,0 - 2,38 \text{ см}^2$, насіння набубнявіє за 2 доби. Якщо площа менша, то ріст починається на добу пізніше.

5. У процесі накопичення вологи різна початкова вологість насіння має значення лише у першу добу після висіву, оскільки сухіше насіння поглинає воду швидше, а отже інтенсивність накопичення вологи їм більша. Насіння з початковою вологістю 20% за першу добу поглинає 14% вологи, у той час коли за аналогічних умов насіння з початковою вологістю 10% поглинає 20%

вологи. Надалі різниця в інтенсивності зазначеного процесу згладжується та набубнявіння відбувається одночасно.

6. Зменшення початкової вологи насіння пропорційно сповільнює ріст пагона. Різниця кількості накопичених вуглеводів у випадку вологості насіння 11% та 20% становить лише 149 мг та 37 мг для азоту на початку процесу гідролізу, але на шосту добу вона становить вже 370 та 93 мг відповідно. Аналогічна залежність спостерігається у процесі подовження колеоптиля, однак у будь-якому випадку сході з'являються за 6 діб.

7. Збільшення початкової маси насіння більш ніж на 5% призводить до значної похибки, що визначає межу чутливості моделі. Отже, насіння з великою масою, незважаючи на значні запаси поживних речовин, має дуже малу здатність накопичувати вологу, тому неспроможне досягти необхідного рівня вологості для початку росту.

8. Гідроліз запасів поживних речовин прискорюється зі збільшенням маси насіння. Зі збільшенням маси насіння від 0,23 до 0,28 г інтенсивність гідролізу вуглеводів зростає від 572 мг за добу до 721 мг, а азоту – від 143 мг до 180 мг відповідно.

9. Збільшення початкової маси насіння прискорює появу сходів. Якщо маса насіння становить 27 – 29 г, насіння досягає поверхні за 6 діб, якщо його маса 23 – 26 г – за 7 діб.

10. Збільшення коефіцієнту швидкості гідролізу сповільнює процес подовження пагона. Коли значення цього коефіцієнту знаходяться в інтервалі 0,156 – 0,166 г / добу, колеоптіль досягає поверхні за 5 діб. Коли значення коефіцієнту становить 0,215 г / добу та більше – появу сходів можна очікувати лише за тиждень.

11. Коефіцієнт розподілу запасів сухої маси між колеоптилем та коренем удвічі прискорює процес подовження колеоптиля при збільшенні його на 15%. Зменшення питомої щільності рослинної маси пагона також прискорює подовження пагона.

12. Проведено деталізацію роботи моделі на початковому етапі набубнявіння насіння шляхом розрахунків з кроком в 1 годину та проведено порівняння із стандартними розрахунками з кроком в 1 годину. Встановлено, що при деталізації моделі описана швидкість накопичення вологи зменшується та терміни запуску ростових процесів затримуються на 2 % в порівнянні із стандартними розрахунками. Таке відхилення пояснюється не лінійністю процесу поглинання вологи та лежить в межах допустимої похибки.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ВПЛИВУ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СХОДІВ

Модель була реалізована на ПК за допомогою програми Microsoft Office Excel. Для ідентифікації параметрів моделі була обрана кукурудза. Більшість початкових параметрів було отримано в результаті проведення експерименту з пророщування насіння кукурудзи в лабораторних умовах. Однак деякі параметри були отримані шляхом проведення аналізу наявних у літературі даних, а також за допомогою оптимізації та ручної добірки.

Проведено ряд чисельних експериментів з дослідження чутливості моделі до зміни параметрів навколишнього середовища під час проростання насіння.

З метою отримання детальнішої інформації про динаміку впливу зміни умов навколишнього середовища проведено ряд чисельних експериментів, де кожний параметр змінювався на певну одиницю. Тобто температура змінювалася на 1°C , вологість – на 1 мм, а щільність ґрунту – на $0,1 \text{ г/см}^3$. Визначався вплив зміни температури, вологості та щільності ґрунту на інтенсивність процесів у насінні, що покладені в основу моделі, таких як накопичення вологи насінням, гідроліз запасів ендосперму та їх розподіл, подовження колеоптиля.

Модель чутлива до зміни температури на 1°C , вологості на 1 мм та зміни щільності ґрунту на $0,1 \text{ г/см}^3$. Початкові параметри також можна варіювати, задаючи розмір насіння та його вологість при висіванні, змінювати найменшу вологоємність в залежності від типу ґрунту. У якості кроку в часі обрано одну добу. Розглядався шар суглинкового ґрунту товщиною 10 см з найменшою вологоємністю 10 мм. Оптимальна вологість ґрунту складає 8 мм.

Основними агрометеорологічними факторами, що впливають на час

появи та повноту сходів є температура, вологість та щільність ґрунту.

Відомо, що процес появи сходів складається з двох послідовних фаз: 1) поглинання насінням води і його набубнявіння; 2) ріст пагону і досягнення ним поверхні ґрунту. Тому чисельний експеримент також було розділено на два основні етапи: 1) дослідження швидкості накопичення води насінням; 2) дослідження швидкості подовження колеоптилю під впливом факторів зовнішнього середовища.

Вплив агрометеорологічних умов на проростання насіння та формування сходів описано за умови збереження постійних умов протягом всього періоду та у випадку різних комбінацій агрометеорологічних умов окремо.

5.1. Оцінка впливу температури ґрунту

Оскільки температура відіграє одну з найголовніших ролей під час проростання та розвитку рослин, тому не викликає сумнівів необхідність першочергового проведення аналізу чутливості зміни даного параметру. Отже, було проведено чисельний експеримент з виявлення чутливості моделі до зміни температури ґрунту на фоні оптимальної вологості та щільності ґрунту, а також за збереження сталих вхідних параметрів посівного матеріалу. Обрано діапазон температур ґрунту від 10°C, адже це біологічний нуль кукурудзи при якому припиняється розвиток рослини, до 24°C, висів кукурудзи зазвичай відбувається наприкінці квітня – на початку травня, коли як правило температура ґрунту не підіймається вище зазначеного рівня. Динаміка визначалася через 1°C [78].

Зниження інтенсивності накопичення води насінням зі зменшенням температури відбувається досить плавно. На рисунку 5.1 показана динаміка накопичення води насінням при температурі від 10 до 24°C, лінія *crit 2*

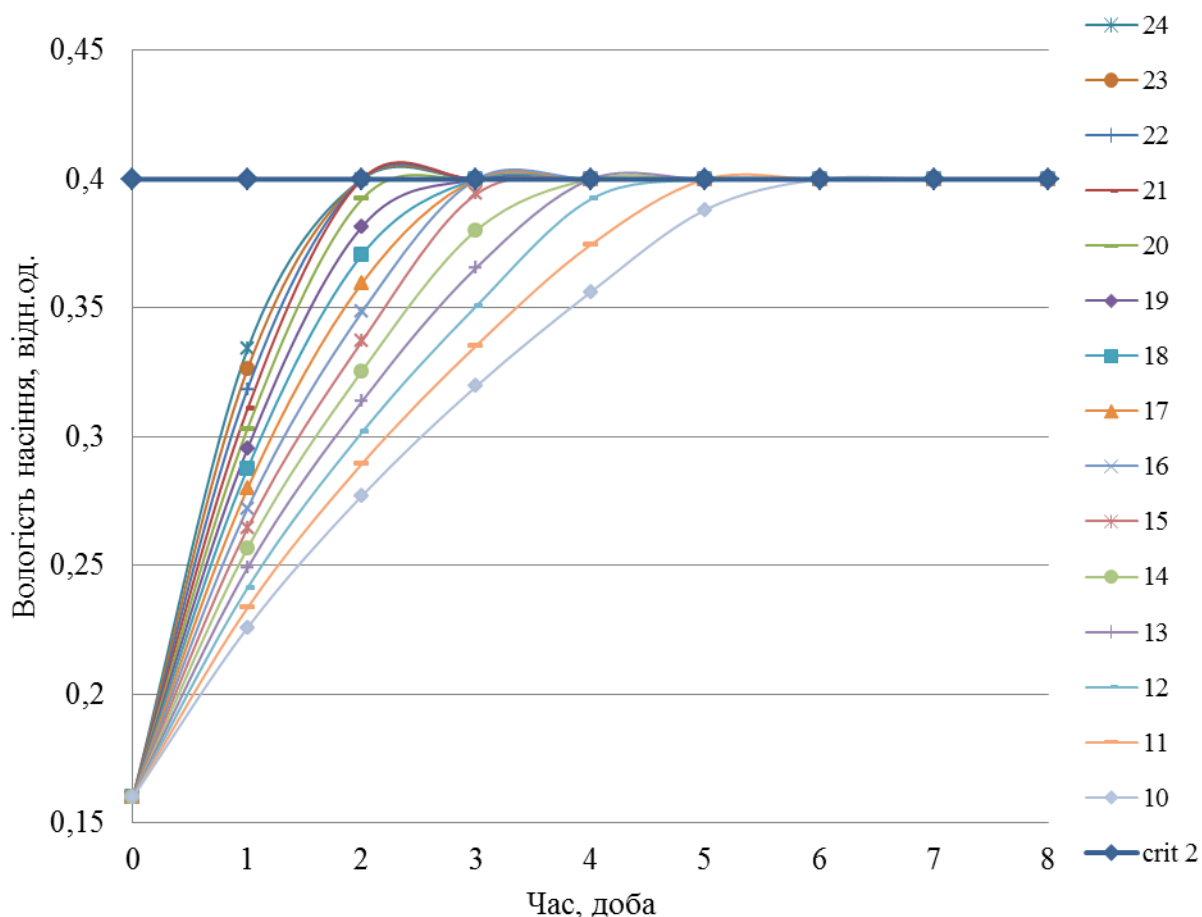


Рис. 5.1. Вплив температури ґрунту (10 – 24°C) на накопичення вологості насінням.

В моделі швидкість процесу накопичення вологості насінням, як початковий блок моделі, впливає на початок гідролізу та запуск ростових процесів. Як встановлено у ході лабораторного експерименту, та відомо з літературних джерел і даних попередніх досліджень, проростання починається, коли вологість досягла 40% від сухої маси насіння. Для розрахунків моделі критичним є лише сам час досягнення даного рівня вологості.

Коли ще не відбувся запуск ростових процесів, однак досягнуто перший критичний рівень вологості, який становить 20% сухої маси, починається гідроліз запасних речовин. Крохмаль та білок, який міститься у зернівці стає доступним для подальшого росту та розвитку осьових органів.

Якщо температура на протязі періоду була в межах $21 - 24^{\circ}\text{C}$, то гідроліз почнеться вже через добу після висіву. За 2 доби гідроліз почнеться у випадку, якщо температура становила $16 - 20^{\circ}\text{C}$, за 3 доби при температурі $13 - 15^{\circ}\text{C}$, та за 4 – 5 діб, якщо температура нижча [84].

Підвищення температури прискорює час початку гідролізу запасних речовин та його інтенсивність.

Оскільки на початковому етапі розвитку використовуються лише запаси зернівки, які є обмеженими, тому сходи повинні з'явитися, коли використано 3000 – 3500 мг вуглецю, та 700 – 1000 мг азоту відповідно. Однак ці значення можуть змінюватися в залежності від умов навколишнього середовища.

Під час моделювання впливу температури на процес гідролізу виявлені певні стрибки чутливості, обумовлені залежністю початку цього процесу від рівня вологості насіння. Зазначимо, що хоча процеси утворення продуктів гідролізу є пропорційними, однак інтенсивність утворення вуглецю у декілька разів перевищує інтенсивність утворення азоту (рис. 5.2, рис. 5.3).

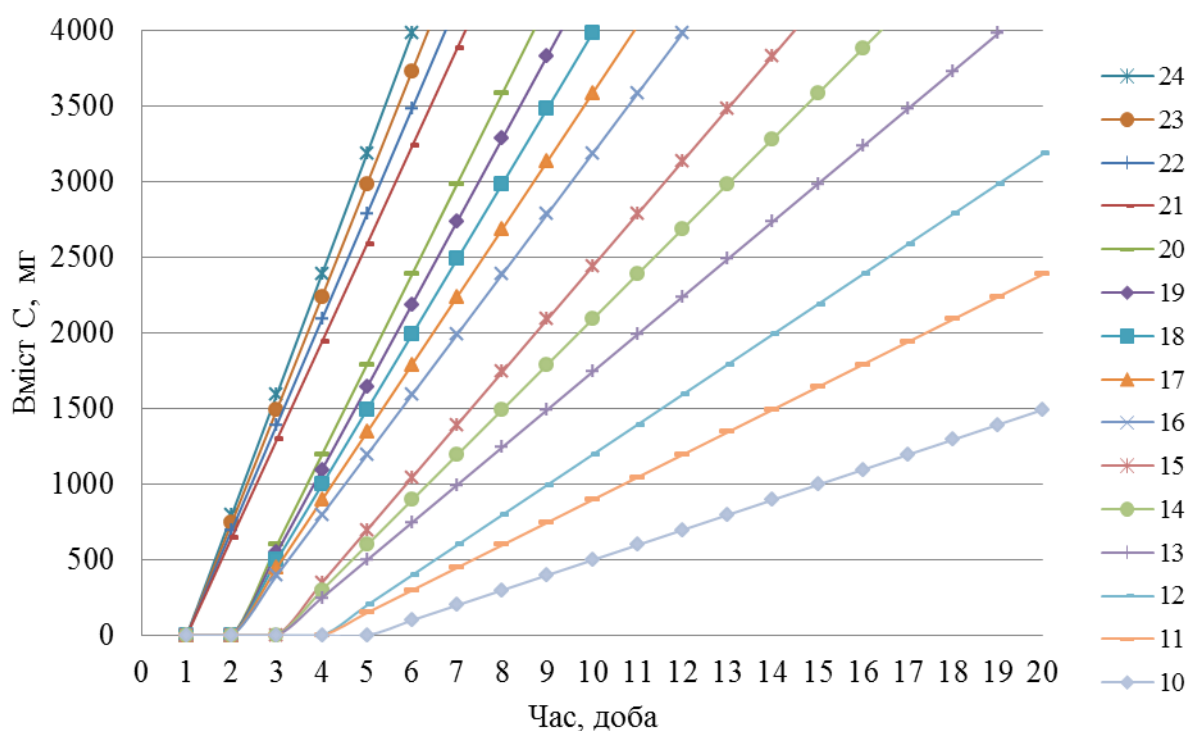


Рис. 5.2. Вплив температури ґрунту ($10 - 24^{\circ}\text{C}$) на накопичення вуглеводів.

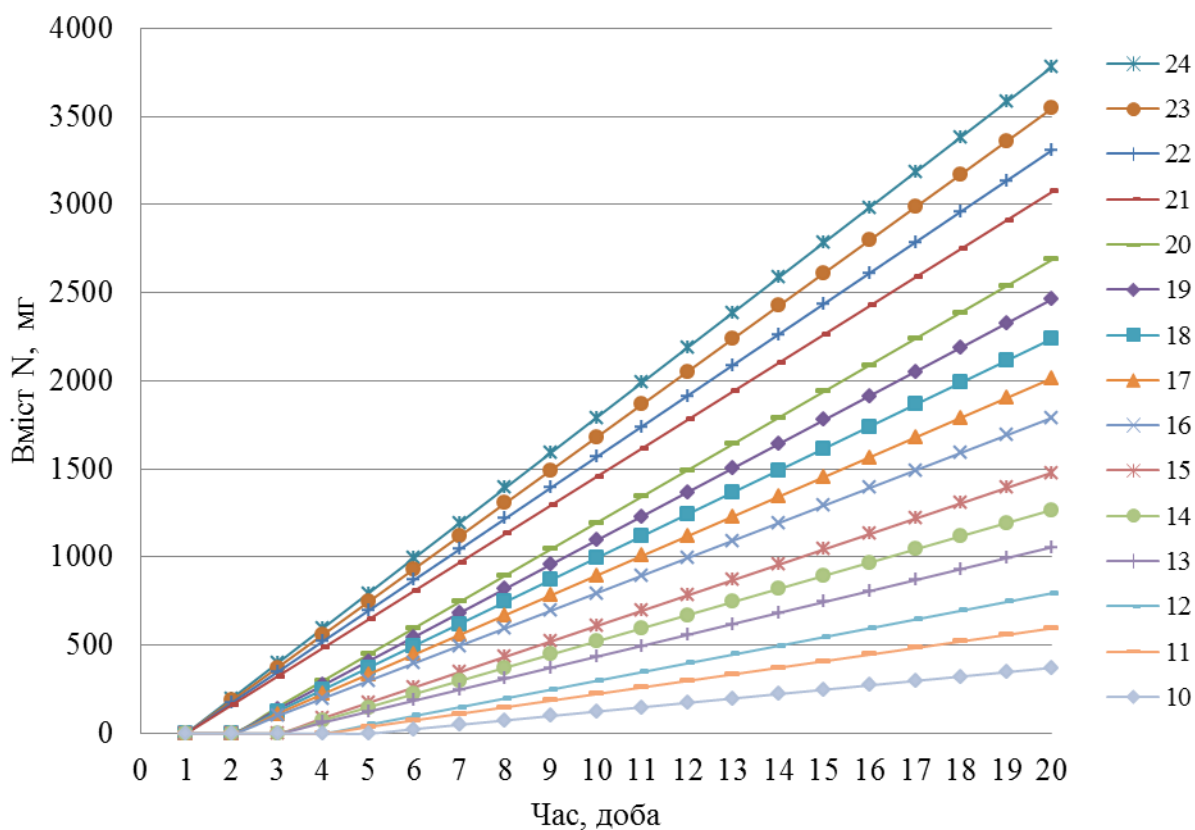


Рис. 5.3. Вплив температури ґрунту (10 – 24°C) на накопичення азоту.

Незважаючи на те, що отримані залежності є більш прямолінійними, на відміну від отриманих попередніми авторами та дещо відрізняються у абсолютних значеннях, однак напрямки процесів представлені правильно. Результати є досить близькими до даних М.А. Стоганової [92]. Підвищення температури прискорює гідроліз як білка, так і крохмалю.

Наступним етапом дослідження чутливості моделі є визначення реакції подовження колеоптилю на зміну температури ґрунту. У випадку, якщо глибина закладення насіння становить 4 см, а щільність ґрунту $1,2 \text{ г/см}^3$, то в межах оптимальної температури (21 – 24°C) сході з'являться за 6 діб, при температурі 19°C та 20°C – за 8 діб (рис. 5.4, табл. 5.2). Якщо на протязі всього періоду температура становила 17 – 18°C, то появу сходів слід очікувати за 9 діб, при 16°C – за 10 діб та при 15°C – за 12 діб. Однак зі збереженням 14°C та 13°C, колеоптиль досягне поверхні лише за 14 та 16 діб відповідно, при 12°C – за 20 діб. Як відомо, коли тривалість періоду формування сходів становить більше 20 – 25 діб – спостерігається масове

пошкодження насіння та проростків, зрідження сходів. В ході експерименту встановлено, що коли температура ґрунту менша 12°C , то пагін загине так і не досягнувши земної поверхні.

Стрибкоподібність результатів обумовлена, як і у випадку динаміки утворення продуктів гідролізу, часом запуску ростових процесів згідно рівня вмісту води у насінні за даної температури.

Стосовно відносної швидкості росту колеоптиля зазначимо, що вона зростає з часом і є меншою на початку росту пагона та стрімко збільшується до моменту появи сходів. Коли температура ґрунту становить 10°C , на сьому добу після висіву відносна швидкість росту колеоптиля становить лише $0,01\text{ см / доба}$, наступні чотири доби вона утримується на рівні $0,02\text{ см / доба}$ та $0,03\text{ см / доба}$ ще три доби і лише на двадцяту добу після висіву становить $0,08\text{ см / доба}$. Така швидкість подовження пагона є дуже малою, тому за температури 10°C сходи не з'являються. Розглядаючи випадок, коли температура ґрунту становить 15°C , можна стверджувати, що відносна інтенсивність росту колеоптиля є більшою. Так на п'яту добу після висіву вона становить $0,7\text{ см / доба}$ та $0,12\text{ см / доба}$ у наступну добу. Далі вона зростає від $0,18$ до $0,98\text{ см / доба}$ з сьомої по одинадцяту добу та досягає $2,3\text{ см / доба}$ на момент появи сходів. За оптимальної для росту температури (22°C) відносна швидкість росту колеоптиля становить $0,27\text{ см / доба}$ на третю добу після висіву та $0,58\text{ см / доба}$ на четверту і досягає значення $2,91\text{ см / доба}$ на дату появи сходів.

Оскільки за умовну глибину закладання насіння обрано 4 см , тому довжина колеоптилю, яка перевищує дане значення не береться до уваги, оскільки вважається, що колеоптіль досяг поверхні і на його верхівку потрапляє сонячне світло, починається фотосинтез і рослина переходить на інший рівень живлення.

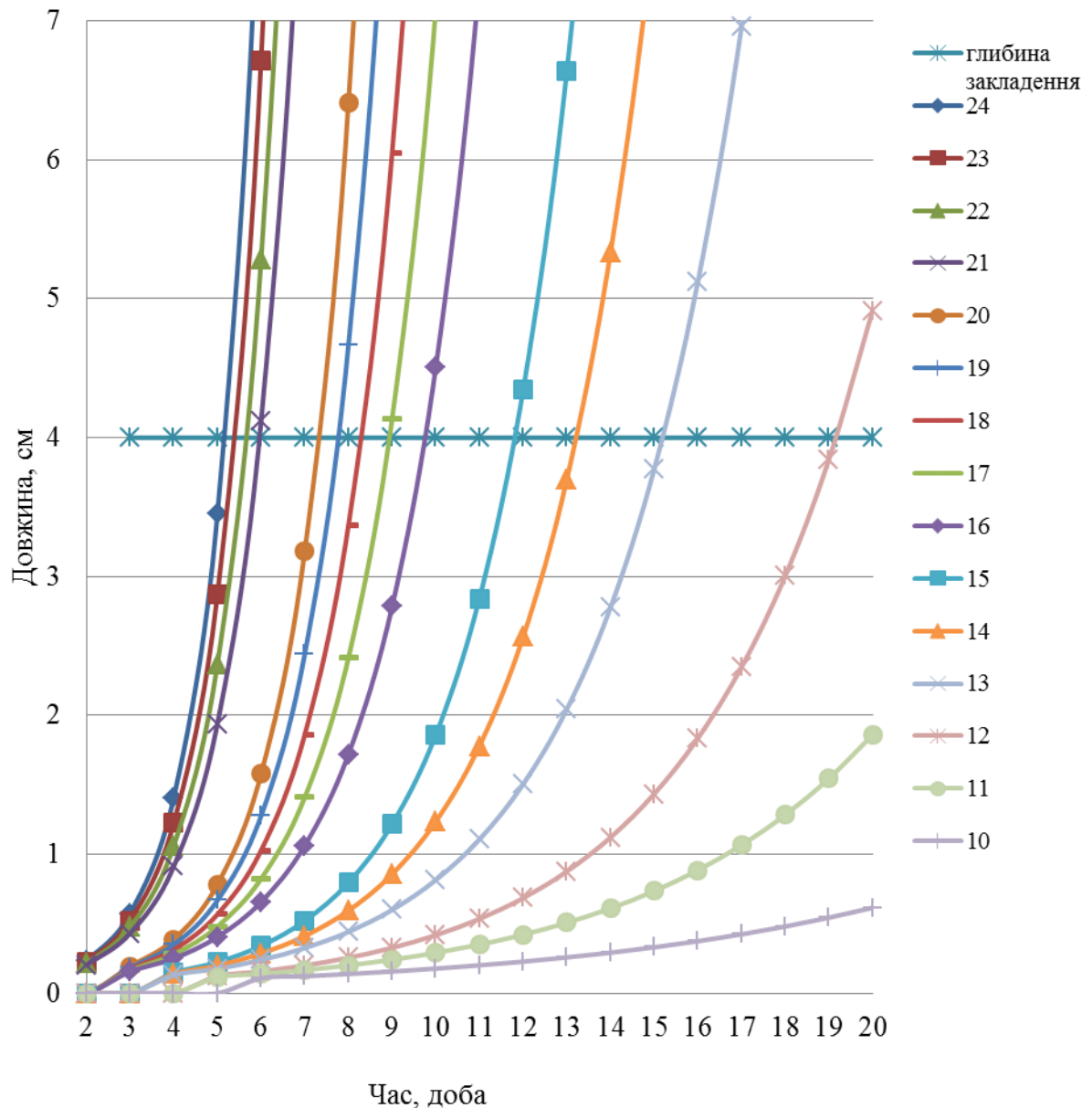


Рис. 5.4. Вплив температури ґрунту (10 – 24°C) на подовження колеоптіля.

