

МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ КОЛЕОПТИЛЮ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В ПЕРІОД «ПОСІВ – СХОДИ»

Розглядається розвиток та ріст колеоптиля зернових культур. Описані особливості моделювання розвитку пагона в період від посіву до сходів. Представлені результати проведеного моделювання впливу агрометеорологічних умов на подовження колеоптиля та час появи сходів.

Ключові слова: насіння, ендосперм, зародок, колеоптіль, проросток, пагін, ріст, сходи.

Вступ. Життєвий цикл зернових рослин починається з формування зиготи, однак вікові періоди прийнято визначати з моменту проростання насіння. Тому зазвичай першим періодом розвитку визначається стан проростка. На відміну від наступних 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 материнської рослини та насіння.

На першому етапі органогенезу формування пагона починається з утворення ініціальних клітин промеристеми. Із ініціальних клітин формується конус наростання з первинними зачатками органів майбутнього пагона. Просунення пагона у ґрунті зумовлене розтягненням клітин. Для захисту зародкового листя при просуванні пагона в щільному ґрунті у злаків служить колеоптіль – перший видозмінений лист. Оскільки живлення відбувається за рахунок накопичених запасів ендосперму, тому світлові умови на цей період практично не впливають. 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.

Метою дослідження є аналіз блоку розробленої моделі періоду розвитку зернових культур від посіву до сходів, який описує динаміку росту пагона, а також викладення отриманих результатів моделювання впливу агрометеорологічних умов на інтенсивність даного процесу, час появи сходів та чутливості моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. 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 мають Сполучені Штати Америки та Європейська Комісія. 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 [1, 2, 5, 6]. Такі моделі імітують ріст та розвиток рослин під впливом широкого ряду факторів навколишнього середовища.

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 [8, 9, 10, 11].

Моделі можуть враховувати широкий спектр факторів навколишнього середовища, що впливають на проростання, хоча існують і простіші моделі, які враховують вплив лише кількох факторів. Такі моделі є простішими у застосуванні, але часом поступаються у точності багатфакторним моделям. Однак не можна однозначно

визначити, які з них краще застосовувати на практиці, адже всі вони мають низку переваг та недоліків.

Як вхідну інформацію моделі зазвичай використовують параметри ґрунту (його вологість, температуру, водний потенціал тощо) та посівного матеріалу (масу та розмір, вологість, водний потенціал, проникність оболонки насіння тощо). Результатом розрахунків моделей є строки та повнота появи сходів.

Результати дослідження та їх аналіз.

Модель створена на основі існуючих моделей формування сходів [1, 4, 5, 7] з внесенням певних модифікацій.

На першому етапі моделі описується лише поглинання води насінням. З того моменту, коли рівень води зернівки досяг певного критичного значення (*crit 1*), починається також розрахунок швидкості гідролізу запасного білка, крохмалю, дихання зародка та ендосперму. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення (*crit 2*), починається ріст проростка (органу проростаючого насіння, який в свою чергу складається із зачатків корінця та пагона) і замість дихання зародка вже враховується дихання проростка. Надалі вологість насіння залишається незмінною, тому на цьому етапі припиняється її розрахунок. Визначається швидкість розподілу азоту і вуглецю та накопичення сухої маси осьовими органами. Для того, щоб відмітити момент появи сходів, паралельно обчислюється довжина пагона. Розрахунок припиняється, коли його довжина дорівнює глибині закладення насіння.

Речовини, які утворилися в результаті гідролізу, використовуються на дихання зародка та ендосперму. Слід зазначити, що зародок дихає значно інтенсивніше, ніж ендосперм (10% від інтенсивності дихання зародка) [3]. Коли вологість насіння досягла певного критичного значення, відбувається запуск ростових процесів у насінні. Починає розвиватися проросток, який складається з кореня та пагона (колеоптиля). Утворені в результаті гідролізу речовини, що залишилися після затрат на дихання, використовуються на накопичення сухої маси та подовження колеоптиля та зародкових коренів [7].