Розглянемо безпосередньо результати чисельного експерименту. Зазначимо, що на першому етапі чисельного експерименту описується поглинання води насінням до досягнення рівня вологості при якому починаються ростові процеси за різних температурних умов та зволоженості [83]. Тому опосередковано врахуємо і вплив вологості ґрунту, однак, докладніше її роль описана у наступному підрозділі.

Таблиця 5.2

Вплив температури ґрунту (10 – 24°C) на подовження колеоптиля.

Температура ґрунту	Час, доба																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Довжина колептиля, см																		
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,23	0,26	0,29	0,33	0,38	0,42	0,48	0,54	0,62
11	0,00	0,00	0,00	0,12	0,14	0,17	0,20	0,24	0,29	0,35	0,42	0,51	0,61	0,74	0,89	1,07	1,28	1,55	1,86
12	0,00	0,00	0,00	0,12	0,16	0,20	0,26	0,33	0,42	0,54	0,69	0,88	1,12	1,43	1,83	2,35	3,00	3,84	4,91
13	0,00	0,00	0,13	0,18	0,24	0,33	0,44	0,60	0,82	1,11	1,50	2,04	2,78	3,77	5,12	6,96	-	-	-
14	0,00	0,00	0,14	0,20	0,29	0,41	0,59	0,86	1,24	1,78	2,57	3,70	5,33	7,68	-	-	-	-	-
15	0,00	0,00	0,15	0,22	0,34	0,52	0,80	1,22	1,86	2,84	4,34	6,64	-	-	-	-	-	-	-
16	0,00	0,15	0,25	0,41	0,66	1,06	1,72	2,78	4,50	7,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0,00	0,16	0,28	0,48	0,82	1,41	2,41	4,14	7,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	0,00	0,17	0,31	0,57	1,03	1,86	3,37	6,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	0,00	0,18	0,35	0,67	1,28	2,44	4,67	8,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,00	0,19	0,39	0,78	1,58	3,18	6,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0,20	0,43	0,91	1,94	4,12	8,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	0,21	0,48	1,06	2,37	5,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	0,22	0,52	1,23	2,87	6,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0,23	0,57	1,41	3,45	8,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Детальніше опишемо отримані залежності. На рисунках 5.5 – 5.7 добре видно, що за умови, якщо вологість складає 7 – 9 мм у шарі ґрунту 0 – 5 см, а температура на протязі всього періоду зберігається на рівні 22°C, то насіння набувають вже за 2 доби (рис. 5.5, 5.6). У випадку недостатньої зволоженості цей період складатиме 3 доби (рис. 5.7). Зі зниженням температури процес накопичення води сповільнюється і може тривати 3 – 5 діб у межах оптимального зволоження ґрунту та сягати 7 діб при недостатньому. Після досягнення критичного значення вологість насіння практично не змінюється.

Не викликає сумніву, що температура є основним фактором, що регулює швидкість накопичення води зернівою. Інтенсивність накопичення води змінюється зі зміною температури. Збільшення температури прискорює темпи поглинання води насінням, а зменшення – затримує цей процес [82].

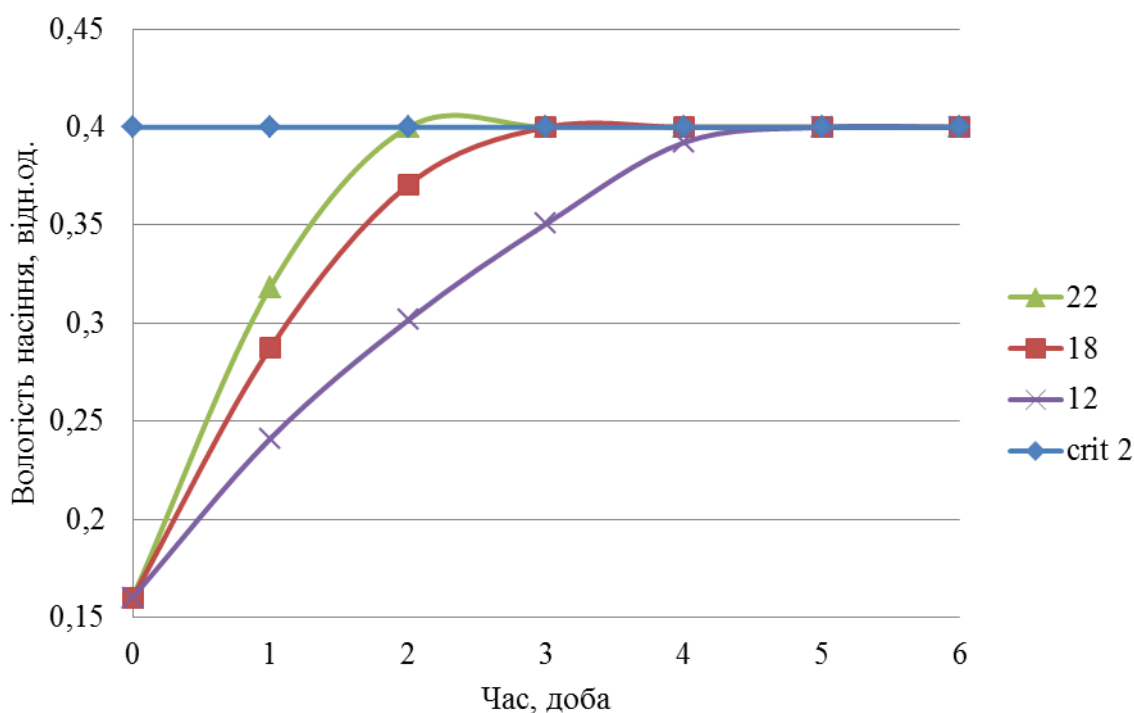


Рис. 5.5. Динаміка накопичення вологості насінням при запасах вологості 7 мм та температурі ґрунту 12°C, 18°C та 22°C.

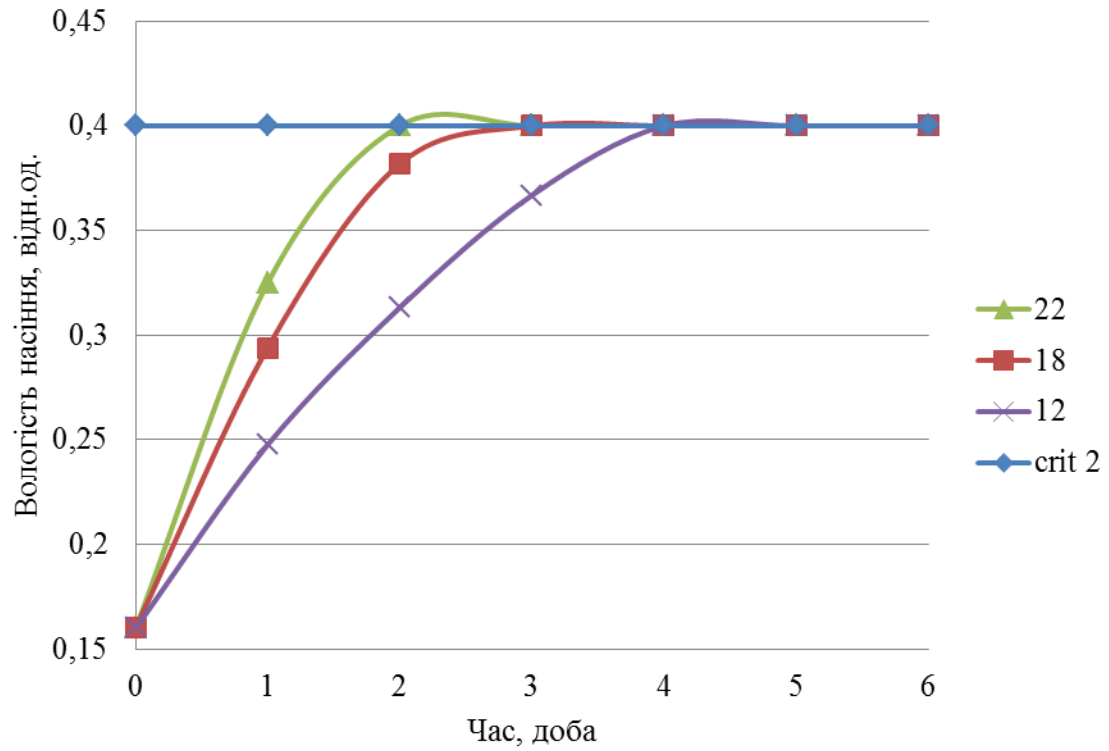


Рис. 5.6. Динаміка накопичення вологи насінням при запасах вологи 9 мм та температурі ґрунту 12°C, 18°C та 22°C.

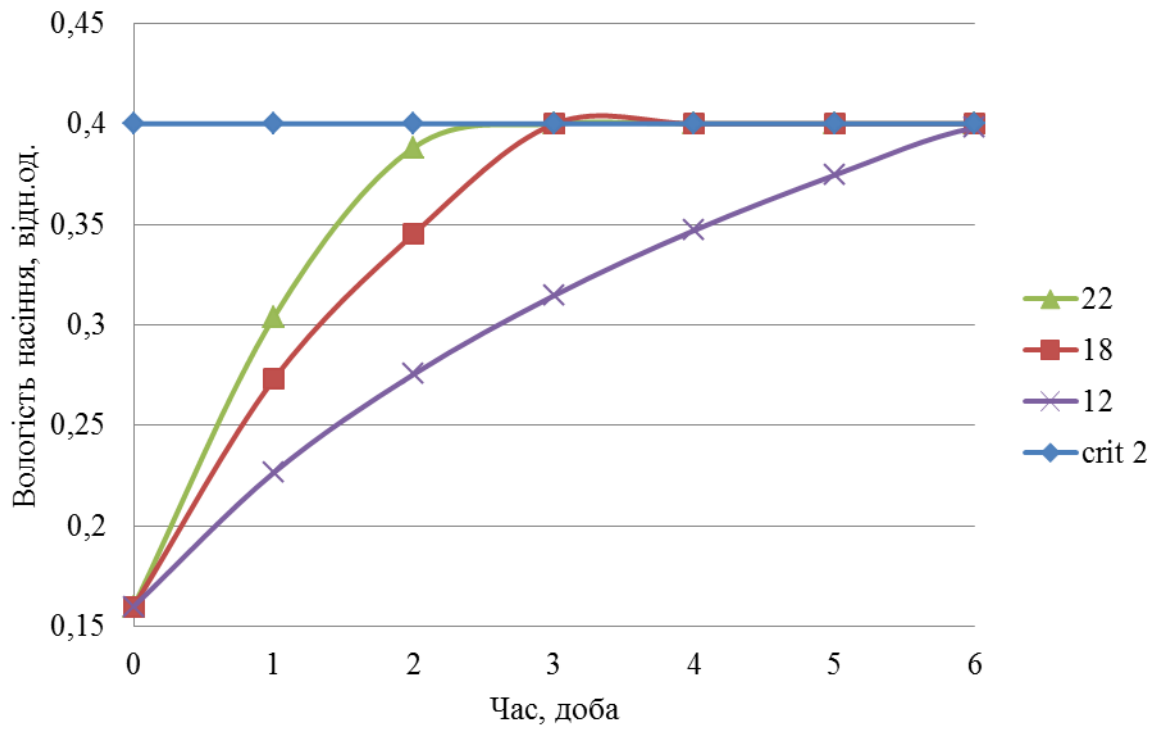


Рис. 5.7. Динаміка накопичення вологи насінням при запасах вологи 5 мм та температурі ґрунту 12°C, 18°C та 22°C.

Особлива роль у появі сходів та їх повноті належить низьким температурам. Низькі температури порушують біологічну рівновагу між корисними та патогенними мікроорганізмами на користь останніх, починають розвиватися грибки, що пошкоджують насіння яке наклюнулося та молоді рослини.

Кукурудза відноситься до теплолюбних рослин, а отже, при охолодженні до температури близької 0°C гине або виникають помітні пошкодження: затримується ріст, значно зменшується продуктивність.

У кукурудзи, вирощеній в холодному ґрунті ($8 - 10^{\circ}\text{C}$), в ранні фази розвитку затримується накопичення сухої речовини – вуглеводів, аскорбінової кислоти, знижується оводненість тканин, інтенсивність дихання, фотосинтезу, значно змінюється діяльність ферментів, поглинання елементів мінерального живлення та води. У холодостійких рослин подібні порушення фізіологічних процесів менше виражені або зовсім не спостерігаються [14, 104].

На знижену температуру різні сорти кукурудзи реагують неоднаково. Більш стійкі до неї скоростиглі сорти. Висока чутливість до низької температури характерна для пізньостиглих сортів.

Різна реакція на знижену температуру спостерігається вже в період набубнявіння та проростання насіння. Швидкість переходу рослин до активної життєдіяльності, так само, як швидкість поглинання води, а значить і набухання зернівки, вище у більш холодостійкої рослини.

Негативний вплив зниженої температури ґрунту на зернівки кукурудзи посилюється ще і тим, що вони можуть пошкоджуватися пліснявими грибами. Значна частина насіння при цьому гине, польова схожість знижується, а посіви зріджуються. Зазвичай, щоб послабити шкоду, яка наноситься пліснявими грибами, використовують передпосівний обробіток насіння різноманітними речовинами, які знищують гриби [15].

Чутливість зернівки кукурудзи до пониженої температури залежить від її дії на зародок. У не холодостійких сортів кукурудзи насіння не проростає

при зниженій температурі навіть у випадку, що ним була поглинута достатня кількість води. У такому насінні за зниженої температури сповільнюється процес перетворення запасних речовин – крохмалю, білків, жирів – в форми, що засвоюються зародком, та ускладнює його перехід в активний стан.

При достатньому зволоженні ґрунту схожість зернівок та темпи росту проростків залежать в основному від температури ґрунту. У таблиці 5.3 наведені узагальнені результати численних польових експериментів з літературних джерел.

Таблиця 5.3

Вплив температури ґрунту на схожість насіння кукурудзи.

Середня температура ґрунту, °С	12,3	12,8	13,4	14,3	15,4	16,1	17,0	18,1	19,1	21,1
Кількість діб від посіву до сходів	20	18	16	14	12	11	10	9	8	7

Залежність схожості насіння кукурудзи від температури має вирішальне значення при виборі строків сівби. З цього питання накопичено багато експериментального матеріалу, виходячи з якого висів кукурудзи краще всього здійснювати тоді, коли температура ґрунту на глибині закладення насіння становить 10 – 12°C.

При більш детальному вивченні процесів росту кінчиків коренів молодих проростків кукурудзи в ґрунті, охолоджену до 12°C, встановлено, що сповільнюється інтенсивність клітинного ділення та росту кінчика кореня в довжину, також посилюється накопичення нуклеїнових кислот та білка [13, 104].

5.2. Оцінка впливу вологості ґрунту

Також важливу роль у розвитку молодої рослини відіграє вологість ґрунту. Зменшення її вмісту сповільнює накопичення води зернівкою. Але через високий водний потенціал насіння здатне поглинати вологу навіть із ґрунту зі зниженим вмістом вологи, але не нижче вологості стійкого в'янення. Підвищення вологості ґрунту прискорює процес накопичення вологи зернівкою, але у випадку низької температури виникає загроза ураження насіння грибками та шкідливими бактеріями, що в подальшому може призвести до затримки появи сходів, їх зрідженості та загибелі рослин. Насіння сильніше реагує на обмеження запасів вологи ґрунту, що затримує поглинання води, аніж на їх підвищення.

Отже, основним фактором, котрий впливає на швидкість накопичення вологи насінням є температура ґрунту, однак, якщо тепла достатньо, то фактором, який обмежує накопичення вологи є вологість ґрунту.

Детальніше розглянемо чутливість моделі до зміни вологості ґрунту. Визначення проводилися в інтервалі від 1 до 10 мм, через 1 мм вологості.

Вологість ґрунту має значний вплив на накопичення вологи насінням. В умовах оптимальної температури саме запаси вологи є лімітуючим фактором появи сходів [10]. Коли вологість ґрунту становить 6 – 10 мм, то запуск ростових процесів відбувається вже за 2 доби після висіву. Зі зниженням вологості ґрунту до 3 – 5 мм, інтенсивність накопичення вологи насінням зменшується і досягає критичного значення лише за 3 – 4 доби (табл. 5.4). Не зважаючи на те, що сухе насіння має високу сисну силу та водний потенціал, воно не здатне накопичити достатньо вологи для набубнявіння та початку росту осьових органів, коли вологість ґрунту менша за 3 мм (рис. 5.8).

Вологість ґрунту безпосередньо не впливає на швидкість гідролізу запасів ендосперму, лише на час їх початку, тому процес утворення продуктів гідролізу тут розглядатися не буде.

Таблиця 5.4

Вплив вологості ґрунту (1 – 10 мм) на накопичення води насінням.

Вологість ґрунту, мм	Час, доба								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Вологість насіння, відн. од.								
1	0,16	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24
2	0,16	0,24	0,28	0,31	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37
3	0,16	0,27	0,33	0,38	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
4	0,16	0,29	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
5	0,16	0,30	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6	0,16	0,31	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
7	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
8	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
9	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
10	0,16	0,33	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

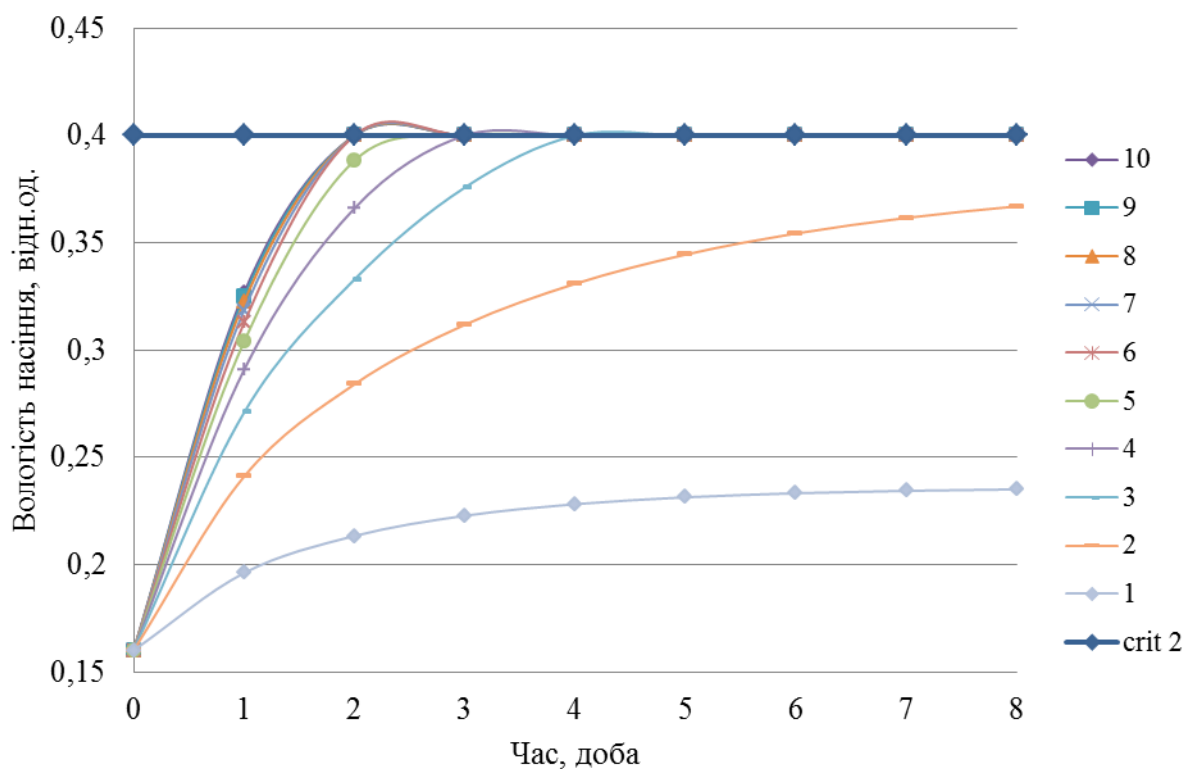


Рис. 5.8. Вплив вологості ґрунту (1 – 10 мм) на накопичення води насінням.

Був проведений аналіз чутливості моделювання подовження колеоптилю до зміни вологості на фоні оптимальної температури 22°C та щільності ґрунту 1,2 г/см³. У випадку, коли вологість ґрунту знаходиться у

межах 6 – 10 мм, подовження колеоптилю відбувається досить синхронно і сходи з'являються за 6 діб (табл. 5.5). Зі зниженням вологості до 4 – 5 мм період появи сходів подовжується до 7 – 8 діб і при вологості 3 мм становить 9 діб. Як зазначалося раніше, при вологості нижчій 3 мм насіння не в змозі накопичити достатньо води для початку росту зародка, тому вологість ґрунту 1 – 2 мм не може впливати на подовження колеоптилю, оскільки насіння просто загине або зупинить свій розвиток до встановлення оптимальних умов зволоження (рис. 5.9).

Стосовно відносної швидкості росту колеотилі зазначимо, що вона зростає щодобово. Так, наприклад, коли вологість ґрунту становить 4 мм, то за добу після початку росту колеотилі швидкість його росту становить лише 0,15 см / доба, у наступну добу вона зростає вже до 0,18 см / доба та 0,4 см / доба у п'яту добу після висіву, а до сьомої доби досягає 2,01 см / доба. Коли вологість ґрунту є оптимальною для росту, тобто становить 7 мм, відносна швидкість росту колеоптилі збільшується з часом інтенсивніше, також беручи до уваги, що початкова швидкість росту (за першу добу після запуску ростових процесів) також є більшою. А саме: з моменту початку росту колеоптилі зростає на 0,21 см / доба, 0,27 см / доба за наступну добу. На п'яту добу після висіву відносна швидкість росту пагона становить вже 1,31 см / доба.

Отже, насіння більш чутливе до обмеження запасів води, а ніж до їх збільшення. Коли вологість ґрунту становить 6 мм та більше – інтенсивність процесів у насінні майже не змінюється, але її зменшення на кожний міліметр вже затримує появу сходів щонайменше на добу.

Зазначимо, що отримані результати моделювання накопичення води по направленості процесу та вигляду отриманих кривих динаміки вмісту води у насінні співпадають з даними проведеного лабораторного експерименту. Дещо відрізняється час запуску ростових процесів. Згідно чисельного експерименту з моделлю він починається на одну добу раніше лабораторного. Однак, це можна пояснити умовами проведення

лабораторного експерименту. В реальних умовах ґрунт щільно огортає насіння, тобто задіяна вся поверхня зернівки, коли в умовах лабораторної імітації процесу волога може поступати у зернівку лише з боків.

Таблиця 5.5

Вплив вологості ґрунту (1 – 10 мм) на подовження колеоптиля.