Динаміку накопичення сухої маси проростком можна описати таким чином:

$$\frac{dm_{sp(r)}}{dt} = \left(\gamma \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} + \eta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} \right) - \frac{dR_{sp(r)}}{dt}, \quad (1)$$

де $\frac{dm_{sp(r)}}{dt}$ – швидкість накопичення сухої маси пагоном (корнем); $\frac{dC(N)_{end}^{RES}}{dt}$ – швидкість гідролізу вуглецю (азоту); γ і η – коефіцієнти для перерахунку вуглецю та азоту в органічну речовину; $\frac{dR_{sp(r)}}{dt}$ – дихання пагона (кореня). На основі проведених лабораторних експериментів встановлено, що частка колеоптиля в проростку протягом періоду від початку росту осьових органів до появи сходів в середньому складає 40 %.

Пагін являє собою циліндр постійного радіуса. Швидкість подовження колеоптиля описана як функція накопичення його маси із врахуванням механічного опору ґрунту, що визначається щільністю ґрунту ρ_{soil} та його вологістю

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \exp\left(\frac{dm_{sp}}{dt} \frac{1}{\rho_{sp}}\right) \frac{1}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}), \quad (2)$$

де $\frac{dH_{sp}}{dt}$ – швидкість росту пагона в довжину; ρ_{sp} – питома щільність рослинної маси пагона; r_{sp} – радіус основи пагона; $k_{sp}(\rho_{soil})$ – функція впливу щільності ґрунту на

ріст пагона; $k_{sp}(W_{soil})$ – функція впливу вологості верхніх шарів ґрунту на подовження пагону.

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

Описана модель була реалізована на ПК за допомогою програми Microsoft Office Excel. З метою ідентифікації параметрів моделі була обрана кукурудза. Частина параметрів була отримана в результаті проведення експерименту з пророщування насіння кукурудзи у лабораторних умовах. Однак більшість параметрів були визначені шляхом проведення аналізу наявних у літературі даних, а також за допомогою оптимізації та ручної добірки.

На рисунку 1 представлені результати лабораторного експерименту, який описує вплив температури ґрунту на глибині закладення насіння на інтенсивність подовження колеоптиля насіння кукурудзи. Слід зазначити, що якщо температура протягом всього періоду становить 22 °С, то колеоптіль почне рости вже за 2 доби після висіву та досягне глибини закладення за 6 діб. Однак за температури 12°С ріст почнеться лише за тиждень, а сходи з'являться за 18 діб.