Вологість ґрунту, мм	Час, доба							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Довжина колеоптиля, см							
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,12	0,26	0,58	1,30	2,90	6,47
4	0,00	0,15	0,33	0,73	1,63	3,64	8,11	-
5	0,00	0,17	0,39	0,86	1,92	4,28	-	-
6	0,19	0,43	0,97	2,16	4,83	-	-	-
7	0,21	0,48	1,06	2,37	5,28	-	-	-
8	0,23	0,51	1,13	2,53	5,64	-	-	-
9	0,24	0,53	1,19	2,65	5,90	-	-	-
10	0,25	0,55	1,22	2,72	6,07	-	-	-

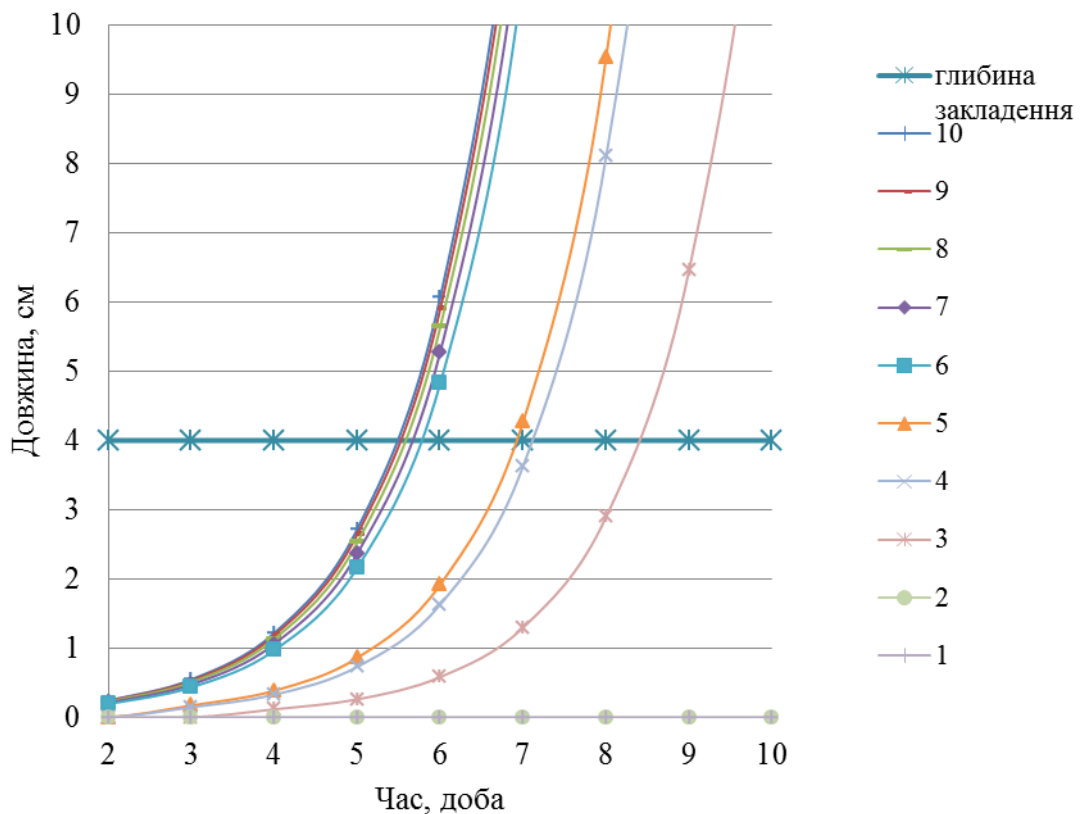


Рис. 5.9. Вплив вологості ґрунту (1 – 10 мм) на подовження колеоптиля.

Отримані результати близькі до даних Ю.І. Чіркова, які підтверджують той факт, що при достатньому зволоженні ґрунту темпи проростання насіння кукурудзи залежать в основному від температури [111]. Так при 11 – 12°C проростання почнеться за 7 – 9 діб, а при 18 – 22°C – через 2 – 3 доби. Отримані в результаті моделювання значення повністю співпадають з даними Ю.І. Чіркова в діапазоні 18 – 22°C, за меншої температури є незначні відхилення.

Швидке початкове поглинання води, очевидно, обумовлене поглинанням води покривною тканиною насіння і речовиною зародка, які грають роль вхідних каналів для подальшого проникнення води в ендосперм [70]. Оборотноість набухання насіння свідчить про те, що участь зовнішньої води в пробудженні насіння обмежена в основному реакцією гідратації. При цьому, однак, зростає рухливість в речовині насіння зв'язаної води і ферментів і починають відбуватися біохімічні реакції, що відповідають за його проростання.

Р.А. Полуектовим запропонована деталізована схема надходження води в насіння, де окремо виділяються водні потенціали зародка та ендосперму [71]. Оскільки у нашому випадку основним результатом роботи блоку поглинання води є час початку гідролізу та росту осевих органів, тому не виникає потреби в додатковій деталізації – для розрахунків достатньо водних потенціалів насіння в цілому та ґрунту.

Також дещо відрізняється представлення Р.А. Полуектова, щодо фізіології процесу проростання насіння. Автор відокремлює етап зародкового типу живлення, тобто за стандартних лабораторних умов перші 3 доби зародок використовує лише власні запаси, з 3 по 5 добу – одночасно запаси зернівки та ендосперму і лише на 5 добу відбувається повний перехід до ендоспермового типу живлення. Однак, оскільки зародок зазвичай складає лише 10% усього насіння і в ньому містяться порівняно незначні запаси поживних речовин, тому у розробленій моделі знехтувана така деталізація та розглядається лише зародково-ендоспермний тип живлення.

Нажаль, неможна порівняти отримані результати чисельного експерименту з реальними даними польових спостережень агрометеорологічних станцій. Згідно Настанови агрометеорологічним станціям і постам відмічається фаза проростання насіння, коли перший зародковий корінь пробив покривну оболонку і помітно висунувся назовні, для моделювання ж складає більший інтерес фаза лише набубнявіння насіння [56]. Тобто спостереження показує момент, коли ростові процеси вже почалися, але не відмічається саме момент їх запуску.

Очевидно, що на початку накопичення вологи відбувається швидше. Досліди проведені О.В. Мушкетовою та А.С. Казаковою [55] з вивчення накопичення вологи насінням ячменя за перші дві доби після зволоження також показують стрибок інтенсивності цього процесу, а саме: за першу годину насіння накопичує вже близько 16% вологи (14% накопичуються вже за перші 20 хвилин після контакту з водою) і лише 2 % за другу годину. Надалі темпи поглинання води зменшуються і вода поступає в насіння досить плавно і повільно. Такий стрибок збігається з фазами набубнявіння: перша – фізичне і друга – фізіологічне набухання [89, 98]. Фізичне набубнявіння – це процес поглинання води насінням як пористим тілом. Воно протікає швидко і завершується протягом перших шести годин [1]. Цей етап однаковий як у мертвого, так і у живого насіння. Фізіологічне набухання – поглинання води біоколоїдами клітини. На цьому етапі насіння збільшується в об'ємі, починається гідроліз запасних речовин ендосперму. Зазначені процеси властиві тільки живому насінню.

Друга частина експерименту описує вплив температури, вологості та щільності ґрунту на швидкість подовження колеоптилю та появу сходів як наслідок.

Рослини кукурудзи на протязі усього життєвого циклу зазнають вплив різноманітних умов, які впливають як сприятливо так і негативно на життєві функції організму та його продуктивність. Здатність переносити несприятливі умови залежить від того, за яких умов формувалася рослина, а

також від глибини та тривалості впливу окремих факторів та їх поєднань [104].

Зрозуміло, що основними факторами, від яких залежить нормальний розвиток та ріст, а також продуктивність, є температура, умови вологозабезпеченості, ґрунтові умови. Швидкість появи сходів безумовно також має значення для майбутнього врожаю. Ф.Н. Коганом був встановлений обернений зв'язок врожаю ярової пшениці із тривалістю періоду «посів – сходи» [35]. Швидка поява сходів ячменю викликає прискорене утворення вузлів коренів, підвищує продуктивність рослин. З прискоренням появи сходів зменшується вірогідність загнивання та загибелі насіння, особливо пошкодженого.

Залежність тривалості періоду появи сходів від температури не викликає сумніву, але в умовах різного зволоження вплив температури дещо змінюється та характеризується різним ступенем зв'язку [102].

На відміну від більшості авторів, Форселла [121] підкреслює необхідність врахування реакції насіння на зміну вологості ґрунту. Дані автора чисельно представлені в перерахунку на водний потенціал ґрунту та показують його вплив на час появи та повноту сходів. Найбільш сприятливим для росту, на його думку, є водний потенціал – 0,5 МПа, водний стрес спостерігається при –10 МПа, що значно обмежує появу сходів. Отримані нами результати у чисельному вираженні важко порівняти з дослідями Ф. Форселла, однак направленість процесу повністю погоджується. В нашому випадку при вологості 5 мм процеси росту дещо сповільнюються, у той час коли при вологості менше 3 мм спостерігається водний стрес рослин та їх пригнічення.

5.3. Оцінка впливу щільності ґрунту

Розглянемо чутливість моделі до зміни щільності ґрунту. Дослідження було проведено в інтервалі $0,8 - 1,4 \text{ г/см}^3$, що відповідає характеристикам найбільш розповсюджених ґрунтів України, через $0,1 \text{ г/см}^3$ за умови оптимальної вологості та температури ґрунту. Щільність ґрунту не впливає на накопичення води насінням та гідроліз запасів ендосперму, але її збільшення сповільнює процес подовження пагону. Так, за найменшої щільності у $0,8 - 0,9 \text{ г/см}^3$ сходи можуть з'явитися за 5 діб, $1,0 - 1,3 \text{ г/см}^3$ – за 6 діб та щонайменше за тиждень у випадку щільності $1,4 \text{ г/см}^3$ та більше (табл. 5.6, рис. 5.10) [86].

Зменшення щільності (або питомої ваги) ґрунту зменшує опір, який зустрічає на своєму шляху колеоптиль, а значить затрачається менше енергії на його подовження, тому більше поживних речовин йде саме на побудову нових структур проростка, що у свою чергу прискорює появу сходів.

Відносна швидкість росту колеоптиля зростає зі зменшенням щільності ґрунту. Коли щільність ґрунту становить $0,8 \text{ г/см}^3$, швидкість росту становить $0,51 \text{ см/доба}$ у день запуску ростових процесів, збільшується від $0,63 \text{ см/доба}$ на третю добу після висіву до $1,41 \text{ см/доба}$ у четверту та сягає $3,14 \text{ см/доба}$ на дату появи сходів. Коли щільність ґрунту становить $1,1 \text{ г/см}^3$, швидкість росту пагона становить $0,27 \text{ см/доба}$ у день запуску ростових процесів, збільшується від $0,34 \text{ см/доба}$ на третю добу після висіву до $0,75 \text{ см/доба}$ у четверту та сягає $3,72 \text{ см/доба}$ на дату появи сходів. Якщо щільність ґрунту максимальна і становить $1,4 \text{ г/см}^3$, то на початку росту колеоптиля відносна швидкість його росту становить $0,12 \text{ см/доба}$, $0,15$ та $0,34 \text{ см/доба}$ відповідно у наступні дві доби, $1,67 \text{ см/доба}$ – на шосту добу після висіву та $3,71 \text{ см/доба}$ на дату появи сходів [85].

Таблиця 5.6

Вплив щільності ґрунту(0,8 – 1,4 г / см³) на подовження колеоптиля.

Щільність ґрунту, г/см ³	Час, доба					
	2	3	4	5	6	7
	Довжина колеоптиля, см					
0,8	0,51	1,14	2,55	5,69	-	-
0,9	0,42	0,94	2,10	4,68	10,45	-
1	0,34	0,76	1,70	3,80	8,47	-
1,1	0,27	0,61	1,36	3,03	6,75	-
1,2	0,21	0,48	1,06	2,37	5,28	-
1,3	0,16	0,36	0,81	1,81	4,04	9,01
1,4	0,12	0,27	0,61	1,35	3,02	6,73

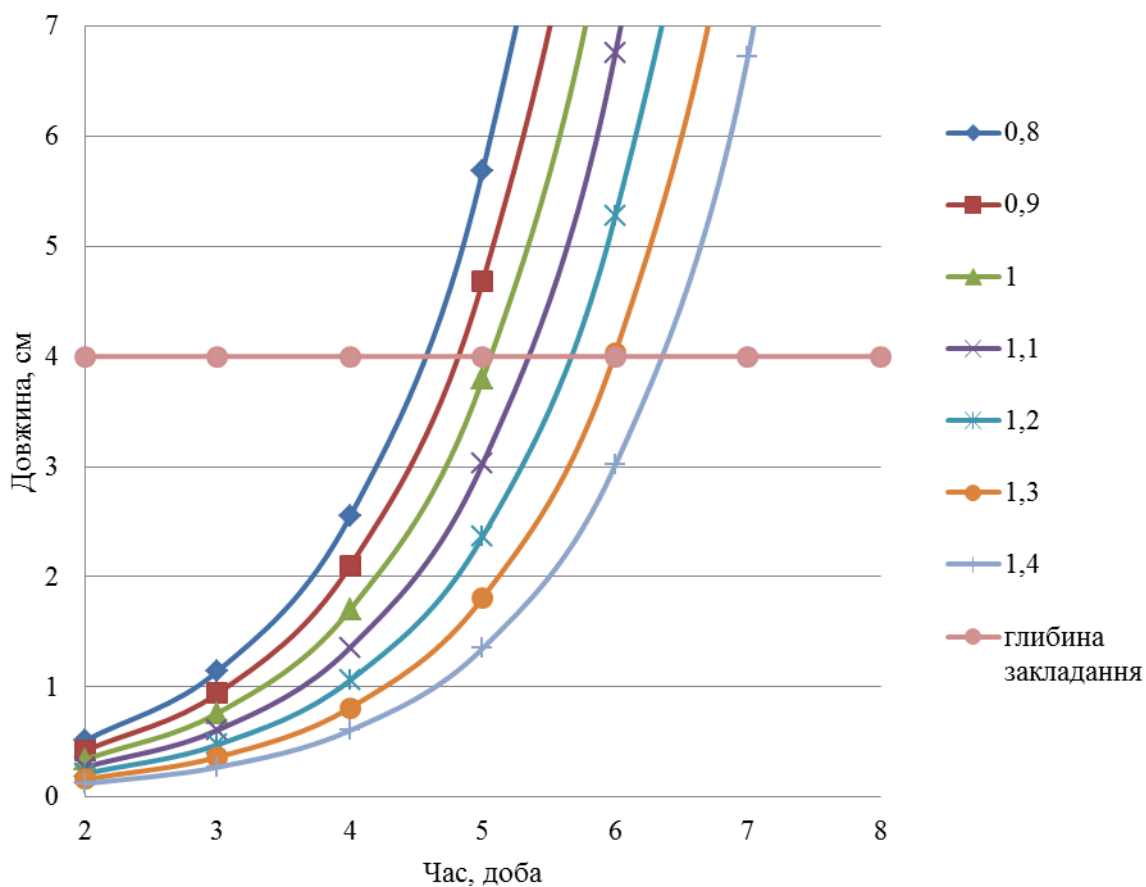


Рис 5.10. Вплив щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³) на подовження колеоптиля.

Отже, за умов оптимального зволоження та оптимальної температури, лімітуючим фактором протягом формування сходів є щільність ґрунту, а

саме: зі збільшенням щільності ґрунту подовжується і час появи сходів. Так, при мінімальному значенні щільності ($0,8 \text{ г/см}^3$) колеоптіль може досягти поверхні ґрунту вже на 5 добу після висівання, то при щільності у $1,4 \text{ г/см}^3$ сходи з'являться щонайменше за 7 діб (рис. 5.11). Тобто, насіння витрачає значно більше енергії та часу на те, щоб колеоптіль пробився крізь шар ґрунту, коли його щільність більша [127].

Слід зазначити, що навіть за умов збереження оптимального зволоження, зі зниженням температури ґрунту інтенсивність проростання насіння також зменшується. Тому при температурі 18°C сходи з'являться через 7 – 10 діб (рис. 5.12), а при 12°C – щонайменше за 16 діб після висівання (рис. 5.13).

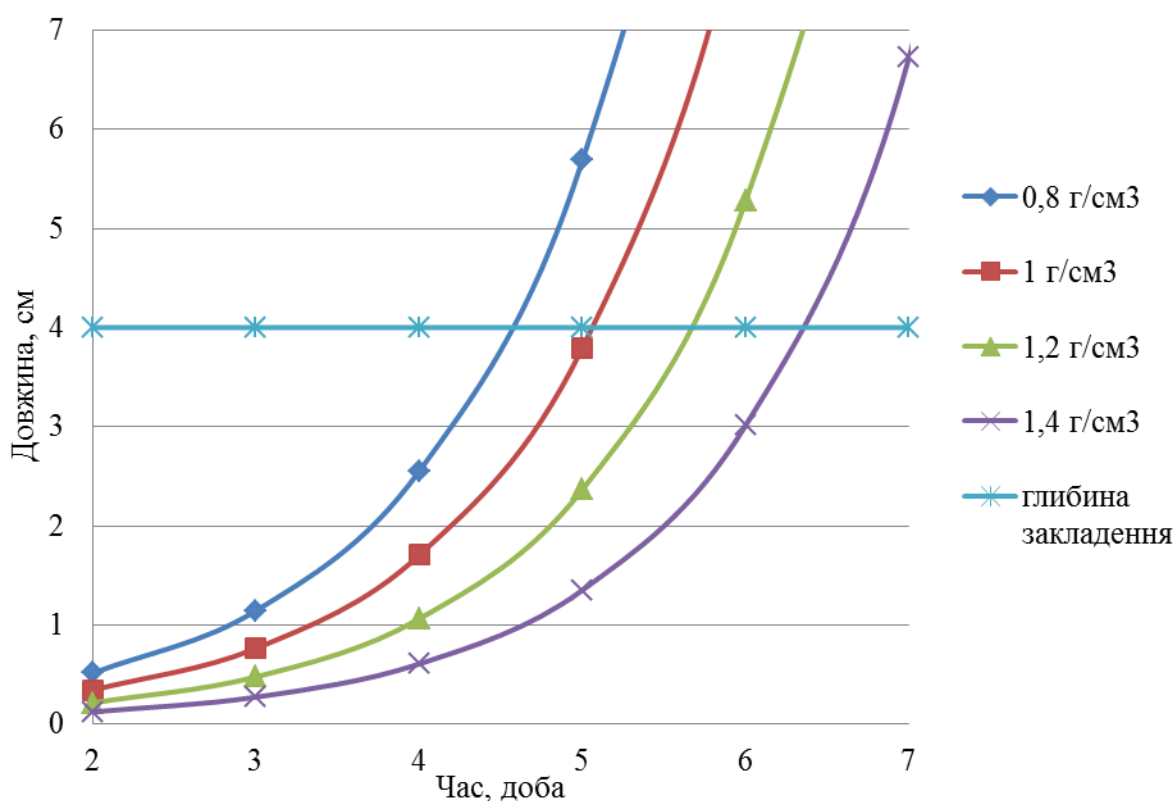


Рис. 5.11. Динаміка подовження колеоптіля при температурі 22°C та запасах вологи 7 мм за різної щільності ґрунту ($0,8 - 1,4 \text{ г / см}^3$).

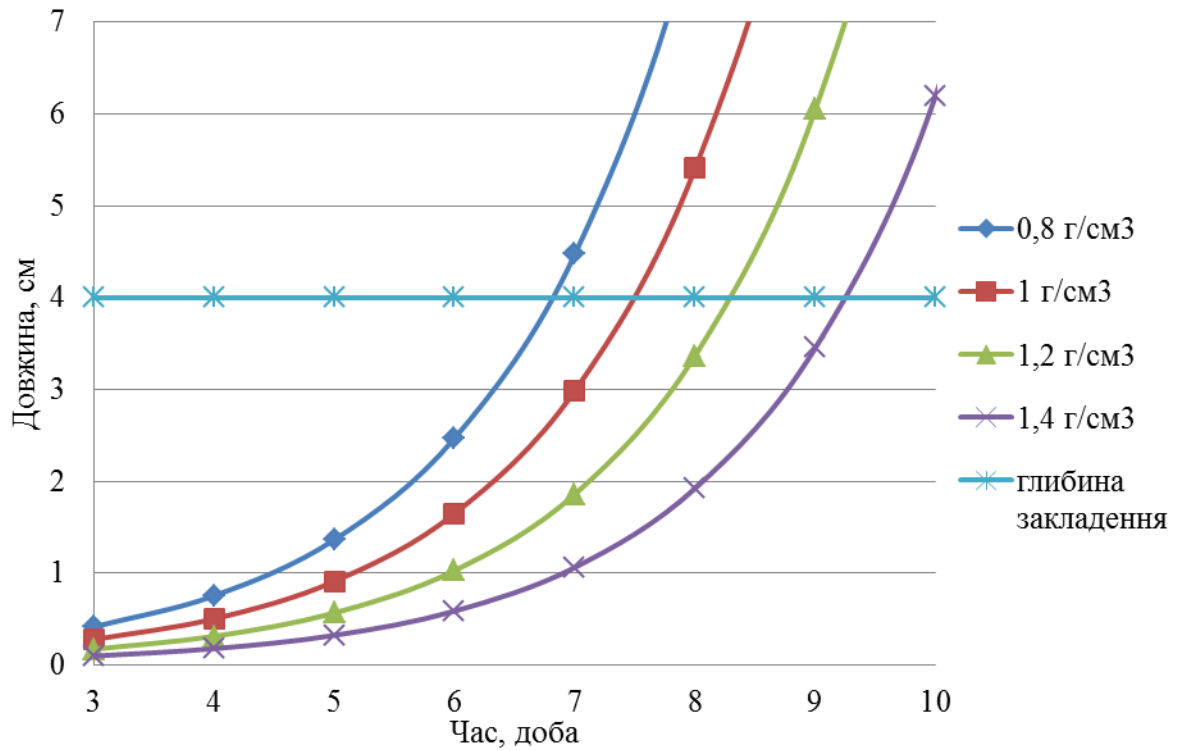


Рис. 5.12. Динаміка подовження колеоптіля при температурі 18°C та запасах вологи 7 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

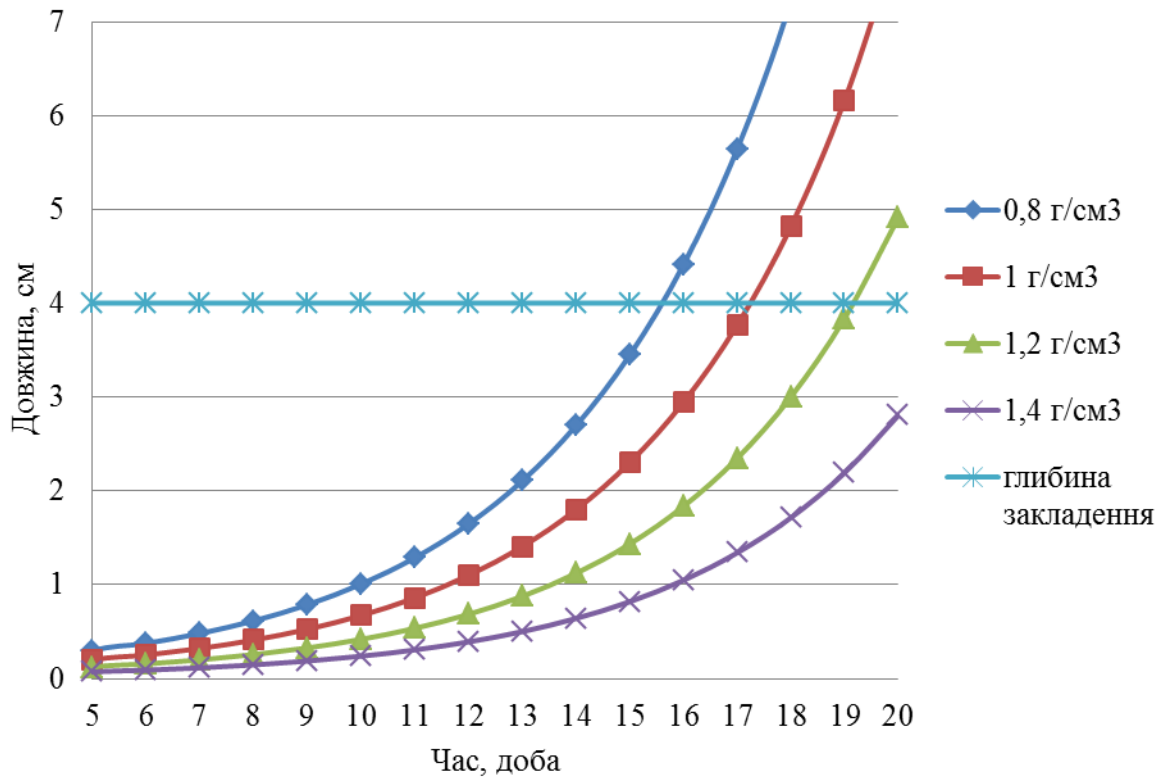


Рис. 5.13. Динаміка подовження колеоптіля при температурі 12°C та запасах вологи 7 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

Температура прискорює гідроліз запасних речовин зернівки, дихання та накопичення сухої маси коренем та пагоном, що візуально відображається подовженням колеоптиля. Авторами [129] також зазначалося, що найбільш сприятливою температурою для проростання є $20,2 - 25,2^{\circ}\text{C}$. Що не менш важливо, зростання температури збільшує активність α -амілази, яка прискорює виділення ферментів, що сприяють перетворенню запасних речовин ендосперму у доступні для росту сполуки. Як наслідок збільшуються фонди сполук, що йдуть на ріст осьових органів.