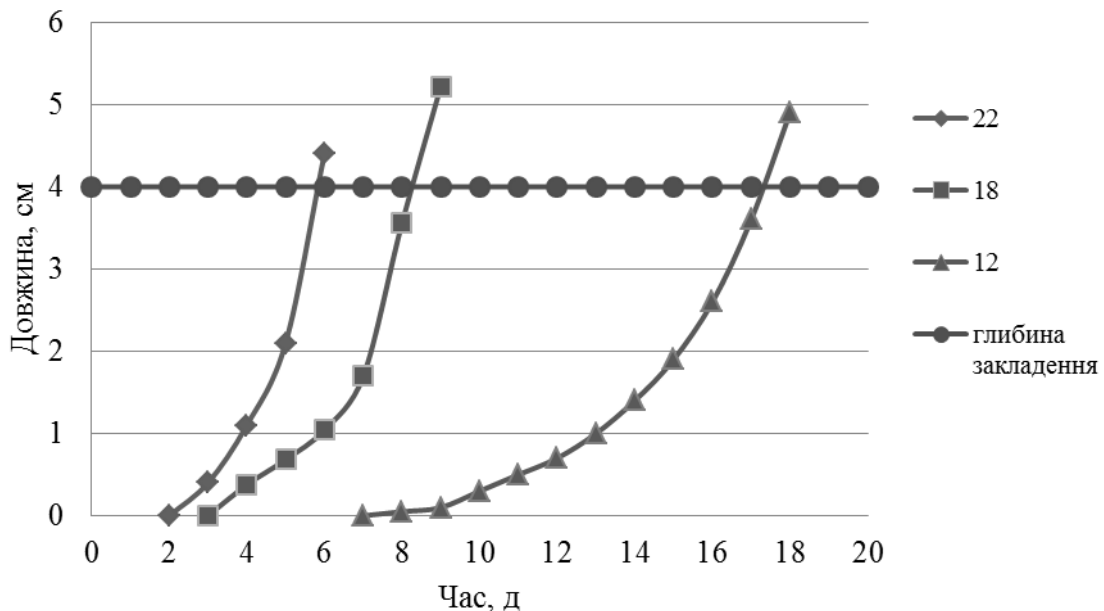


Рис. 1. – Вплив температури ґрунту (12 °С, 18 °С та 22 °С) на швидкість подовження пагона (результати лабораторного експерименту).

Визначено чутливість моделі до зміни параметрів навколишнього середовища. У якості кроку в часі обрано одну добу. Розглядався шар суглинкового ґрунту товщиною 5 см з найменшою вологоємністю 10 мм. Оптимальна вологість ґрунту становить 7 мм.

Оскільки температура відіграє одну з найголовніших ролей під час проростання та розвитку рослин, тому не викликає сумнівів необхідність першочергового проведення аналізу чутливості до зміни даного параметра. Отже, було проведено визначення чутливості моделі до зміни температури ґрунту на тлі оптимальної вологості ґрунту, а також збереження оптимальних параметрів моделі. Обрано діапазон температур ґрунту від 10 °С, оскільки це – біологічний нуль кукурудзи, при якому припиняється розвиток рослини, до 24 °С. Динаміка визначалася через 1 °С (рис.2).

Зниження інтенсивності подовження пагона зі зменшенням температури відбувається поступово. У випадку, коли глибина закладення насіння становить 4 см, а щільність ґрунту $1,2 \text{ г / см}^3$, то в межах найбільш сприятливої температури (21 – 24 °С) сходи з'являться за 6 діб, при температурі 19 та 20 °С – за 8 діб. Якщо впродовж всього періоду температура становила 17 – 18 °С, то появу сходів слід очікувати за 9 діб, при 16 °С – за 10 діб та при 15 °С – за 12 діб. Однак за рівня температури 14 °С та 13 °С, колеоптіль досягне поверхні лише за 14 та 16 діб відповідно, при 12 °С – за 20 діб. В ході експерименту встановлено, що якщо температура ґрунту менша за 12 °С, то пагін загине, так і не досягнувши земної поверхні.

Оскільки за умовну глибину закладення насіння обрано 4 см [4], тому довжина колеоптиля, 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.

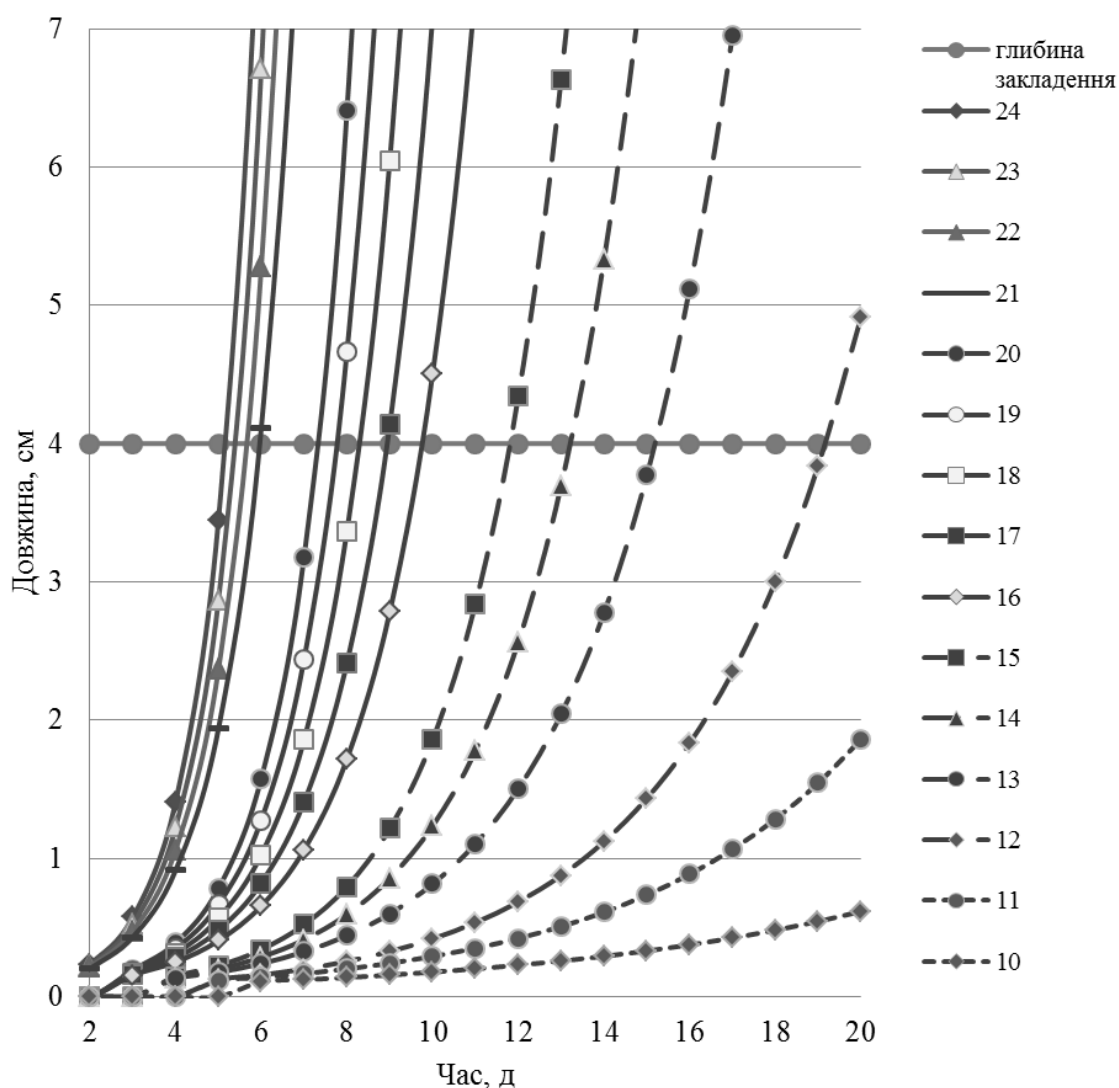


Рис. 2. – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни температури ґрунту (10 – 24 °С).

Було проведено аналіз чутливості моделі до зміни вологості ґрунту. Визначення проводилися в інтервалі від 1 до 10 мм, через 1 мм вологості на тлі оптимальної температури 22 °С та щільності ґрунту $1,2 \text{ г/см}^3$ (рис. 3). У випадку, коли вологість

грунту знаходиться у межах 6 – 10 мм, подовження колеоптиля 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 і при вологості 3 мм становить 9 діб. При вологості, нижчій за 3 мм, насіння не в змозі накопичити достатньо вологи для запуску ростових процесів, тому вологість ґрунту 1 – 2 мм не може впливати на подовження колеоптиля.