Незважаючи на те, що вологість ґрунту є одним з основних факторів впливу на швидкість проростання насіння, але зі збільшенням вологості до 9 мм, час появи сходів практично не змінюється при оптимальній температурі 22°C і також становить 5 – 7 діб після висіву (рис. 5.14) та 7 – 10 діб при температурі 18°C (рис. 5.15). Але при температурі 12°C сходи можна очікувати лише за 15 діб (рис. 5.16).

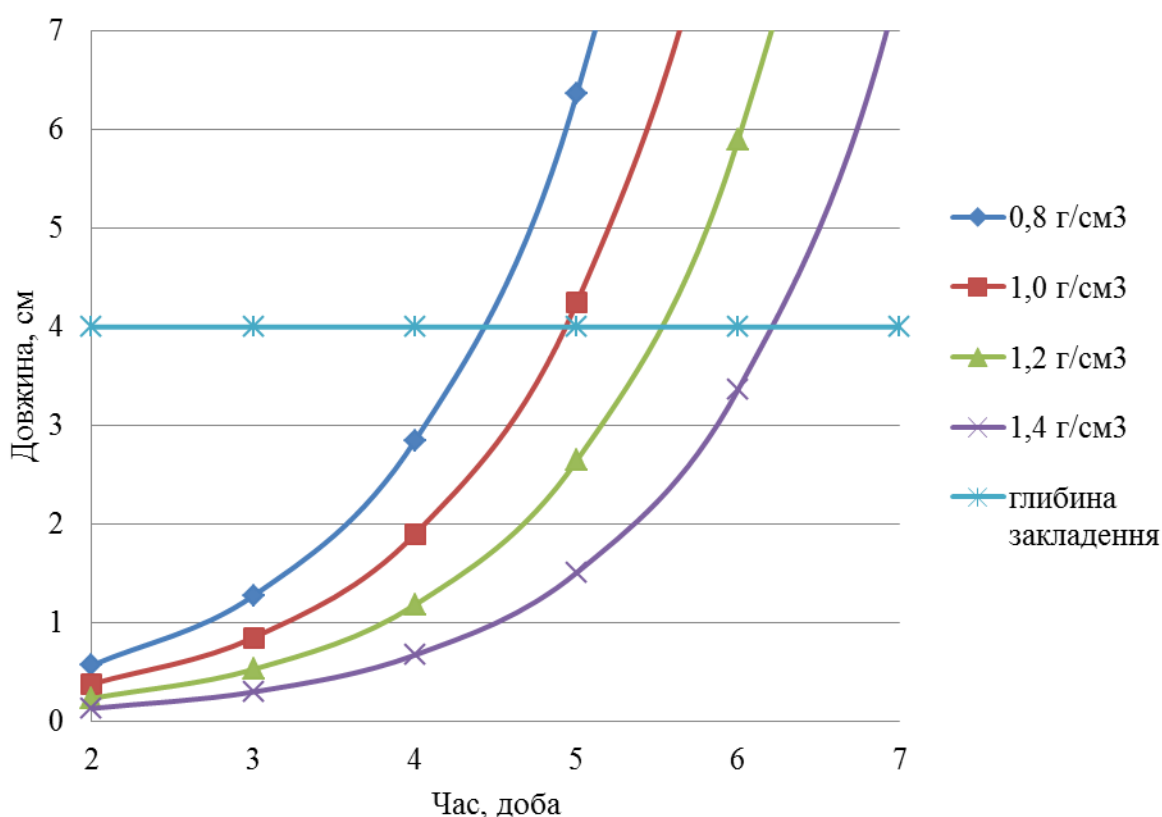


Рис. 5.14. Динаміка подовження колеоптиля при температурі 22°C та запасах вологи 9 мм за різної щільності ґрунту ($0,8 - 1,4 \text{ г / см}^3$).

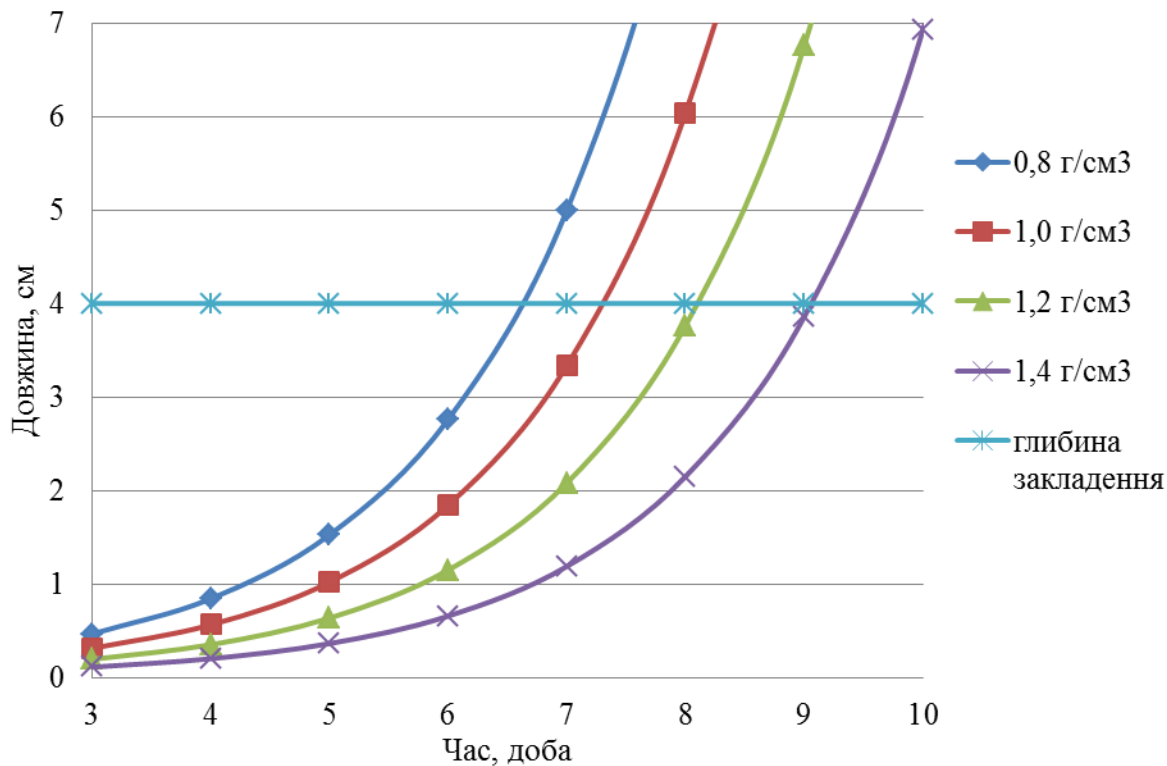


Рис. 5.15. Динаміка подовження колеоптіля при температурі 22°C та запасах води 9 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

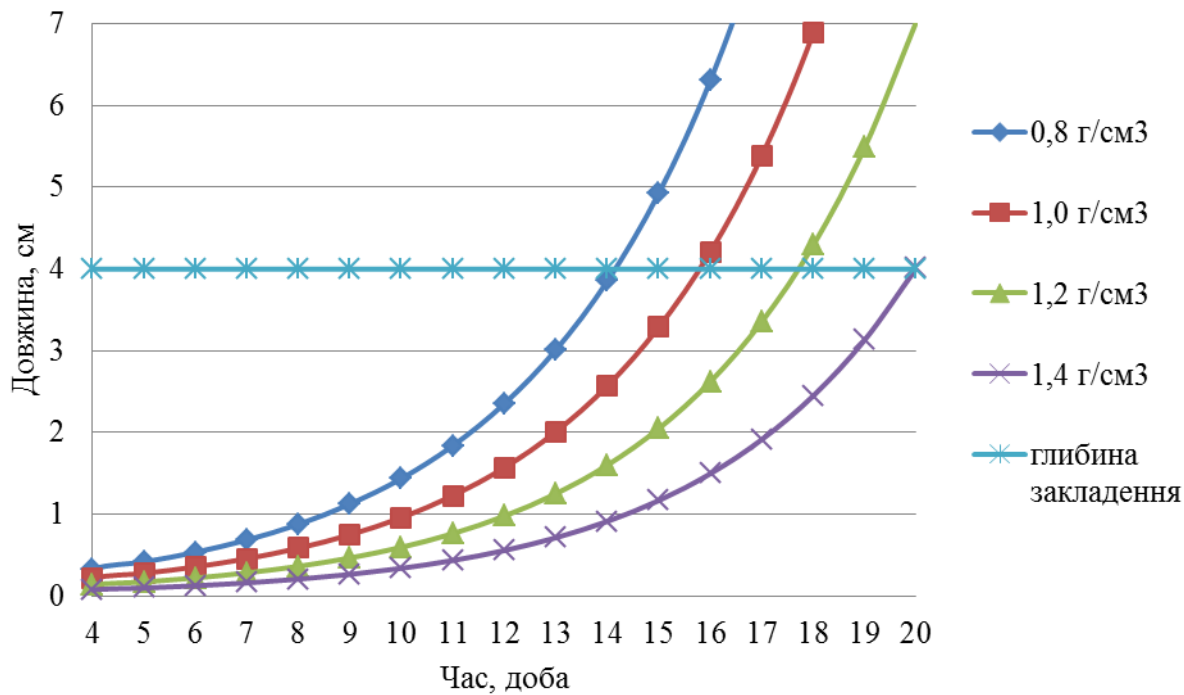


Рис. 5.16. Динаміка подовження колеоптіля при температурі 12°C та запасах води 9 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

Зменшенням вологості до 5 мм призведе до того, що колеоптиль досягне глибини закладення не раніше 6 доби за умов оптимальної температури та найменшої щільності ґрунту (рис. 5.17), 9 – 11 діб при 18°C (рис. 5.18) та 19 діб при 12°C (рис. 5.19) [8]. Крім того, за умов недостатнього зволоження та температур близьких до біологічного мінімуму культури, зі збільшенням щільності ґрунту виникає загроза загибелі рослини не досягши поверхні. У цьому випадку запаси ендосперму вже вичерпані на ріст, однак пагін ще не досяг земної поверхні, тобто рослина ще не здатна перейти на наступний етап розвитку та отримувати енергію для підтримки подальшого росту в результаті фотосинтезу.

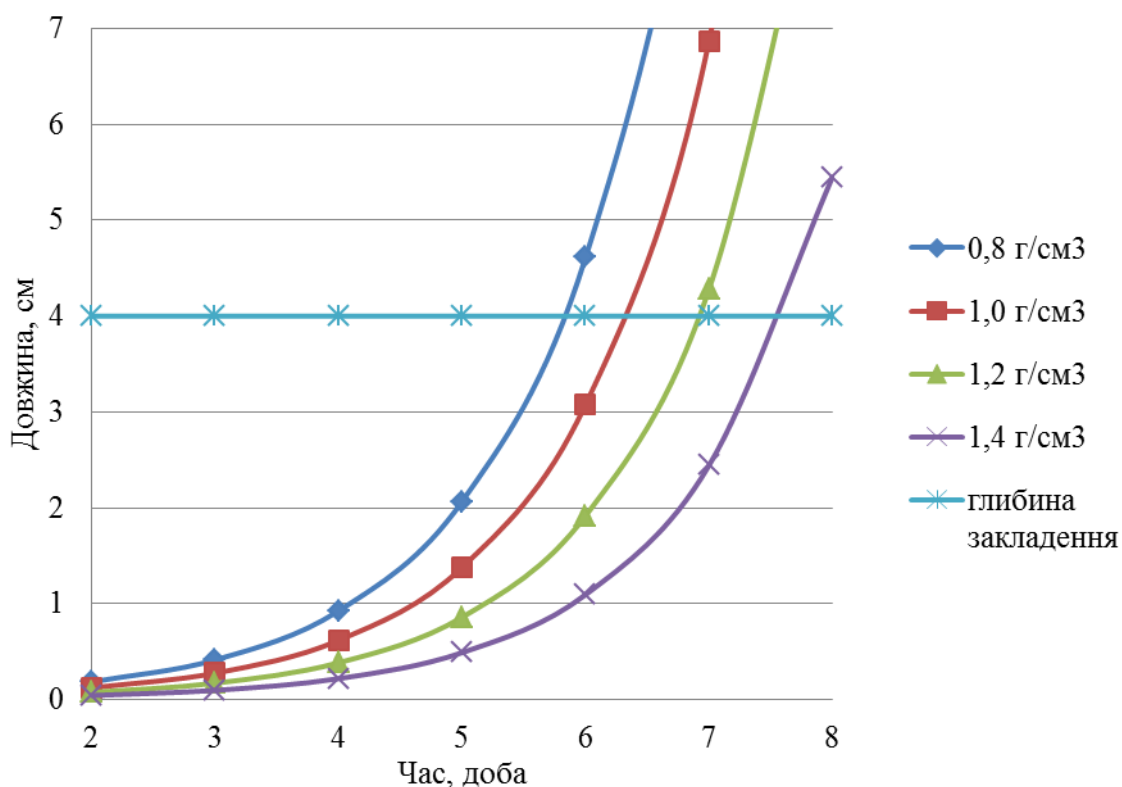


Рис. 5.17. Динаміка подовження колеоптиля при температурі 22°C та запасах води 5 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

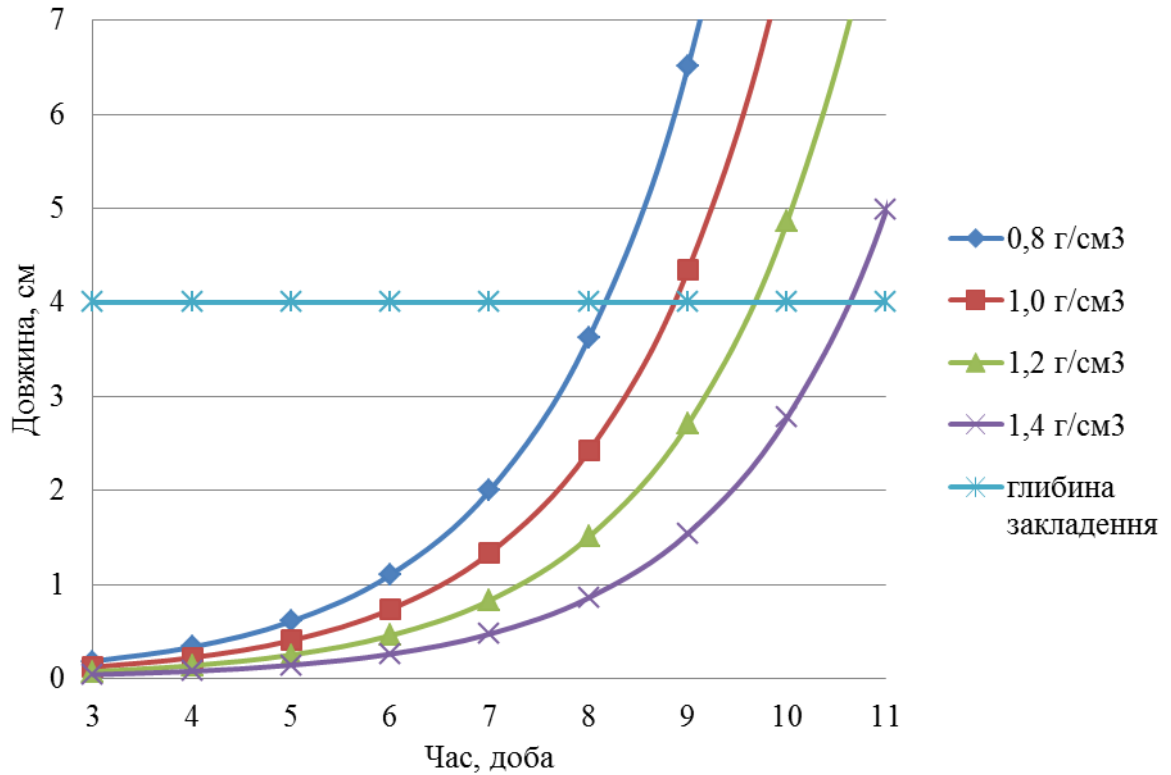


Рис. 5.18. Динаміка подовження колеоптиля при температурі 18°C та запасах води 5 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

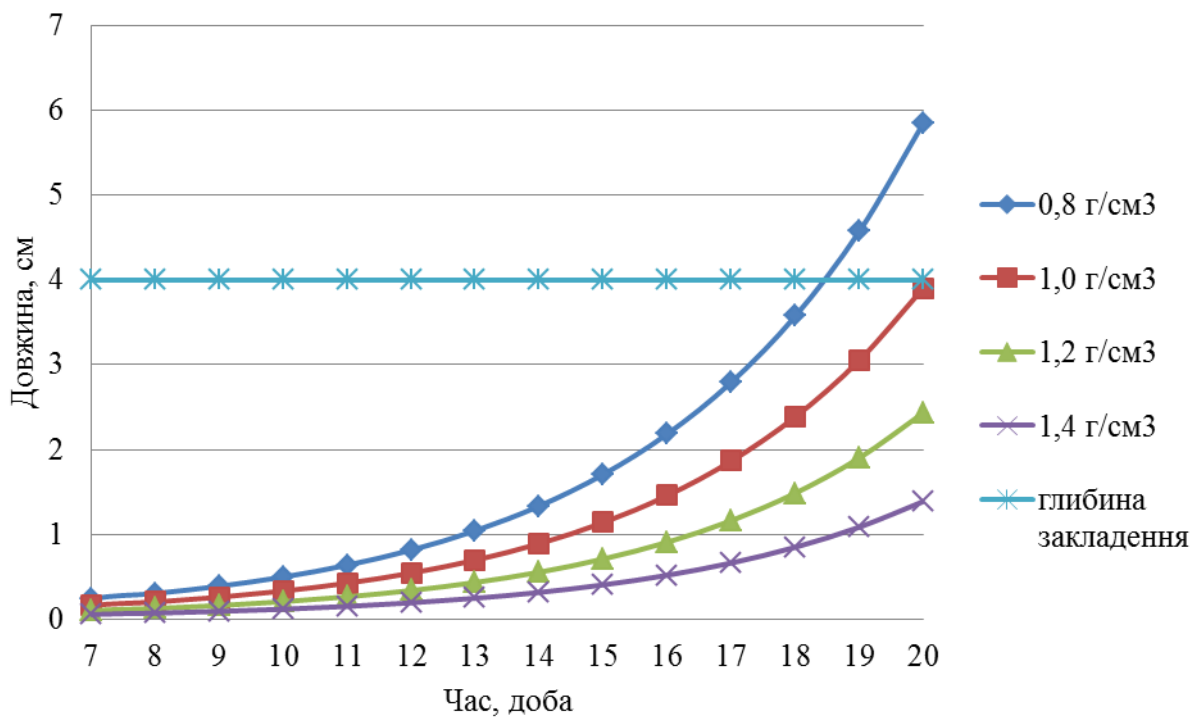


Рис. 5.19. Динаміка подовження колеоптиля при температурі 12°C та запасах води 5 мм за різної щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г / см³).

Отримані результати чисельних експериментів з моделлю близькі до розрахованих В.П.Дмитренко, виходячи з отриманого ним рівняння впливу температури повітря на тривалість періоду посів – сходи для ячменю, вівса, жита та пшениці [23]. Але зазначимо, що отримана В.П. Дмитренко залежність базується на дослідах Т.Д. Лисенка [49], які виключають випадкову дію вологості ґрунту, глибини закладення та якості насіння. Згідно В.П. Дмитренко, при температурі 22°C сходи з'являються за 5 діб, що збігається з отриманими нами результатами в умовах оптимальної (7 мм) вологості ґрунту та вище оптимальної (9 мм) із щільністю ґрунту 0,8 – 1 г/см³. При температурі 18°C тривалість періоду складає 6 діб, що в порівнянні із змодельованими даними відрізняється на 1 – 2 доби. У випадку незначних запасів вологи також спостерігаються більші відхилення. В умовах температур близьких до біологічного мінімуму кукурудзи спостерігаються деякі розходження. Це пояснюється тим, що кукурудза є теплолюбною культурою і зниження температури затримує темпи її росту у більшій мірі, аніж пшениці та ячменю, переважно для яких розроблене рівняння Дмитренком. Ним також були розраховані тривалості періоду посів – сходи за методиками О.С. Улановаї, А.І. Руденко, Г.З. Венскевича та Г. Жеслена, що дає можливість порівняти отримані нами значення з більшим числом існуючих методів [9, 100, 105, 122]. В результаті порівняння виявлено схожі залежності, однак більш близькими є розрахунки за А.І. Руденко для 18°C. Є значні розходження з методикою О.С. Уланової, що також пояснюється специфікацією методики для пшениці [101].

За даними Ю. І.Чіркова за сприятливих умов сходи з'являються за 6 – 10 діб та 20 – 25 діб – за несприятливих, що також збігається з результатами чисельного експерименту.

Згідно моделі, розробленої В.Н. Павловою в умовах недостатнього зволоження та при температурі 13°C сходи з'являються за 20 діб, за оптимальної температури – за 3 – 5 діб, що так само погоджується з результатами чисельного експерименту [63].

Отримані результати добре погоджуються з даними Джейн та Катфорт [123] про час появи сходів та швидкість подовження колеоптиля в межах температури вище 15°C, оскільки автори розглядають особливості проростання ярової пшениці, котра є менш вибагливою до температури і може розвиватися при температурах значно нижчих, ніж яких вимагає кукурудза [47]. Отримана авторами бета – функція описує залежність щоденного приросту довжини колеоптиля від температури, в умовах, коли вологість ґрунту не є лімітуючим фактором. Результати моделювання погоджуються з наведеними розрахунковими даними бета – функції і часом появи сходів, а також даними експериментів проведених Де Йонг та Бест [119]. Однак авторами взяте за основу припущення, що в умовах підтримання постійної температури рівень щоденного подовження буде постійним (мм на добу), коли в розробленій моделі береться до уваги щодобове поступове підвищення інтенсивності росту колеоптиля від моменту запуску ростових процесів у насінні.

Результати чисельних експериментів збігаються з даними наведеними в літературі. Додамо, що наведені дані потрапляють в інтервали розрахованих тривалостей періоду, які в свою чергу обмежується щільністю та вологістю ґрунту. Зрозуміло, що коли щільність ґрунту менша, то і сходи з'являться дещо раніше. Наприклад, згідно таблиці 5.3, при температурі 18,1°C сходи повинні з'явитися за 9 діб, коли за розрахункам по моделі з урахуванням мінливості характеристик ґрунту тривалість періоду складає 7 – 11 діб.

Отже, вплив температури на появу сходів, описаний за допомогою чисельного експерименту з моделлю підтверджується даними польових та лабораторних експериментів, наведених в літературних джерелах.