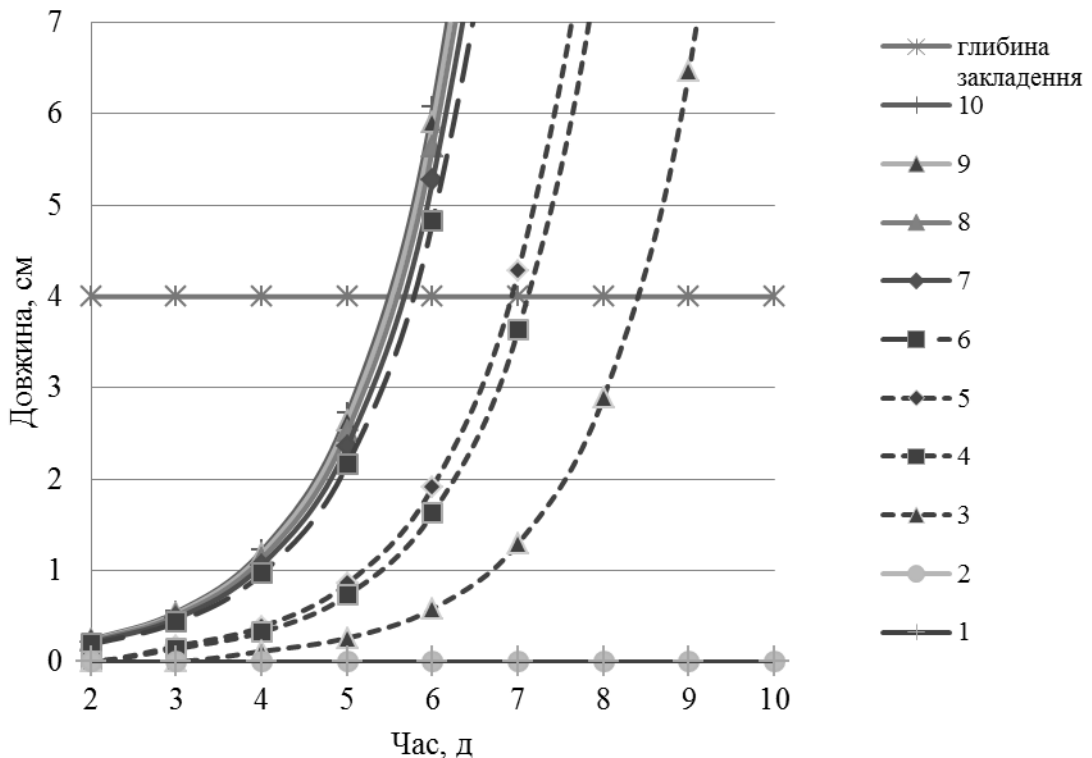


Рис. 3 – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни вологості ґрунту (1 – 10 мм).

Дослідження чутливості моделі до зміни щільності ґрунту було проведено в інтервалі 0,8 – 1,4 г/см³ через 0,1 г/см³ за умови оптимальної вологості та температури ґрунту (рис. 4). Щільність ґрунту сповільнює процес подовження пагона. Так, за найменшої щільності у 0,8 – 0,9 г/см³ сходи можуть з'явитися за 5 діб, 1,0 – 1,3 г/см³ – за 6 діб та щонайменше за тиждень у випадку щільності 1,4 г/см³ та більше.

Також було проведено аналіз чутливості до зміни початкових значень посівного матеріалу та внутрішніх параметрів моделі. В ході дослідження початкова вологість насіння змінювалася на 0,01 сухої маси в інтервалі від 0,11 до 0,2, оскільки зазвичай під час висіву вологість насіння становить близько 0,14 – 0,16 сухої маси насіння. Встановлено, що модель чутлива до зміни даного параметра, слід зазначити, що сухіше насіння буде рости швидше, однак, у кожному випадку сходи з'являються у межах однієї доби.

Модель чутлива також до зміни початкової маси насіння. Для дослідження була обрана маса однієї насінини у інтервалі від 0,23 г до 0,32 г, через 0,01 г. Оскільки насінини з більшою масою мають значніші запаси поживних речовин для підтримки та росту, тому подовження їх пагонів відбувається інтенсивніше. Так колеоптиль насінин з масою 0,27 – 0,29 г досягне поверхні вже за 6 діб, а з масою 0,23 – 0,26 г – лише за 7 діб. Однак, коли маса насінини перевищує 0,3 г, вона не здатна накопичити необхідну кількість вологи, тому подальший ріст не відбудеться.