А.І. Насатовським на основі проведених дослідів з пшеницею було встановлено, що перший зелений лист пшениці виходить через верхівку колеоптилю або з-під ґрунту, або на його поверхні [59]. При підвищеній температурі перший лист пробивається через колеоптіль раніше ніж

колеоптиль з'явиться над поверхнею ґрунту; при зниженій температурі лист з'явиться після того, як колеоптиль досягне поверхні, тому у другому випадку лист під час росту проходить шар ґрунту під захистом колеоптиля. Таким чином колеоптиль захищає лист від прямого його контакту з ґрунтом та шкідливими організмами, що містяться в ньому. Це впливає на стійкість рослин до деяких захворювань. У тому числі гіберелла та гільментоспорум сильніше пошкоджують пагони пшениці при температурі 25°C, аніж при більш низькій температурі, коли пагін пробивається на поверхню [17].

Джейн та Катфорт також зазначають можливість появи першого листка під шаром ґрунту, але таке явище можливе лише при неглибокому закладенні насіння та незначній щільності ґрунту [123]. Автори пояснюють цей процес тим, що коли колеоптиль досягає глибини близько 2,5 см на його верхівку починають потрапляти деякі послаблені сонячні промені, що стимулює активність молодого рослини і починає пробиватися перший лист. Однак, автори не відзначають вплив такого прискореного розвитку на подальший вегетаційний ріст та стійкість рослини.

5.4. Узагальнена оцінка чутливості моделі до зміни агрометеорологічних умов

Зміна чутливості до варіації температурних умов відбувається дещо стрибкоподібно. При відхиленні від оптимального значення на 1°C в бік збільшення отримана похибка складає 27%, у бік зменшення – 21%, у той час коли зміна температури на 2°C призводить до відхилень 60 та 70 % відповідно. Подальше зменшення температури відображається у плавному затухаючому зростанні відхилення (табл. 5.7). Так при температурі 15°C відхилення становить 94%, а при температурі 14°C зростає лише до 95 %.

Вологість ґрунту є лімітуючим фактором в умовах оптимальної

температури. Зазначимо, що підвищення вмісту води на 1 мм від оптимальної прискорює появу сходів і призводить до відхилення близько 7%. Збільшення вмісту води на 2 – 3 мм призводить до відхилення в порівнянні з оптимальними значеннями на 12 – 15% (табл. 5.8). Водночас, зменшення запасів води на 1 мм призводить до відхилення в 9%, але зменшення до 5 мм значно обмежує ріст і відхилення становить вже 64%, при запасах 3 мм – 89%, при менших запасах – ріст взагалі припиняється.

Збільшення щільності ґрунту на 0,1 – 0,2 г / см³ призводить до відхилення 24 – 43% відповідно, у той час коли аналогічна зміна у бік зменшення призведе до відхилення в порівнянні з оптимальною щільністю ґрунту у 28 – 60% відповідно, а подальше зменшення на 0,3 – 0,4 г / см³ до відхилення у 98 – 140% (табл. 5.9).

5.5. Оцінка впливу різних комбінацій агрометеорологічних умов на проростання насіння та формування сходів

У попередніх підрозділах було описано реакцію насіння на зміну умов навколишнього середовища, у випадку, що вони залишаються сталими протягом всього періоду формування сходів.

Далі розглянемо реакцію насіння на деякі комбінації зміни агрометеорологічних умов, а саме:

- 1) короткочасне підвищення температури у середині періоду, за умови збереження оптимального зволоження ґрунту;
- 2) короткочасне зниження температури у середині періоду, за умови збереження оптимального зволоження ґрунту;
- 3) різке підвищення температури з середини періоду та збереження її до появи сходів, за умови оптимального зволоження ґрунту;
- 4) різке збільшення вологості ґрунту з середини періоду та

збереження її до появи сходів, за умови оптимальної температури ґрунту;

5) різке підвищення температури з середини періоду з одночасним зменшенням вологості ґрунту.

У таблиці 5.10 наведена деталізація вищезгаданих комбінацій (номер у таблиці відповідає номеру у списку).

За умов експерименту зміна параметрів навколишнього середовища відбувалася з 5 – 6 доби, тому їх вплив на накопичення води насінням немає значного сенсу, оскільки до цього часу зазвичай вже відбувся запуск ростових процесів у насінні (рис. 5.20). Оскільки у випадку комбінації № 4 температура з самого початку періоду була дещо вищою, тому можна спостерігати прискорення інтенсивності накопичення води. Але більш цікавим для розгляду є вплив обраних комбінацій агрометеорологічних умов на подовження колеоптилю (рис. 5.21).

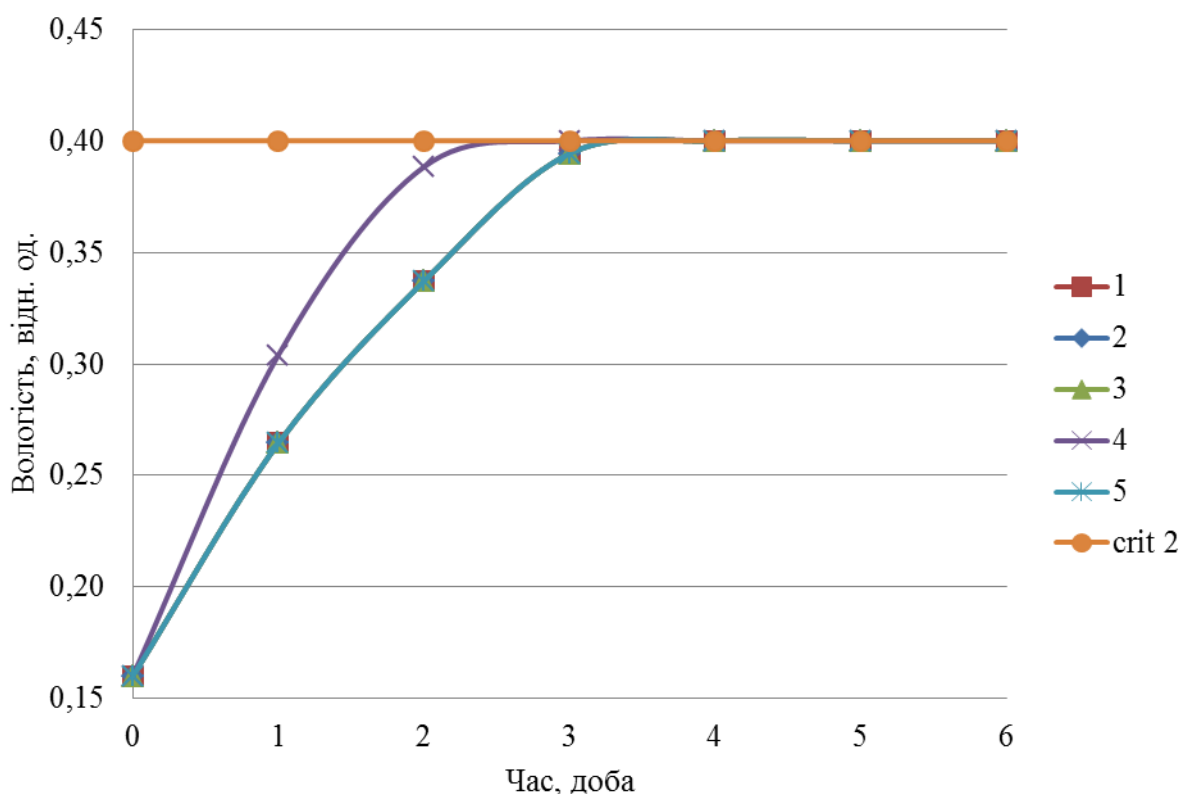


Рис. 5.20. Вплив комбінацій агрометеорологічних умов на накопичення води насінням (номер лінії відповідає номеру комбінації з наведених у таблиці 5.10).

Таблиця 5.7

Відхилення в порівнянні з оптимальною вологістю ґрунту при розрахунку довжини колеоптиля.

Вологість ґрунту, мм	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Довжина колеоптиля, см	6,07	5,90	5,64	5,28	4,83	1,92	1,63	0,58	0,00	0,00
Відхилення, %	-14,95	-11,76	-6,78	0,00	8,58	63,67	69,13	88,97	100,00	100,00

Таблиця 5.8

Відхилення в порівнянні з оптимальною температурою при розрахунку довжини колеоптиля.

Температура, °С	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
Довжина колеоптиля, см	8,45	6,71	5,28	4,12	1,58	1,28	1,03	0,82	0,66	0,34	0,29	0,24	0,16	0,14	0,11
Відхилення, %	-60,03	-27,08	0,00	21,97	70,08	75,76	80,49	84,47	87,50	93,56	94,51	95,45	96,97	97,35	97,92

Таблиця 5.9

Відхилення в порівнянні з оптимальною щільністю ґрунту при розрахунку довжини колеоптиля.

Щільність ґрунту, г / см ³	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
Довжина колеоптиля, см	12,69	10,45	8,47	6,75	5,28	4,04	3,02
Відхилення, %	-140,35	-97,88	-60,48	-27,93	0,00	23,53	42,90

Таблиця 5.10

Комбінації експериментальних агрометеорологічних умов.

№ комбінації	Параметр	Час, доба																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	T, °C	15	15	15	15	15	20	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	W, мм	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2	T, °C	15	15	15	15	15	10	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	W, мм	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
3	T, °C	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	W, мм	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
4	T, °C	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	W, мм	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
5	T, °C	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	W, мм	7	7	7	7	7	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

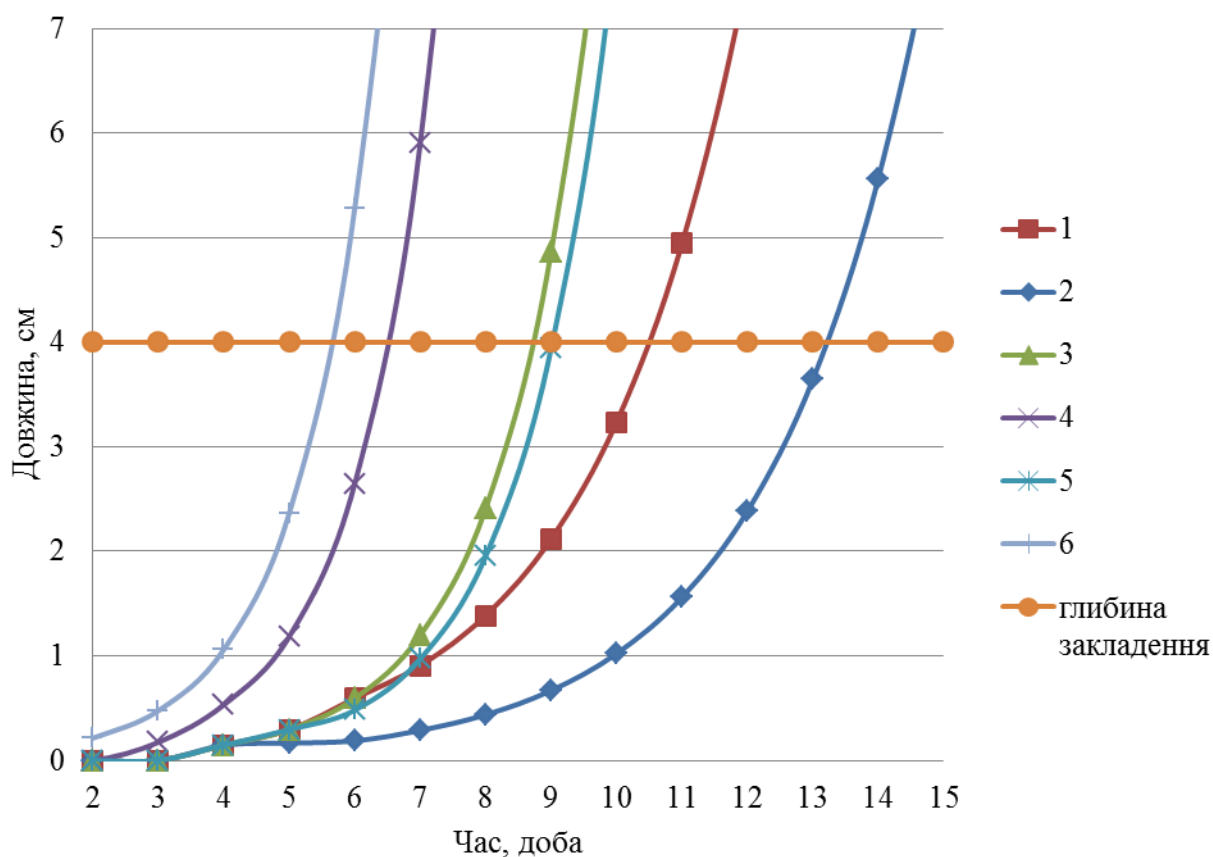


Рис. 5.21. Вплив комбінацій агрометеорологічних умов на подовження колеоптилю (номер лінії відповідає номеру комбінації з наведених у таблиці 5.10, номер 6 відповідає оптимальним умовам на протязі всього періоду – 22°C та 7 мм).

Слід сказати, що навіть короткочасна зміна температури у значній мірі впливає на час появи сходів. Якщо буде спостерігатися різкий дводенний стрибок температур у бік їх збільшення, то колеоптіль досягне глибини закладення за 11 діб після висіву. Однак, якщо спостерігатиметься аналогічний стрибок, але у бік зменшення температур, то це затримає появу сходів і колеоптіль з'явиться через 14 діб. Різке довготривале підвищення температури прискорює появу сходів, але якщо у той самий час зменшується вологість ґрунту, то це призводить до незначного сповільнення процесу подовження пагона. Різке зростання вологості ґрунту на тлі оптимальних температурних умов прискорює час появи сходів, однак через недостатнє

зволоження на початку періоду так і не досягає значень, які мають спостерігатися за оптимальних умов на протязі всього періоду.

Висновки до розділу 5

1. Проведена оцінка чутливості моделі до зміни агрометеорологічних умов. Встановлено, що найбільший вплив на проростання насіння має температура ґрунту. Значніший вплив має зниження температури, оскільки воно призводить до сповільнення процесів життєдіяльності. Коли температура знаходиться в межах оптимуму (21 – 24°C), інтенсивність процесів практично не змінюється.

2. Інтенсивність накопичення вологи при температурі ґрунту 10°C становить лише 7% за першу добу та далі поступово зменшується від 5% за другу добу до 1% за шосту добу.

3. Інтенсивність гідролізу вуглецю може досягати 796 мг/доба при температурі 24 °C, 497 мг/доба при 18 °C та лише 124 мг/доба при 10 °C. Для азоту цей показник становить 199 мг/доба при температурі 24 °C, 124 мг/доба при 18 °C та лише 25 мг/доба при 10 °C.

4. Встановлено чутливість до зміни вологості ґрунту. Накопичення вологи насінням є особливо чутливим до цього фактора. Коли вологість ґрунту становить 6 – 10 мм, запуск ростових процесів відбувається вже за 2 доби після висіву. Зі зниженням вологості ґрунту до 3 – 5 мм, інтенсивність накопичення вологи насінням зменшується і досягає критичного значення лише за 3 – 4 доби. У випадку, коли вологість ґрунту знаходиться у межах 6 – 10 мм, подовження колеоптилю відбувається досить синхронно і сходи з'являються за 6 діб. Зі зниженням вологості до 4 – 5 мм період появи сходів подовжується до 7 – 8 діб, а при вологості 3 мм становить 9 діб.

5. Щільність ґрунту не впливає на накопичення вологи насінням та

гідроліз запасів ендосперму, але її збільшення сповільнює процес подовження пагону. Так, за найменшої щільності $0,8 - 0,9 \text{ г/см}^3$ сходять можуть з'явитися за 5 діб, при $1,0 - 1,3 \text{ г/см}^3$ – за 6 діб та щонайменше за тиждень у випадку щільності $1,4 \text{ г/см}^3$ та більше.

6. Зміна температури на 1°C в бік збільшення або зменшення відносно оптимального значення призводить до похибки 27 та 21% відповідно, у той час коли зміна температури на 2°C призводить вже до похибок 60 та 70 %. Надалі з кожним кроком похибка зростає повільніше.

7. Підвищення вмісту води на 1 мм від оптимального значення прискорює появу сходів і призводить до похибки близької 7%. Збільшення вмісту води на 2 – 3 мм призводить до похибки розрахунків 12 – 15%. Водночас, зменшення запасів води на 1 мм призводить до похибки в 9%, але зменшення до 5 мм значно обмежує ріст і похибка становить вже 64%.

8. Збільшення щільності ґрунту на $0,1 - 0,2 \text{ г / см}^3$ від оптимального значення призводить до похибки 24 – 43% відповідно, її зменшення призводить до відносної похибки 28 – 60% відповідно.

9. Проведено ряд чисельних експериментів з визначення впливу агрометеорологічних умов на проростання насіння. Насіння у значній мірі реагує на зміну температури та вологості ґрунту.

10. Підвищення температури стимулює накопичення води, однак даний процес сповільнюється у разі недостатньої вологості ґрунту. Насіння дуже чутливе до зменшення вологості ґрунту, однак, підвищення вологості вище оптимального значення на фоні сприятливих температур майже не впливає на інтенсивність поглинання води. Насіння не поглинає воду з ґрунту лише в тому випадку, якщо вологість ґрунту менше вологості стійкого зав'ядання. Якщо води в ґрунті недостатньо, то процес набубнявіння зупиняється до того часу, поки ґрунт не стане вологішим.

11. Проведені чисельні експерименти з різними комбінаціями агрометеорологічних умов. За оптимальних умов навколишнього ґрунтового середовища насіння накльовується вже за 2 доби, при недостатній

зволоженості цей період подовжується до 3 діб. Зі зниженням температури, через те, що процес накопичення вологи сповільнюється, ріст почнеться за 3 – 5 діб, а на тлі недостатнього зволоження – через 7 діб.

12. Короткочасна зміна температури значною мірою впливає на час появи сходів. Коли спостерігається різкий дводенний стрибок температур у бік їх збільшення (з 15 до 20°C), то колеоптіль досягає глибини закладення за 11 діб після висіву. Однак, якщо спостерігається аналогічний стрибок, але у бік зменшення температур (з 15 до 10°C), то поява сходів затримується і колеоптіль з'явиться через 14 діб.

13. Різке зростання вологості ґрунту (з 5 до 9 мм) на тлі оптимальних температурних умов прискорює час появи сходів, однак якщо недостатнє зволоження спостерігалось на початку періоду (коли насіння накопичувало вологу), то інтенсивність проростання буде значно меншою, аніж за оптимальних умов на протязі всього періоду.

14. Найнесприятливішими умовами для проростання насіння за результатами чисельних експериментів є температура 12°C та малі запаси вологи (5 мм). У такому випадку сходи з'являться лише якщо щільність ґрунту буде менше 1 г/см³. Терміні появи сходів складуть 19 діб. Якщо запаси вологи будуть 7 – 9 мм, то насіння загине лише за високої щільності ґрунту (1,4 г/см³), а поява сходів можлива щонайменше за 16 діб.

15. Проведене порівняння отриманих результатів моделювання з існуючими літературними даними. Отримані дані добре погоджуються з експериментальними та теоретичними даними різних авторів.

РОЗДІЛ 6

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ ПОЯВИ ТА ПОВНОТИ СХОДІВ

6.1. Алгоритм визначення термінів появи та повноти сходів

На основі розробленої моделі, що детально описана у Розділі 3 (3.2. Модель формування сходів зернових культур), та за допомогою програми Microsoft Office Excel модель реалізована на ПОЕМ. Далі наведені послідовність та методика використання моделі, а також приклад її використання.

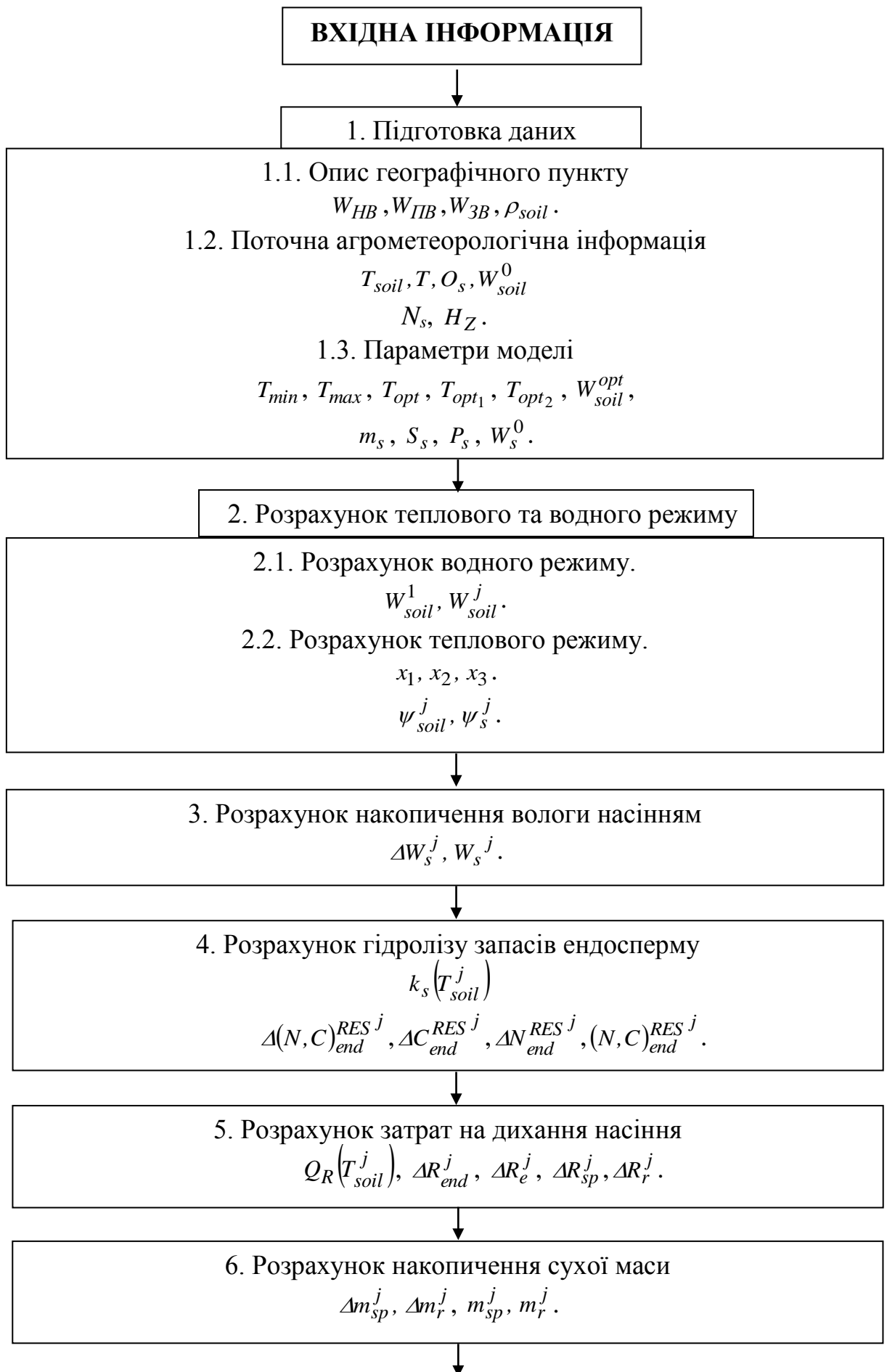
Нагадаємо принципи покладені в основу алгоритму моделі. На рисунку 6.1 представлений узагальнений варіант блок-схеми алгоритму моделі. На першому етапі насіння поглинає вологу. Поступово вміст води зернівки досягає певного критичного значення (*crit 1*), і з цього моменту починається гідроліз запасного білка, крохмалю та дихання зародка і ендосперму. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення (*crit 2*), відбувається запуск ростових процесів, зародок переходить у стан проростка, який складається із зачатків корінця та пагона. Визначення вологості насіння припиняється. Гідроліз запасних речовин ендосперму продовжується, так само як його дихання та дихання осевих органів. Утворені продукти гідролізу перерозподіляються між коренем та пагоном, використовуються на їх ріст та накопичена сухої маси. З моменту початку росту проростка, паралельно визначається довжина колеоптиля (пагона) на кожному кроці розрахунків. Коли довжина колеоптиля сягнула глибини закладення насіння – спостерігаються сходи. Далі визначається розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі, тобто повнота сходів.