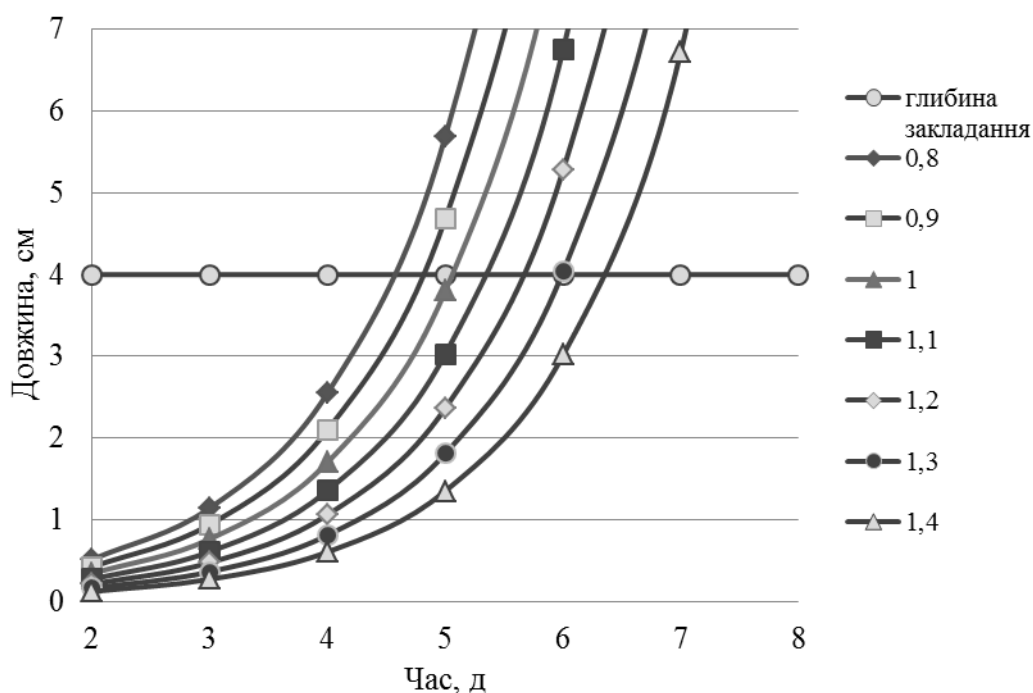


Рис. 4 – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г/см³).

У низці чисельних експериментів досліджувався вплив зміни агрометеорологічних умов на швидкість подовження колеоптиля.

За умови, що вологість становить 7 – 9 мм у шарі ґрунту 0 – 5 см, а температура протягом усього періоду зберігається на рівні 22 °С, проросток почне рости вже за 2 доби. У випадку недостатньої зволоженості цей період складатиме 3 доби. Зі зниженням температури початок росту затримується і може початися через 3 – 5 діб у межах оптимального зволоження ґрунту та через 7 діб при недостатньому.

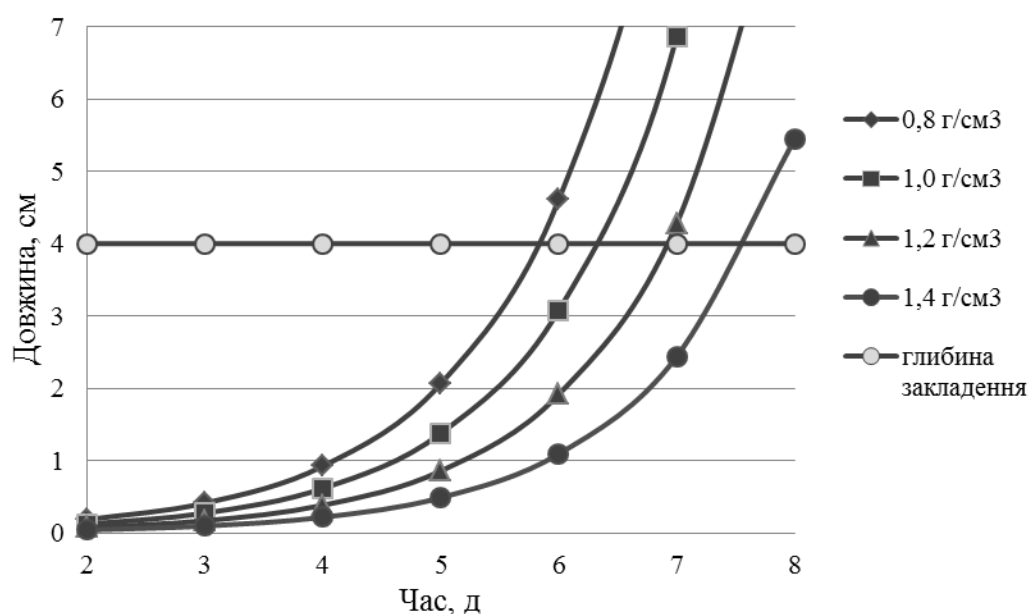


Рис. 5 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах оптимальної температури (22 °С) та недостатніх запасів вологи (5 мм).

Зниження запасів води у ґрунті на тлі оптимальної температури 22 °С призводить до затримання появи сходів (рис. 5). Так у випадку щільності ґрунту 0,8 г/см³ пагін досягне поверхні за 6 діб, 1 – 1,2 г/см³ – за 7 діб та за 8 діб, якщо щільність становить 1,4 г/см³.

Зниження температури ґрунту в поєднанні з недостатнім зволоженням значною мірою обмежує появу сходів, виникає загроза загибелі молодих рослин (рис. 6). Якщо щільність ґрунту більша за 1 г/см³, то запаси ендосперму будуть вичерпані ще до появи сходів, і колеоптиль так і не досягне поверхні. Однак, якщо запаси води оптимальні та перевищують оптимальні, то пагін досягне поверхні за 15 – 16 діб, коли щільність становить 0,8 – 1 г/см³ та 18 – 20 діб зі збільшенням щільності ґрунту (рис. 7).

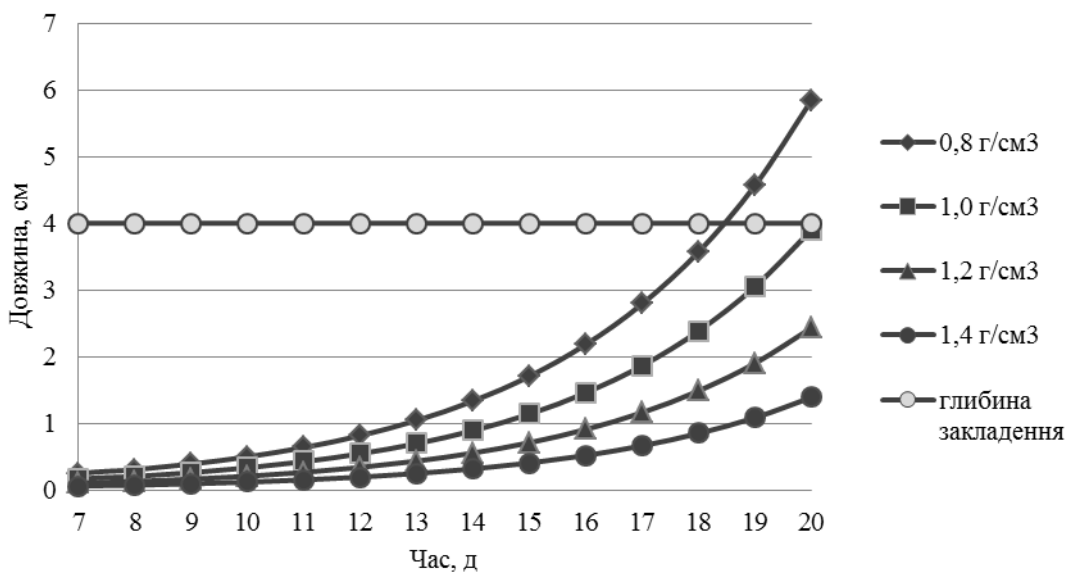


Рис. 6 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах зниженої температури (12 °С) та недостатніх запасів води (5 мм).