Проведення розрахунків проводиться у кілька етапів, які умовно можна

розділити на підготовчий, допоміжно-розрахунковий, розрахунковий та етап аналізу отриманих результатів. На першому етапі проводиться підготовка даних, на другому – розрахунок водного та теплового режиму ґрунту і насіння, далі – послідовний розрахунок згідно блоків моделі та аналіз отриманих результатів. Деталізована блок-схема алгоритму моделі показана на рисунку 6.2. Далі детальніше зупинимося на методиці визначення термінів появи та повноти сходів та прикладах розрахунку по вказаній методиці.



Рис.6.1. Блок-схема алгоритму моделі формування сходів зернових культур (узагальнений варіант).



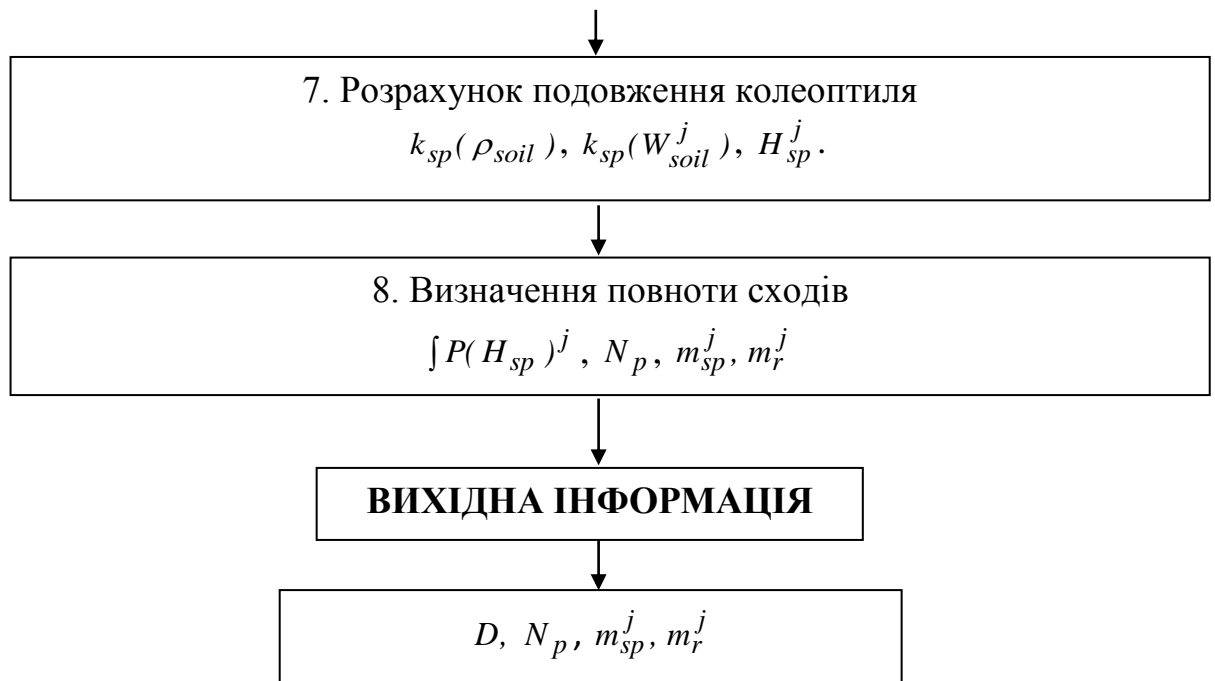


Рис.6.2. Блок-схема алгоритму моделі формування сходів зернових культур (деталізований варіант).

6.2. Методика визначення термінів появи та повноти сходів

6.2.1. Підготовка даних.

Для виконання оцінки за допомогою моделі необхідно підготувати три групи даних:

1) опис географічного пункту (метеорологічної станції), для якого виконується розрахунок;

2) агрометеорологічна інформація періоду в конкретний рік;

3) параметри моделі.

Опис географічного пункту (метеорологічної станції).

До складу цієї групи входять:

W_{HB} – найменша вологоємність шару ґрунту 0 – 10 см;

$W_{ПВ}$ – повна вологоємність шару ґрунту 0 – 10 см;

$W_{ЗВ}$ – вологість зав'язання рослин шару ґрунту 0 – 10 см;

ρ_{soil} – щільність ґрунту (об'ємна маса).

Поточна агрометеорологічна інформація.

До складу цієї групи входять:

1) дата висіву культури.

На основі цієї інформації визначається:

2) щодобові метеорологічні та агрометеорологічні дані за період «висів – сходи»:

T_{soil} – середня за добу температура шару ґрунту 0 – 10 см;

T – середня за добу температура повітря;

O_s – кількість опадів за добу;

W_{soil}^0 – запаси продуктивної вологи у 0–10 см шарі ґрунту на дату висіву;

3) дані про особливості висіву культури:

N_s – норма висіву;

H_Z – глибина закладення насіння.

Параметри моделі.

До складу цієї групи входять наступні характеристики:

1) вимоги культури до тепла та вологи:

T_{min} – мінімальна температура для розвитку культури;

T_{max} – максимальна температура для розвитку культури;

T_{opt} – середня температура для розвитку культури;

T_{opt_1} – верхня межа оптимальної температури для розвитку культури;

T_{opt_2} – верхня межа оптимальної температури для розвитку культури;

W_{soil}^{opt} – оптимальна вологість ґрунту для розвитку культури;

ΔW_{soil}^{j-1} – зміна запасів продуктивної вологи у 0–10 см шарі ґрунту за j -ту добу;

2) параметри насіння:

m_s – маса насіння;

S_s – розмір насіння;

P_s – проникність оболонки насіння;

W_s^0 – початкова вологість насіння.

6.2.2. Розрахунок теплового та водного режиму.

Розрахунок водного режиму.

Для першої доби вологість ґрунту визначається наступним чином:

$$W_{soil}^1 = -16,795 + 0,632W_{soil}^0 + 0,299T_{soil}^0 + 0,115O_s^0, \quad (6.1)$$

для послідуєчих діб

$$W_{soil}^j = -16,795 + 0,632\Delta W_{soil}^{j-1} + 0,299T_{soil}^{j-1} + 0,115O_s^{j-1}. \quad (6.2)$$

Розрахунок теплового режиму.

Розрахунок відхилення від оптимальних значень температури та вологості ґрунту (x_1, x_2, x_3):

$$x_1 = \frac{T - T_{min}}{T_{opt1} - T_{min}}, \quad (6.3)$$

$$x_2 = \frac{T - T_{opt2}}{T_{max} - T_{opt2}}, \quad (6.4)$$

$$x_3 = \frac{W_{soil}}{W_{soil}^{opt}}. \quad (6.5)$$

Значення x_1 визначається у випадку, коли добова температура нижча за оптимальну, а значення x_2 – у випадку, коли добова температура вища за оптимальну.

Розрахунок водного потенціалу насіння:

$$\psi_{soil}^j = 1,5 \exp \left(-7,76 \frac{W_{soil}^j - B3}{ПВ - B3} \right). \quad (6.6)$$

Розрахунок водного потенціалу ґрунту:

$$\psi_s^j = \frac{R_{const} T_{soil}^j}{\bar{V}_m} \ln m. \quad (6.7)$$

6.2.3. Розрахунок накопичення вологи насінням.

Розрахунок швидкості накопичення вологості насінням:

$$\Delta W_s^j = S_s P_s \left(\psi_{soil}^{j-1} - \psi_s^{j-1} \right), \text{ при } W_s^j < crit_2. \quad (6.8)$$

Вологість насіння для першої доби визначається наступним чином:

$$W_s^1 = W_s^0 + \Delta W_s^1, \quad (6.9)$$

для другої та послідуєчих діб

$$W_s^j = W_s^{j-1} + \Delta W_s^j. \quad (6.10)$$

6.2.4. Розрахунок гідролізу запасів ендосперму та затрат на дихання насіння.

Розрахунок гідролізу запасів ендосперму.

Розрахунок функції впливу температури ґрунту на швидкість гідролізу:

$$k_s(T_{soil}^j) = \begin{cases} 0,058 + 0,773x_1 + 1,913x_1^2 + 5,400x_1^3 - 3,322x_1^4 & \text{при } T < T_{op1} \\ 1 & \text{при } T_{op1} \leq T \leq T_{op2} \\ -11,47 + 29,87x_2^2 + 5,43x_2^3 & \text{при } T > T_{op2} \end{cases} \quad (6.11)$$

Розрахунок швидкості гідролізу:

$$\Delta(N, C)_{end}^{RES j} = K_s^{zid} m_s k_s(T_{soil}^j), \text{ при } W_s^j \geq crit_1. \quad (6.12)$$

Розрахунок перерозподілу продуктів гідролізу:

$$\Delta C_{end}^{RES j} = \alpha \Delta(N, C)_{end}^{RES j}, \quad (6.13)$$

$$\Delta N_{end}^{RES j} = (1 - \alpha) \Delta(N, C)_{end}^{RES j}. \quad (6.14)$$

Розрахунок накопичення продуктів гідролізу

$$C_{end}^{RES j} = C_{end}^{RES j-1} + \Delta C_{end}^{RES j}, \quad (6.15)$$

$$N_{end}^{RES j} = N_{end}^{RES j-1} + \Delta N_{end}^{RES j}. \quad (6.16)$$

Розрахунок затрат на дихання насіння.

Визначення функції впливу температури ґрунту на дихання:

$$Q_R(T_{soil}^j) = 2^{0,1(T_{soil}^j - T_{opt})}. \quad (6.17)$$

Визначення швидкості дихання ендосперму:

$$\Delta R_{end}^j = c_m m_s Q_R(T_{soil}^j). \quad (6.18)$$

Визначення швидкості дихання зародку:

$$\Delta R_e^j = 10 \Delta R_{end}^j, \text{ при } W_s^j < crit_2. \quad (6.19)$$

Визначення швидкості дихання пагона:

$$\Delta R_{sp}^j = \beta \Delta N_{end}^{RES^j} Q_R(T_{soil}^j), \text{ при } W_s^j \geq crit_2. \quad (6.20)$$

Визначення швидкості дихання кореня:

$$\Delta R_r^j = (1 - \beta) \Delta N_{end}^{RES^j} Q_R(T_{soil}^j), \text{ при } W_s^j \geq crit_2. \quad (6.21)$$

6.2.5. Розрахунок накопичення сухої маси та подовження колеоптиля.

Розрахунок накопичення сухої маси.

Визначення приросту сухої маси пагоном (коренем):

$$\Delta m_{sp(r)}^j = \left(\gamma \Delta C_{end}^{RES\ j} + \eta \Delta N_{end}^{RES\ j} \right) - \Delta R_{sp(r)}^j. \quad (6.22)$$

Визначення сухої маси пагона (кореня):

$$m_{sp(r)}^j = m_{sp(r)}^{j-1} + \Delta m_{sp(r)}^j. \quad (6.23)$$

Розрахунок подовження колеоптиля.

Визначення функції впливу щільності ґрунту на подовження колеоптиля:

$$k_{sp}(\rho_{soil}) = 3,725 - 4,465\rho_{soil} + 1,674\rho_{soil}^2 - 0,177\rho_{soil}^3. \quad (6.24)$$

Визначення функції впливу вологості ґрунту на подовження колеоптиля:

$$k_{sp}(W_{soil}^j) = 0,020 + 2,602x_3 - 2,593x_3^2 + 0,977x_3^3. \quad (6.25)$$

Визначення довжини колеоптиля:

$$H_{sp}^j = \exp\left(m_{sp}^j \frac{1}{\rho_{sp}}\right) \frac{1}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}^j). \quad (6.26)$$

На основі розробленої моделі була отримана також функція впливу температури ґрунту на подовження колеоптиля. Коефіцієнт апроксимації складає 0,985, а функція має вигляд:

$$y = 0,0064x^3 - 0,2508x^2 + 3,2726x - 13,991. \quad (6.27)$$

Функція у графічному вигляді представлена на рис. 6.3.

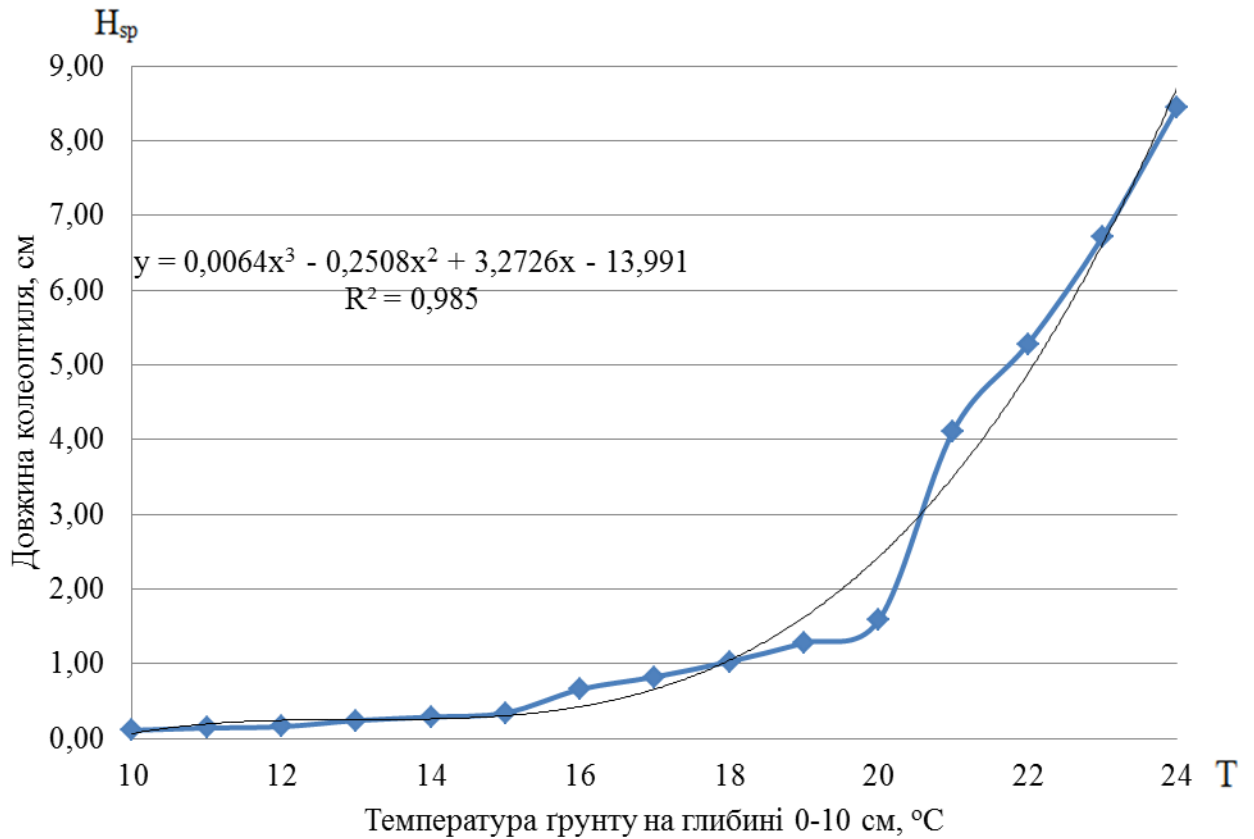


Рис. 6.3. Функція впливу температури на подовження колеоптиля

Також на основі розрахунків проведених по моделі отримана функція впливу вологості ґрунту на подовження колеоптиля, яка має вигляд:

$$y = -0,0297x^3 + 0,4678x^2 - 1,2006x + 0,7512. \quad (6.28)$$

Квадрат коефіцієнту кореляції складає 0,973, у графічному вигляді функція представлена на рис. 6.4.

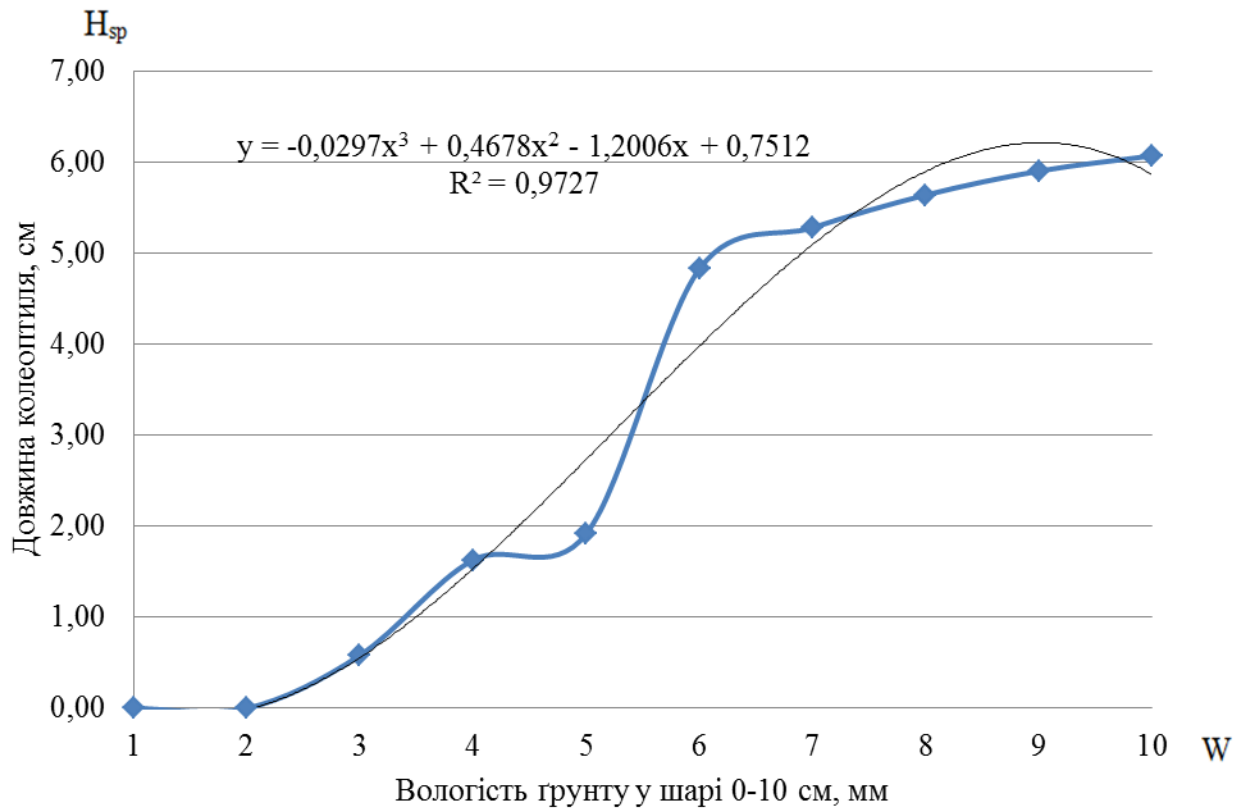


Рис. 6.4. Вплив вологості ґрунту (W) за період посів-сходи на довжину колеоптиля (H_{сп}).

6.2.6. Визначення повноти сходів та вихідна інформація.

Визначення повноти сходів.

Розрахунок повноти сходів проводився на основі функції розподілу рослин з глибиною закладення:

$$P(H_{sp})^j = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H_{sp}^j - H_z^p)^2}{2\sigma^2}}. \quad (6.29)$$

Однак, для проведення розрахунків було використано інтеграл даної функції:

$$\int P(H_{sp})^j = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{H_{sp}^j - H_z^p}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right). \quad (6.30)$$

Визначення кількості рослин на одиницю площі:

$$N_p = N_s \cdot \int P(H_{sp})^j. \quad (6.31)$$

На основі моделі була отримана функція впливу щільності ґрунту на час появи масових сходів (рис. 6.5). Наведений графік було отримано для випадку, коли на протязі періоду зберігаються оптимальні умови для проростання та обрано стандартну глибину закладення (4 см), тобто лімітуючим фактором є лише щільність ґрунту. Зазначимо, що масові сходи з'являються, коли інтеграл глибини функції розподілення рослин з глибиною досягне значення 0,6. Отже, знаючи щільність ґрунту користуючись графіком можна визначити час появи масових сходів.

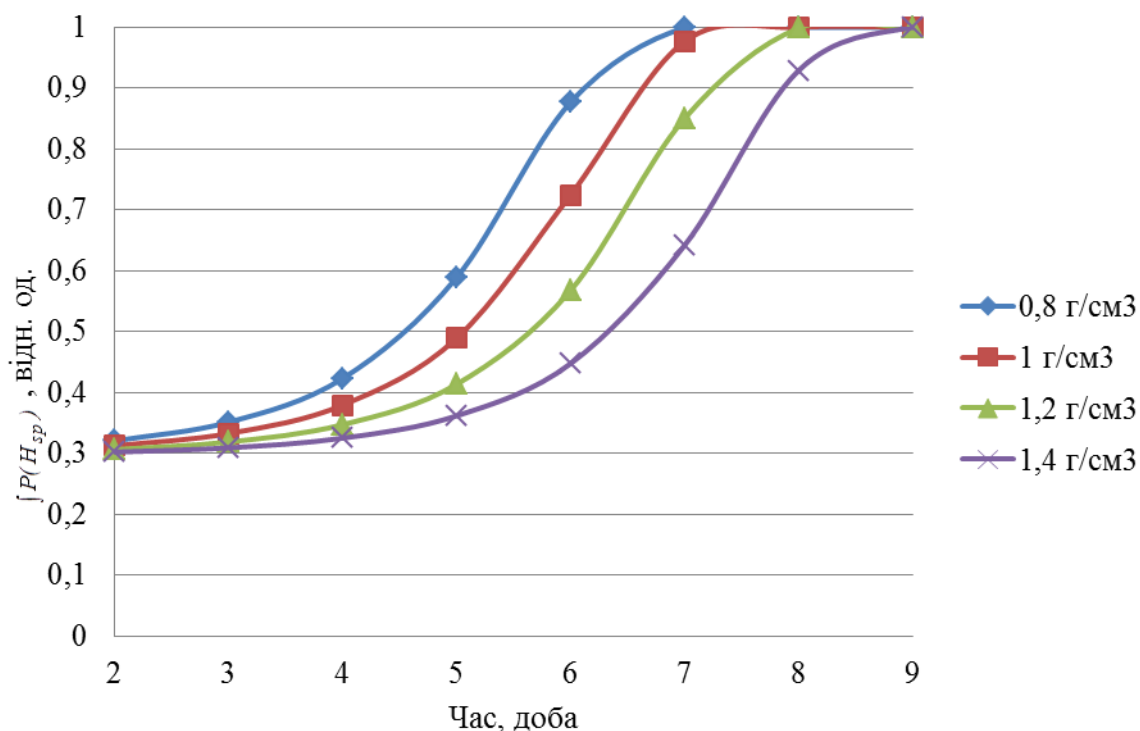


Рис. 6.5. Вплив щільності ґрунту на терміни появи масових сходів.

На рис. 6.6 представлено графічне вираження функції впливу глибини закладення насіння на повноту сходів. За збереження оптимальних умов для проростання та знаючи глибину закладення насіння на графіку можна визначити час появи масових сходів.

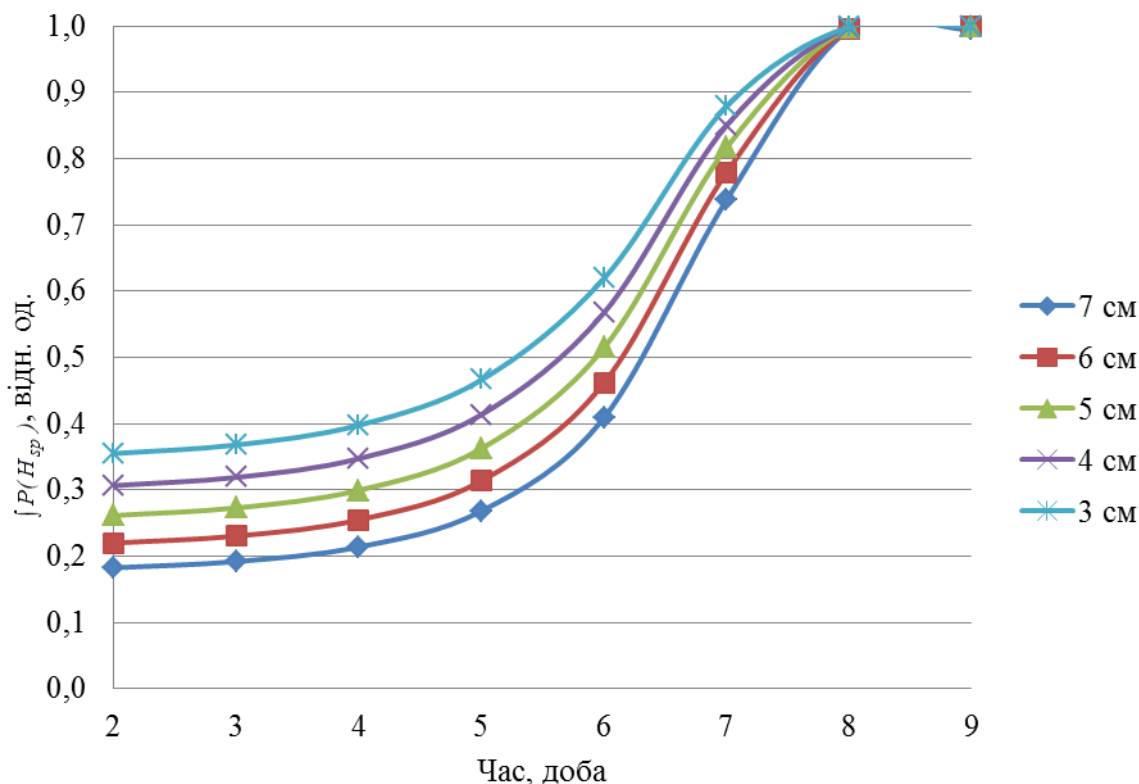


Рис. 6.6. Вплив глибини закладення на терміни появи масових сходів.

На рис. 6.3, 6.4 добре видно, що щільність ґрунту має більший вплив на час появи масових сходів, аніж безпосередньо сама глибина закладення. Так наприклад, коли щільність ґрунту складає $0,8 \text{ г / см}^3$, то сходи з'являться вже за 5 діб, у той час, коли за щільності $1,4 \text{ г / см}^3$, найімовірніший час їх появи – за 7 діб. Водночас глибина закладення також сповільнює появу сходів, однак різниця у часі появи сходів у випадку закладення насіння на глибину 3 см та на глибину 7 см складе лише 1добу.

Вихідна інформація.

В якості вихідної інформації на виході моделі ми отримуємо тривалість періоду від посіву до появи масових сходів (D) та повноту сходів (кількість

рослин на 100 м^2 , N_p). А також масу коренів та пагонів на момент появи масових сходів (m_{sp}^j , m_r^j).

6.3. Приклади розрахунків за методикою

В якості прикладу розрахунку по моделі було обрано два випадки з різними метеорологічними умовами періоду:

- а) період з відносно постійними умовами на протязі періоду, близькими до оптимальних;
- б) період зі зміною умов на протязі періоду.

Звернемо увагу на те, що оскільки умови у першому випадку є досить постійними, тому деякі параметри моделі можуть залишатися незмінними для будь-якого періоду також.

Більш детально розглянемо вхідні дані та параметри моделі для обох випадків.

Опис географічного пункту:

W_{HB} – 10 мм;

W_{PB} – 14 мм;

W_{3B} – 1 мм;

ρ_{soil} – 1,2 г/см³.

Поточна агрометеорологічна інформація періоду:

T_{soil} – 22°C для випадку а) та значення наведені у таблиці 6.2 для випадку б);

T – 20°C для випадку а) та значення наведені у таблиці 6.2 для випадку б);

O_s – значення параметру наведені у таблицях 6.1 та 6.2 для кожного випадку відповідно;

$$W_{soil}^0 - 7 \text{ мм};$$

$$N_s - 17,5 \text{ кг / га};$$

$$H_Z - 4 \text{ см.}$$

Параметри моделі:

1) вимоги культури до тепла та вологи:

$$T_{min} - 8^\circ\text{C};$$

$$T_{max} - 35^\circ\text{C};$$

$$T_{opt} - 23^\circ\text{C};$$

$$T_{opt_1} - 22^\circ\text{C};$$

$$T_{opt_2} - 24^\circ\text{C};$$

$$W_{soil}^{opt} - 7 \text{ мм};$$

2) параметри насіння:

$$m_s - 0,28 \text{ г};$$

$$S_s - 2,5 \text{ см}^2;$$

$$P_s - 0,0001 \text{ с / см}^2;$$

$$W_s^0 - 0,16.$$

Розрахунки проводилися відповідно до наведеної вище методики. Покрокові розрахунки по моделі представлено у таблиці 6.1 для випадку а) та у таблиці 6.2 для випадку б). У таблицях вказано номери рівнянь для кожного параметру, згідно яких проводилися розрахунки.

В якості вихідної інформації моделі отримано тривалість періоду від посіву до появи масових сходів (D), що становить 7 діб для випадку а) та 12 діб для випадку б); повноту сходів (N_p) – 668 шт/100 м² та 670 шт/100 м² відповідно; а також масу пагонів (m_{sp}) – 19 кг (приклад а)) та 21 кг (приклад б)), і коренів на момент появи масових сходів (m_r) – 29 та 31 кг відповідно.

На основі розрахованих даних побудовані графіки вірогідності появи сходів для випадку а (рис. 6.7) та випадку б (рис. 6.8).

Таблиця 6.1

Приклад покрокового розрахунку за методикою у випадку оптимальних умов середовища (а).

Параметр (умовне позначення)	№ формули	Доба							
		0	1	2	3	4	5	6	7
T	-	20	20	20	20	20	20	20	20
Tsoil	-	22	22	22	22	22	22	22	22
Os	-	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0
Wsoil	(6.1-6.2)	7,00	6,19	6,13	6,11	6,11	6,10	6,09	6,10
x ₁	(6.3)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
x ₂	(6.4)	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08
x ₃	(6.5)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Ψsoil	(6.6)	-1,29	-1,80	-1,85	-1,86	-1,86	-1,87	-1,88	-1,87
Ψseed	(6.7)	-19,05	-11,89	-9,52	-9,52	-9,52	-9,52	-9,52	-9,52
ΔW	(6.8)	-	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
W	(6.9-6.10)	0,16	0,32	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
ks(Tsoil)	(6.11)	721,73	721,73	721,73	721,73	721,73	721,73	721,73	721,73
ΔNC	(6.12)	0,00	870,51	870,51	870,51	870,51	870,51	870,51	870,51
ΔC	(6.13)	0,00	696,41	696,41	696,41	696,41	696,41	696,41	696,41
ΔN	(6.14)	0,00	174,10	174,10	174,10	174,10	174,10	174,10	174,10
C	(6.15)	0,00	696,41	1392,82	2089,24	2785,65	3482,06	4178,47	4874,88
N	(6.16)	0,00	174,10	348,21	522,31	696,41	870,51	1044,62	1218,72
Qr(Tsoil)	(6.17)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
ΔRend	(6.18)	-	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔRe	(6.19)	-	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
ΔRsp	(6.20)	-	-	40,61	40,61	40,61	40,61	40,61	40,61
ΔRr	(6.21)	-	-	40,61	40,61	40,61	40,61	40,61	40,61
Δmsp	(6.22)	-	-	272,77	272,77	272,77	272,77	272,77	272,77
Δmr	(6.22)	-	-	420,76	420,76	420,76	420,76	420,76	420,76

Таблиця 6.2

Приклад покрокового розрахунку за методикою для випадку (б).

Параметр (умовне позначення)	№ формул и	Доба												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T		14	14	14	14	14	18	18	18	18	18	18	18	18
Tsoil		15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	20	20	20
Os		0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wsoil	(6.1- 6.2)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
x1	(6.3)	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
x2	(6.4)		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
x3	(6.5)	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-2,93	-2,93	-2,93	-2,93	-2,93	-2,93	-2,93
Ψsoil	(6.6)	-12,99	-9,43	-7,71	-6,60	-6,49	-8,66	-8,66	-8,66	-8,66	-8,66	-8,66	-8,66	-8,66
Ψseed	(6.7)	7,00	6,19	6,13	6,11	6,11	6,10	5,80	5,50	5,40	5,40	5,35	5,35	5,30
ΔW	(6.8)		0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01432	0,01	0,01	0,01	0,01
W	(6.9-6.10)	0,16	0,26	0,34	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,4	0,40	0,40	0,40	0,40
ks(Tsoil)	(6.11)	360,77	360,77	360,77	360,77	360,77	618,64	618,64	618,64	618,64	618,64	618,64	618,64	618,64
ΔNC	(6.12)	0,00	435,14	435,14	435,14	435,14	746,17	746,17	746,17	746,17	746,17	746,17	746,17	746,17
ΔC	(6.13)	0,00	348,11	348,11	348,11	348,11	596,94	596,94	596,94	596,94	596,94	596,94	596,94	596,94
ΔN	(6.14)	0,00	87,03	87,03	87,03	87,03	149,23	149,23	149,23	149,23	149,23	149,23	149,23	149,23
C	(6.15)	0,00	348,11	696,22	1044,33	1392,45	1989,38	2586,32	3183,26	3780,20	4377,14	4974,07	5571,01	6167,95
N	(6.16)	0,00	87,03	174,06	261,08	348,11	497,35	646,58	795,81	945,05	1094,28	1243,52	1392,75	1541,99
Qr(Tsoil)	(6.17)	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
ΔRend	(6.18)	-	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔRe	(6.19)	-	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
ΔRsp	(6.20)	-	-	12,50	12,50	12,50	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30
ΔRr	(6.21)	-	-	12,50	12,50	12,50	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30	30,30

Продовж. табл.6.2

Параметр (умовне позначенн я)	№ формул и	Доба												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δm_{sp}	(6.22)	-	0,00	0,00	0,00	144,15	238,32	238,32	238,32	238,32	238,32	238,32	238,32	238,32
Δm_r	(6.22)	-	0,00	0,00	0,00	218,13	365,17	365,17	365,17	365,17	365,17	365,17	365,17	365,17
m_{sp}	(6.23)	-	0,00	0,00	0,00	144,15	382,47	620,79	859,11	1097,43	1335,74	1574,06	1812,3 ₈	2050,70
m_r	(6.23)	-	-	0,00	0,00	218,13	583,30	948,46	1313,63	1678,80	2043,96	2409,13	2774,3 ₀	3139,47
$k_{sp}(p_{soil})$	(6.24)	0,47												
$k_{sp}(W_{soil})$	(6.25)	-	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
H_{sp}	(6.26)	-	0,00	0,00	0,00	0,15	0,29	0,48	0,97	1,95	3,94	7,94	16,01	32,26
$P(l)$	(6.27)	-	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
$JP(l)$	(6.30)	-	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,32	0,34	0,39	0,50	0,70	0,95	1,00
N_p	(6.31)	-	199	199	199	203	208	214	230	262,99	333	469	633	670

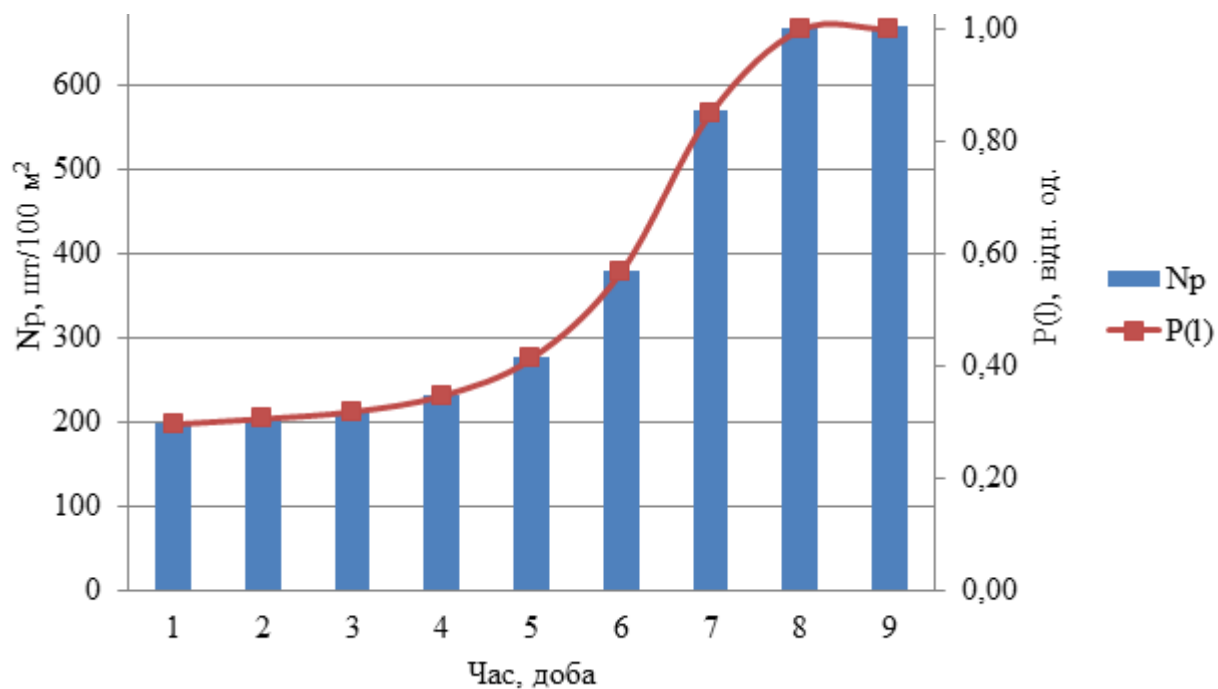


Рис. 6.7. Ймовірність появи сходів (кількість рослин на 100 м²) за оптимальних умов навколишнього середовища (випадок (а)) в період посів-сходи.

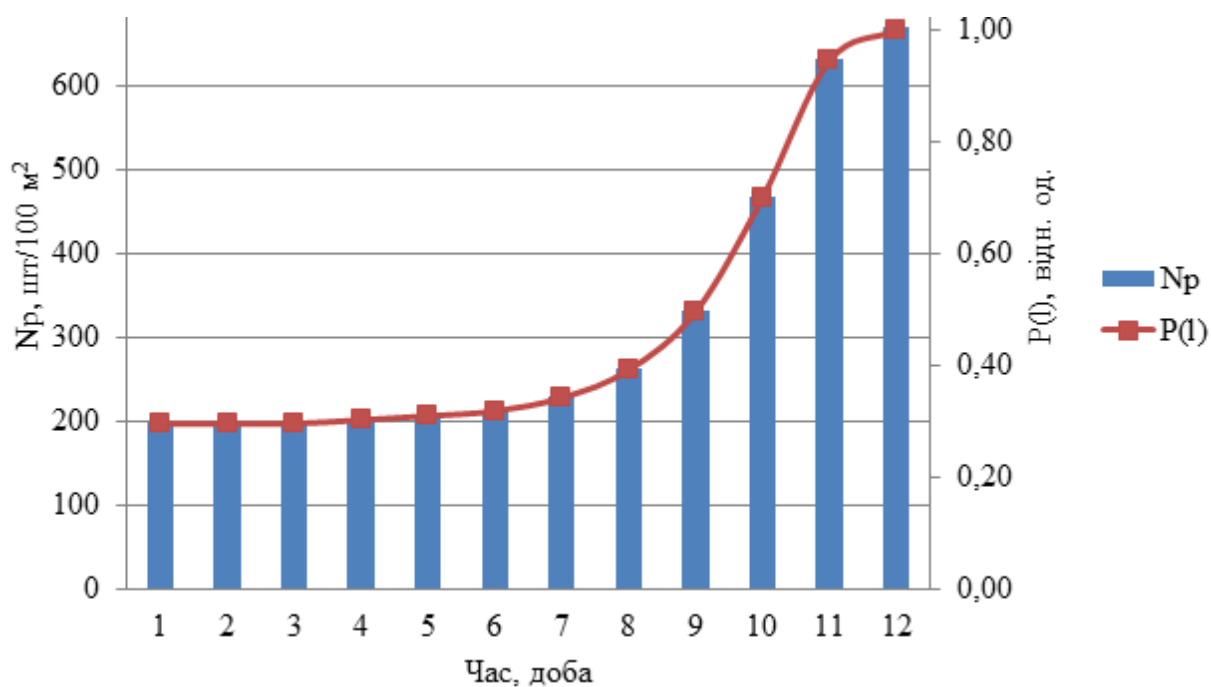


Рис. 6.8. Ймовірність появи сходів (кількість рослин на 100 м²) (випадок (б)) в період посів-сходи.

Виходячи з графіків видно, що проростання насіння та формування сходів відбувається не рівномірно. Швидше відбувається накопичення вологи та ріст колеоптиля за оптимальних умов навколишнього середовища, а саме: при температурі ґрунту 22 °С та його вологості 6 – 7 мм найбільша ймовірність появи сходів спостерігатиметься вже на 8 добу. У випадку, коли температура ґрунту відрізняється від оптимальної та становить лише 15 °С у період накопичення вологи насінням та 20 °С надалі до кінця періоду формування сходів, а також практично за відсутності опадів і як наслідок недостатньої вологості ґрунту розвиток рослини сповільнюється, а найбільша ймовірність появи сходів спостерігатиметься лише на 12 добу.

Висновки до розділу 6

1. Розроблена методика визначення термінів появи та повноти сходів зернових культур. Представлена блок-схема алгоритму моделі у деталізованому та узагальненому варіанті. Детально описані всі етапи роботи моделі від підготовки даних до обробки отриманих результатів.

2. В якості прикладу, для культури кукурудзи проведені розрахунки за запропонованою методикою для випадку з оптимальними умовами періоду та для випадку з дещо зниженою температурою на початку періоду та відсутністю опадів під час росту осьових органів. Визначена динаміка вірогідності появи сходів та кількості рослин на 100 м².

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, пов'язаної з дослідженням та агрометеорологічною оцінкою проростання насіння та формування сходів зернових культур. Це дало можливість вирішити низку задач наукового і практичного характеру, а саме:

1. Виконано аналіз сучасного стану моделювання та оцінки впливу агрометеорологічних умов на проростання насіння та появу сходів зернових культур. Виявлено основні закономірності та особливості моделювання даного процесу.

2. В лабораторному експерименті встановлено особливості накопичення вологи насінням, росту осьових органів, динаміки вуглеводів під час проростання та накопичення сухої маси проростка. Визначені особливості впливу температури на інтенсивність зазначених процесів.

Встановлено, що при температурі 22 °C інтенсивність накопичення вологи зернівкою становить 17% на добу (в перерахунку від сухої маси) за першу добу, 6% за другу добу та 3% за третю добу. Середня суха маса проростка у момент появи сходів становить 23 мг.

При температурі 18 °C інтенсивність накопичення вологи зернівкою становить 16% на добу за першу добу, 6% за другу добу та 2% за наступні дві доби. Сходи з'являються на дев'яту добу з середньою сухою масою проростка трохи більшою за 23 мг.

При температурі 12 °C темпи накопичення вологи та росту сповільнені. За першу добу після висіву насіння накопичує 16% вологи, за другу – 5%. Однак за послідуючі дні цей показник становить лише 1 – 1,6%, а запуск ростових процесів відбувається лише за тиждень, а сходи з'являються за 18 діб.

3. Протягом росту молодії рослини вміст вуглеводів зернівки зменшується, оскільки вони використовуються на утворення рослинної тканини осьових органів. Експериментально встановлено, що при

оптимальних умовах з моменту набубнявіння насіння на ріст проростка щодоби витрачається близько 2 % сухої маси зернівки.

4. На основі врахування біології процесу проростання насіння з врахуванням підходів, які використовуються в існуючих моделях періоду «посів – сходи», розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур та адаптована стосовно культури кукурудзи. Модель враховує як вплив агрометеорологічних умов, так і характеристики самого насіння та описує динаміку накопичення вологи насінням, гідроліз запасних речовин зернівки, дихання та ріст органів проростка. Модель дозволяє визначити терміни тривалості періоду «посів – сходи», повноту сходів, а також зелену масу новоутворених органів.

5. Визначені параметри моделі та проведена оцінка її адекватності та чутливості. Встановлена висока чутливість поглинання вологи насінням до температури та вологості ґрунту, а також чутливість швидкості подовження колеоптіля до температури та щільності ґрунту.

6. Визначено вплив агрометеорологічних умов на накопичення вологи насінням. Температура має ключовий вплив на протікання всіх процесів життєдіяльності насіння та молоді рослини в подальшому. Підвищення температури прискорює зазначені процеси. Коли температура становить 22°C – насіння наклюнується за 2 доби; при 18°C – за 3 доби та при 12°C – за 5 діб. Однак, коли температура оптимальна, то фактором який обмежує розвиток є вологість ґрунту. Її збільшення до 9 мм майже не впливає на інтенсивність набубнявіння насіння, але її зменшення до 5 мм сповільнює процес накопичення вологи зернівкою. У такому випадку ростові процеси починаються не раніше 3-ї доби, а на тлі температури 12°C – через 6 діб після висіву. Якщо води в ґрунті недостатньо, то процес набубнявіння зупиняється до того часу, доки ґрунт не стане вологішим. На цьому етапі щільність ґрунту не впливає на розвиток насіння.

7. Визначено вплив агрометеорологічних умов на подовження колеоптіля. Встановлена висока чутливість швидкості подовження колеоптіля до температури ґрунту, а також до його щільності.

В умовах збереження оптимального ґрунтового середовища (22°C та 7 мм), лімітуючим фактором для появи сходів є щільність ґрунту. Таким чином, якщо при мінімальному значенні щільності 0,8 г/см³ колеоптіль може досягти поверхні ґрунту вже на 5-у добу після посіву, то при щільності 1,4 г/см³ – сходи з'являться тільки через 7 діб. Зі зниженням температури ґрунту інтенсивність проростання насіння також зменшується. Тому при температурі 18°C сходи з'являться через 7 – 10 діб, а при 12°C – мінімум через 16 діб після висіву.

8. Особлива роль у появі сходів та їх повноті належить низьким температурам (10-12°C та нижче), які порушують біологічну рівновагу між корисними та патогенними мікроорганізмами на користь останніх, починають розвиватися грибки, що пошкоджують насіння та молоді рослини.

Згубними для формування сходів є низька температура (нижче 12°C) та висока щільність ґрунту (1,4 г/см³). В умовах комбінації несприятливих умов вологість ґрунту є другорядним фактором, оскільки її підвищення призводить до пошкодження рослин патогенними мікроорганізмами, пліснявінням тощо, зниження вологості ґрунту у будь-якому випадку затримує розвиток рослини.

9. Короткочасна зміна температури значною мірою впливає на час появи сходів. Коли спостерігається різкий дводенний стрибок температур у бік їх збільшення (з 15 до 20°C), то колеоптіль досягає глибини закладення за 11 діб після висіву. Однак, якщо спостерігається аналогічний стрибок, але у бік зменшення температур (з 15 до 10°C), то поява сходів затримується і колеоптіль з'явиться через 14 діб.

10. Різке зростання вологості ґрунту (з 5 до 9 мм) на тлі оптимальних температурних умов (22°C) прискорює час появи сходів, однак якщо недостатнє зволоження спостерігалось на початку періоду (коли насіння

накопичувало вологу), то інтенсивність проростання буде значно меншою, аніж за стабільних оптимальних умов на протязі всього періоду.

11. Встановлено, що найнесприятливішими умовами для проростання насіння є температура 12°C та низькі запаси вологи (5 мм). У такому випадку сходи з'являться лише якщо щільність ґрунту буде менше 1 г/см^3 . Терміні появи сходів складуть 19 діб. Якщо запаси вологи будуть на рівні 7 – 9 мм, то насіння загине лише за високої щільності ґрунту ($1,4\text{ г/см}^3$), а поява сходів можлива щонайменше за 16 діб.

12. Розроблена методика визначення термінів появи та повноти сходів зернових культур. Методика дозволяє визначити тривалість періоду від посіву до появи масових сходів, повноту сходів, масу пагонів і коренів на момент появи сходів. Детально описані всі етапи роботи моделі від підготовки даних до обробки отриманих результатів. В якості прикладу, для культури кукурудзи проведені розрахунки за запропонованою методикою для випадку з оптимальними умовами періоду та для випадку з дещо зниженою температурою на початку періоду та відсутністю опадів під час росту осьових органів. Визначена динаміка ймовірності появи сходів та кількості рослин на квадратний метр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексейчук Г. Н. Индуцирование стрессоустойчивости растений ячменя при прорастании семян: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Алексейчук Галина Николаевна; Национальная Академия наук Беларуси, Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск, 1999. – 20 с.
2. Антоненко В.С. Агрометеорологический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов [Текст] / В.С. Антоненко. – К.: АртЭк, 2002. – 307 с.
3. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы [Текст] / В.С. Антоненко. – К.: «АртЭк», 2002. – 64 с.
4. Афендулов К.П. Минеральное питание и удобрение кукурузы [Текст] / К.П. Афендулов. – К.: «Урожай», 1966. – 258 с.
5. Беликов Е.И. Селекция скороспелых гибридов кукурузы / Е.И. Беликов, А.В. Алдошин, А.Н. Брага // Бюл. Ин-ту зерн. госп-ва УААН. – Дніпропетровськ: 1997. – №5. – С. 24 – 26.
6. Бихеле И.Г. Субмодель распределения ассимилятов и роста растения при водном дефиците [Текст] / И.Г. Бихеле, Х.А. Молдау, Ю.К. Росс. – Тарту: 1980. – 23 с.
7. Бойко А.П. Исследование гидрометеорологического режима среды обитания растений численными методами [Текст] / А.П. Бойко. – С.-Пб.: Гидрометиздат, 1993. – 215 с.
8. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги [Текст] / А.И. Будаговский. – М.: Наука, 1964. – 242 с.
9. Венцкевич Г.З. Агрометеорология [Текст] / Г.З. Венцкевич. – Л.: Гидрометеоиздат, 1958. – 376 с.
10. Вериго С.А. Почвенная влага и ее значение в

сельскохозяйственном производстве [Текст] / С.А. Вериге, Л.А. Разумова. – Л.: Гидрометиздат, 1963. – 288 с.

11. Волна Е.П. Сроки сева и урожай // Кукуруза. – 1977. – №4. – С.15.
12. Володарский Н.И. Биологические основы возделывания кукурузы [Текст] / Н.И. Володарский. – М.: Колос, 1975. – 154 с.
13. Генкель П.А. Минеральное питание. Рост и развитие. Эмбриогенез и органоогенез [Текст] / П.А. Генкель // Физиология сельскохозяйственных растений. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – Т. 2. – 482 с.
14. Генкель П.А. Физиология пшеницы [Текст] / П.А. Генкель // Физиология сельскохозяйственных растений. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – Т. 4. – 555 с.
15. Генкель П. А. Физиология устойчивости растительных организмов / П.А. Генкель // Физиология сельскохозяйственных растений. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – Т. 3. – С. 87 – 118.
16. Гильманов Т.Г. Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах [Текст] / Т.Г. Гильманов. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 167 с.
17. Гойса Н.И. Об изменчивости показателей продуктивности посевов озимой пшеницы / Н.И. Гойса, Р.В. Гаценко, В.С. Антоненко // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – М.: Гидрометиздат. – 1985. – Вып. 205. – С. 24 – 34.
18. Гойса Н.И. Гидрометеорологический режим и продуктивность орошаемой кукурузы [Текст] / Н.И. Гойса, Р.Н. Олейник, А.Д. Рогаченко. – Л.: Гидрометиздат, 1983. – 230 с.
19. Гойса Н.И. Динамика формирования продуктивного стеблестоя озимой пшеницы // Труды УкрНИИГМИ. – 1979. – №. 173. – С. 83 – 84.
20. Горбачев В.А. Математическое моделирование водно-теплового режима корнеобитаемого слоя почвы. – Обзорная информация ВНИИГМИ – МЦД. / В.А. Горбачев. – 1983. – 44 с. – (Серия «Метеорология»):– Вып. 10
21. Грингоф И.Г. Агорметеорология [Текст] / И.Г. Грингоф,

В.В. Попова, В.Н. Страшный. – Л.: Гидрометиздат, 1987. – 310 с.

22. Гришко В.Н. Влияние соединений фтора на прорастание семян сельскохозяйственных культур // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Біологія. Екологія.–Д. : ДНУ. – 2004. – Т. 1. – С. 24-28.

23. Дмитренко В.П. Влияние температуры воздуха на продолжительность периода посев – всходы зерновых культур // Труды УкрНИГМИ. – 1961. – №. 22. – С.19 – 31.

24. Дмитренко В.П. Оценка влияния температуры воздуха и осадков на формирование урожая основных зерновых культур[Текст] : методическое пособие / В.П. Дмитренко. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 49 с.

25. Дмитренко В.П. Принципи і засоби визначення потенціалу врожаю сільськогосподарських культур за еколого-географічними засадами // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2005. – Вип. 254. – С. 9-29.

26. Добрачев Ю.П. Перспективы использования имитационного моделирования для оценки продуктивности с.-х. культур [Текст] / Ю.П. Добрачев, Б.В. Щербицкий, Т.А.Ильина. – М.:ВНИИТЭИСХ,1984.–66с.

27. Добрынин Г.М. Рост и формирование хлебных и кормовых злаков [Текст] / Г.М. Добрынин. – Л.: Колос, 1969. – 276 с.

28. Долгий-Трач В.А. Динамическая модель формирования всходов зерновых культур // Метеорология и гидрология. – 1988. – №1. – С. 107 – 114.

29. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта [Текст] / Б.А. Доспехов. М.: Колос, 1979. – 416 с.

30. Дрозд О.М. Математичне моделювання урожайності сільськогосподарських культур на плантажованих солонцевих ґрунтах сухого степу України // Наукові праці Кримський агротехнічний університет. – 2010. – Вип. 130. – С. 222 – 225.

31. Зубарев А.Н. Скорость прорастания семян и сроки появления всходов зерновых культур при различных метеорологических условиях / А.Н. Зубарев //Сб. метод. указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий.– Л.:ЦИП, 1957. – С. 58 – 71.

32. Иванов П.К. Яровая пшеница [Текст] / П.К. Иванов. – М.: Колос, 1971. – 328 с.
33. Келети Т. Основы ферментальной кенетики [Текст] / Т. Келети. – М.: Мир, 1990. – 348 с.
34. Ковтун И.И. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии [Текст] / И.И. Ковтун, Н.И. Гойса, Б.А. Митрофанов. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 288 с.
35. Коган Ф.Н. Расчет урожая яровой пшеницы по метеорологическим данным в районах резко континентального климата //Метеорология и гидрология. – 1966. – Т. 10. – С. 14-19.
36. Колесніков М.О. Вплив водного дефіциту на активність α -амілази насіння кукурудзи (*Zea Mays L.*) при проростанні / М.О. Колесніков. – Наукові доповіді НУБіП, 2012 – №3 (32). – Режим доступу до журналу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_3/12kmo.pdf
37. Коровин А.И. Роль температуры в минеральном питании растений [Текст] / А.И. Коровин. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 281 с.
38. Коровин А.И. Физиологическая роль низких температур в снижении полевой всхожести семян / А.И. Коровин, Б.П. Торлин и др. – Сельскохозяйственная биология, 1966. – Т. 1 – № 2 – С. 295 – 300.
39. Коровин А.И. Растения и экстремальные температуры [Текст] / А.И. Коровин. – Л.: Гидрометиздат, 1984. – 271 с.
40. Кошелава Л.Л. Распределение ассимилятов в растениях льна-долгунца при разных условиях азотного питания / Л.Л. Кошелева, В.М. Терентьев, К.В. Бахнова //Регуляция роста и питания растений. – Вильнюс: МОКСЛАС, 1980. – С. 186 – 195.
41. Кравченко Р. В. Агробіологічне обґрунтування отримання стабільних урожаїв зерна кукурудзи в умовах степної зони Центрального Предкавказ'я [Текст] / Р.В. Кравченко. – Ставрополь, 2010. – 208 с.
42. Кравчук В.І. Основи методології моніторингу агроресурсів та прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за проектом

MARS / В. Кравчук, Н. Сердюченко //Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. [Під ред. В.І. Кравчука] – Дослідницьке, 2009.– Вип. 13. – С. 3 – 14.

43. Кравчук В.І. Моніторинг росту та прогнозування врожайності сільськогосподарських культур. Проект «Марс» // Техніка і технології АПК, 2009. – №1. – С. 27 – 31.

44. Кротінов В.П. Густота рослин кукурудзи в умовах південно-східного Степу України // Бюл. Ін-ту зерн. госп-ва УААН. Дніпропетровськ, 1996. – №1. – С.68 – 71.

45. Кулешов Н.Н. Ботаническое описание кукурузы // Записки Харьк. СХИ. – Харьков: – 1955. – Т.ХІ – С.23 – 54.

46. Куперман Ф.М. Морфофизиология растений. Морфофизиологический анализ этапов органогенеза различных жизненных форм покрытосеменных растений [Текст]: учебное пособие / Ф.М. Куперман. – Высшая школа, 1973. – 255 с.

47. Куперман Ф.М. Физиология развития, роста и органогенеза пшеницы. //Физиология сельскохозяйственных растений. – Изд-во МГУ, 1969. – Т.4. – С.7 – 203.

48. КуССуль Н. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / [Н. КуССуль и др.] // International Book Series "Information Science and Computing" – 2008. – С. 103 – 109.

49. Лысенко Т.Д. Стадийное развитие растений [Текст] / Т.Д. Лысенко. – М.: Сельхозиздат, 1952. – 34 с.

50. Мацына Н.В. Влияние сроков посева, густоты растений и минерального удобрения на урожай и качество гибридов кукурузы в условиях Юго-восточной степи Украины : автореф... канд. с.-х. наук / Н.В. Мацына. – Ворошиловград, 1983. – 16 с.

51. Методические рекомендации по проведению полевых опытов с кукурузой / [Д.С. Филев В.С. Циков, В.И. Золотов, Н.И. Логачев и др.] // ВНИИ кукурузы. – Днепропетровск, 1980. – 54 с.
52. Методическое пособие по оценке агрометеорологических условий произрастания кукурузы [Текст] / Ю.И. Чирков. – М.: Гидрометиздат, 1961. – 22 с.
53. Моисеев Н.Н. О методологии математического моделирования процессов сельскохозяйственного производства // Вест. с.-х. науки. – 1984. – №1. – С. 14 – 20.
54. Молостов А.С. Методика полевого опыта [Текст] / А.С. Молостов. – М.: Колос, 1966. – 322 с.
55. Мушкетова О.В. Поглощение воды семенами ярового ячменя на этапе физического набухания / О.В. Мушкетова, А.С. Казакова // Вестник аграрной науки Дона. – 2009. – № 1. –С. 39–43.
56. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. Вип. 11. Агрометеорологічні спостереження. –Київ: Держгідрометслужба, 2007.–362с.
57. Наумов М.М. Период посев–всходы растений и биологическое время //Український гідрометеорологічний журнал. – 2006.– № 1.–С.135–140.
58. Немченко О.А. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза / О.А. Немченко, Л.И. Мусаменко // Физиология и биохимия культурных растений. – 1982. – Т. 14. – №5. – С.439 – 445.
59. Носатовский А.И. Пшеница [Текст] / А.И. Носатовский. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950.–408с.
60. Овчаров К.Е. Физиология формирования семян и прорастания семян [Текст] / К.Е. Овчаров. – М.: Колос, 1976. – 255 с.
61. Овчаров К.Е. Физиология формирования семян [Текст] / К.Е. Овчаров. – М.: Колос, 1976. – 356 с.
62. Оксененко И.А. Влияние посевной агротехники на глубину заложения узла кущения и образования узловых корней у ячменя // Сб. научных трудов Ивановского сельскохозяйственного института. – 1967. –

Вып. 17 – С. 28 – 37.

63. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай» // Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. 8. – С. 28 – 36.

64. Полевой А.Н. Моделирование развития зерновых культур на ранних этапах органогенеза и формирования всходов / А.Н. Полевой, В.В. Синицына // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – XXV. – Москва, 2013. – С. 265 – 287.

65. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов [Текст] / А.Н. Полевой. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 318 с.

66. Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология [Текст] / А.Н. Полевой. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 424 с.

67. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур [Текст] / А.Н. Полевой. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.

68. Полевой А.Н. Современное состояние математического моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур / А.Н. Полевой, М.А. Строганова // Труды ВНИИСХМ. – 1985. – Вып. – 9. – С. 6 – 23.

69. Полевой В.В. Физиология роста и развития растений [Текст] / В.В. Полевой, Т.С. Саламатова. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. – 293 с.

70. Полевой В.В. Физиология растений [Текст] / В.В. Полевой. – М.: Высшая школа, 1989. – 464 с.

71. Полуэктов Р.А. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур / [Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж]. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 396 с.

72. Польовий А.М. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур //Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – №. 3. – С. 75-85.

73. Польовий А.М. Сільськогосподарська метеорологія [Текст]: підручник. / Польовий Анатолій Миколайович; Одеський державний екологічний університет. – Одеса: ТЕС, 2012. – 630 с.
74. Пыщева З.М. Сроки сева и продуктивность кукурузы // Кукуруза. – 1977. – №4. – С. 16 – 17.
75. Семенов И.С. О познавательной роли методов статистики //Филосовские проблемы современного естествознания. – 1982. – Вып. 53. – С. 24 – 29.
76. Сініцина В.В. Алгоритм динамічної моделі формування сходів зернових культур // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2013. – № 15. –С. 101-109.
77. Сініцина В.В. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур // Матеріали XIII наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ. – Одеса: ТЕС, 2013. – С. 105.
78. Сініцина В.В. Динамічна модель формування сходів зернових культур // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.И.Вернадського. Серія: географічні науки. – 2013. – Том 26 (65), №2. – С. 81-89.
79. Сініцина В. В. Динамічна модель формування сходів зернових культур // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Роль меліорації та водного господарства у забезпеченні сталого розвитку землеробства». – Київ: ІВПіМ, 2012. – С. 71-72.
80. Синицына В. В. Моделирование прорастания семян зерновых // Материалы XII научной конференции молодых ученых ОГЭКУ. – Одесса: ТЕС, 2012. – С. 23.
81. Синицына В. В. Моделирование формирования всходов зерновых культур // Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века. Материалы 12-й международной научной конференции, 17 – 18 мая 2012 г., г. Минск, Республика Беларусь – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. – С. 213 – 214.

82. Сініцина В.В. Моделювання впливу температури на проростання насіння // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання сучасної аграрної науки». – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2013. – С. 89.
83. Сініцина В.В. Моделювання накопичення вологи насінням зернових культур в період посів – сходи // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: географічні науки. – 2013. – Том 26 (65), №4. – С. 45 – 53.
84. Сініцина В.В. Моделювання проростання насіння та появи сходів зернових культур. Цілі збалансованого розвитку для України: матеріали міжнародної конференції – К.: Цент екологічної освіти та інформації, 2013. – С. 110-112.
85. Сініцина В.В. Моделювання розвитку зернових культур на ранніх етапах онтогенезу // Матеріали II міжнародної конференції «Молодь у вирішенні екологічних та соціально-економічних проблем сьогодення», 10 – 15 червня 2013 р., С. 50 – 52.
86. Сініцина В.В. Моделювання росту колеоптилю зернових культур в період «посів – сходи» // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2013. – № 16. –С. 75-82.
87. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистемы [Текст] / О.Д. Сиротенко. – Л.: Гидрометиздат, 1981. – 167 с.
88. Слейчер Р. Водный режим растений [Текст] / Р. Слейчер. – М.: Мир, 1970. – 365 с.
89. Смиловенко А.А. Семеноводство с основами селекции полевых культур [Текст]: учеб. пособие / А.А. Смиловенко. – М.: ИКЦ «МарТ», 2004. – 240 с.
90. Справочник агрогидрологических свойств почв Украинской ССР [Текст]: / [Под ред. А.А. Мороз]. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 550 с.
91. Степанов В.Н. Минимальные температуры для прорастания

семян и появления всходов полевых культур // Селекция и семеноводство. – 1948. – №1. – С.51– 58.

92. Строганова М.А. Математическое моделирование формирования качества урожая [Текст]: / М.А. Строганова. - Л.: Гидрометеиздат. – 1986. – 151 с.

93. Строганова М.А. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов / М.А. Строганова, А.И. Коровин, А.Н. Полевой // Сельскохозяйственная биология. – 1983. – №1. – С. 126 – 135.1

94. Строганова М.А. Динамическая модель роста проростков зерновых культур в период посев – всходы / М.А. Строганова, Н.А. Сунцева // Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. – 8. – С. 36 – 45.

95. Султангазин У.М. Использование космического мониторинга в планировании и прогнозировании параметров зернового производства / У.М. Султангазин, Н.Р. Муратова, А.Г. Терехов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Сборник научных статей, Москва. – 2003. – С. 291 – 297.

96. Томашевский Д.Ф. О влиянии сроков сева и глубины заделки семян на урожайность // Кукуруза. – 1959. – №3. – С.44 – 45.

97. Торнли Дж.Г.М. Математические модели в физиологии растений [Текст] / Дж.Г.М. Торнли. – К.: Наукова думка, 1982. – 310 с.

98. Третьяков Н.Н. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений [Текст] / [Н.Н. Третьяков, Е.И. Кошкин, Н.М. Макрушин и др.]. – М.: Колос, 1998. – 640 с.

99. Турков Н.С. Физиология сельскохозяйственных растений / Н.С. Турков // М.: Из-во МГУ. – 1967. – Т. 6. – С. 249 – 251.

100. Уланова Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов[Текст] / Е.С. Уланова. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 280 с.

101. Уланова Е.С. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии [Текст] / Е.С. Уланова, В.Н. Забелин. – Л.:

Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.

102. Федосеев А.П. Агрометеорологические условия формирования всходов ячменя / А.П. Федосеев // Труды ИЭМ, (4), 1968. – С. 63-85.

103. Филев Д.С. Агробιοлогические особенности роста, развития и продуктивности гибридов кукурузы различной скороспелости в связи со сроками сева /Филев Д.С., Прокапало И.С., Головки А.И., Гуйда Н.И., Жунька В.С., Сидоренко Я.П. // Бюл. ВНИИ кукурузы. – Днепропетровск, 1971. – Вып.3(20). – С. 15 – 20.

104. Рубин Б.А. Физиология кукурузы и риса [Текст] / Б.А. Рубин // Физиология сельскохозяйственных растений. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – Т. 5. – 416 с.

105. Руденко А.И. Определение фаз развития сельскохозяйственных растений [Текст] / А.И. Руденко. – М.: Издательство Московского общества испытателей природы, 1950. – 151 с.

106. Хворова Л.А. Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений / Л.А. Хворова, Н.В. Гавриловская // Известия Алтайского государственного университета.– 2010. – №1. – С. 139 – 144.

107. Холманский А.С. Зависимость кинетики набухания семян от температуры / А.С. Холманский, А.С. Сидоренко // Электронный научный журнал "Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем". – 2008. – В. 6. – Режим доступа к журналу: <http://www.kubstu.ru/fams>.

108. Циков В.С. Кукуруза: технология, гибриды, семена [Текст] / В.С. Циков. – Днепропетровск: Изд-во Зоря, 2003. – 296 с.

109. Чекина Т.А. О водном дефиците и продуктивности кукурузы /Т.А. Чекина // Труды УкрНИГМИ. – 1980. – Вып. 122. – С. 81 – 84.

110. Чертов А.Г. Физические величины. Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы [Текст] / А.Г. Чертов. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

111. Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность

кукурузы [Текст] / Ю.И. Чирков. – Л.: Гидрометиздат, 1969. – 251 с.

112. Aggarwal P.K. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agroecosystems in tropical environments. I. Model description / P.K. Aggarwal et al. // *Agricultural Systems*. – 2006. – № 89. – P. 1–25.

113. Alm D.M. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence / David M. Alm et.al. // *Weed Technology*. – 1993. – Vol. 7. – № 3. – P. 560 – 569.

114. Barley K.P. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots / K.P. Barley, E.L. Greacen // *Adv. Agron.* – 1967. – Т. 19. – №. 1.

115. Baskin C.C. Ecologically Meaningful Germination Studies. Chapter 2 – Seeds Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination / Carol C. Baskin, Jerry M. Baskin. – Academic press, 1998. – P. 5 – 26.

116. Bewley D.J. Seeds. Physiology of Development and Germination / D.J. Bewley, M. Black // Springer US, Plenum Press, New York. – 1985. – P. 1 – 27.

117. Carberry P.S. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment / P.S. Carberry, R.C. Muchow, R.L. McCown // *Field Crops Research*. – 1989. – Т. 20. – №. 4. – P. 297 – 315.

118. Chipanshi A.C. Early prediction of spring wheat yields in Saskatchewan from current and historical weather data using the CERES-Wheat model / A.C. Chipanshi, E.A. Ripley, R.G. Lawford // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 1997. – № 84. – P. 223 – 232.

119. de Jong R. The effect of soil water potential, temperature and seedling depth on seedling emergence of wheat / de Jong R., K.F. Best // *Can. J. Soil Sci.* 59. – 1979. – P. 259 – 264.

120. Debeaujon I. Influence of the testa on seed dormancy, germination, and longevity in *Arabidopsis* / I. Debeaujon, K.M. Léon-Kloosterziel, M. Koornneef // *Plant Physiology*. – 2000. – Т. 122. – №. 2. – P.403 – 414.

121. Forcella F. Modeling seedling emergence / F. Forcella et al. // Field Crops Research. – 2000. – Vol. 67. – P. 123 – 139.
122. Geslin H. Contribution a l'étude du complex heliothermique / H. Geslin // Ann. Inst. Nat. Recherche Agronomique. – 1952. – P. 321 – 326.
123. Jame Y.W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat / Y.W. Jame, H.W. Cutforth // Agricultural and Forest Meteorology. – 2004. – № 124. – P. 207–218.
124. Lafond G.P. Effects of temperature, moisture stress, and seed size on germination of nine spring wheat cultivars / G.P. Lafond, R.J. Baker // Crop science. – 1986. – T. 26. – №. 3. – C. 563 – 567.
125. Nouna B.B. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modelling of leaf area and water stress functions / B.B. Nouna, N. Katerji, M. Mastrorilli // European journal of agronomy. – 2003. – T. 19. – №. 2. – P. 115 – 123.
126. Palosuo T. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models / T. Palosuo et al. // Europ. J. Agronomy. – 2011. – Vol. 635.– P. 103 – 114.
127. Polevoy A. Results of numerical experiments with model of corn seeds germination and sidling emergence / A. Polevoy, V. Sinitsyna // Agricultural Sciences. – Plovdiv, 2014. – Vol. VI, Issue 15. – P. 69-77.
128. Quiring S.M. Application of CERES-Maize for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA / S.M. Quiring, D.R. Legates // Agricultural and forest meteorology. – 2008. – T. 148. – №. 6. – P. 964-975.
129. Seefeldt S.S. Base growth temperatures, germination rates and growth response of contemporary spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from the US Pacific Northwest / S.S. Seefeldt, K.K. Kidwell, J.E. Waller // Field Crops Research. – № 75. – 2002. – P. 47 – 52.
130. Symons S.J. Changes in the Growth Capacity of the Developing Wheat Embryo: 1. The influences of the enveloping tissues / S.J. Symons et al. // Journal of experimental botany. – 1983. – T. 34. – №. 11. – C. 1541 – 1550.