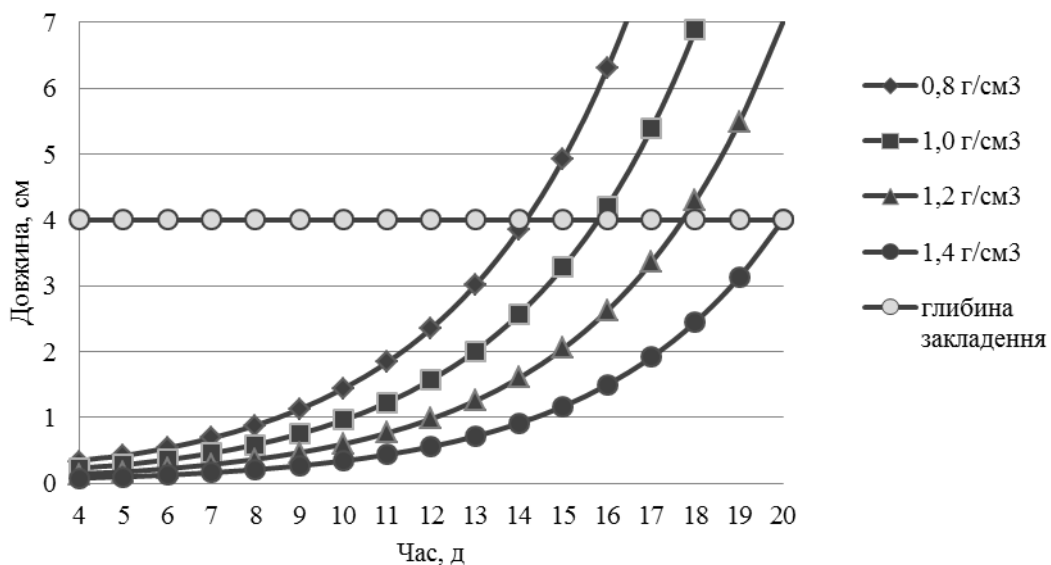


Рис. 7 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах зниженої температури (12 °С) та при запасах води 9 мм.

Висновки. Розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур, яка дозволяє визначити дату появи сходів, польову схожість, розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі. Розглянутий блок моделі описує ріст та динаміку подовження колеоптиля, а також появу сходів.

У чисельних експериментах встановлена висока чутливість швидкості подовження колеоптиля до температури ґрунту, а також до щільності ґрунту.

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.

В умовах збереження оптимального ґрунтового середовища, лімітуючим фактором для появи сходів є збільшення щільності ґрунту. Так, якщо при мінімальному значенні щільності $0,8 \text{ г/см}^3$ колеоптиль може досягти поверхні ґрунту вже на 5-у добу після посіву, то при щільності в $1,4 \text{ г/см}^3$ 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.

Список літератури

1. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. – К.: «АртЭк», 2002. – С.64.
2. Немченко О. А., Мусаменко Л. И. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза // Физиология и биохимия культурных растений. – 1982. – Т. 14, №5. С.439 – 445.
3. Носатовский А.И. Пшеница. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950. – 408 с.
4. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай»//Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. 8. – С. 28 – 36.
5. Польовий А.Н. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур // Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – №3. – С. 75 – 84.
6. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Тонаж А.Г. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 396 с.
7. Строганова М.А., Коровин А.И., Полевой А.Н. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов//Сельскохозяйственная биология. – 1983. - №1. – С. 126 – 135.
8. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence. David M. Alm et.al. Weed Technology, Vol. 7, No. 3 (Jul. - Sep., 1993), pp. 560-569.
9. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. P.K. Aggarwal et al. / Agricultural Systems 89 (2006), 1–25.
10. Modeling seedling emergence. F. Forcella et al. / Field Crops Research 67 (2000) 123-139.
11. 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 35 (2011) 103 – 114

Моделирование роста и развития колеоптиле зерновых культур в период «посев – всходы». Синицина В.В.

Рассматривается развитие и рост колеоптиле зерновых культур. Описаны особенности моделирования развития побега в период от посева до всходов. Представлены результаты проведенного моделирования влияния агрометеорологических условий на удлинение колеоптиле и время появления всходов.

Ключевые слова: семя, эндосперм, зародыш, колеоптиле, проросток, росток, рост, всходы.

Modeling of grain crops coleoptile growth and development during the period from sowing to emergence. Sinitsyna V.

Review of existing grain crop grow models of period from sowing to germination and the algorithm of developed dynamic model that describes the physiological and biochemical processes occurring in seeds during the period are discussed. The structure and the scheme of the model were described in details.

Keywords: seed, endosperm, embryo, coleoptile, seedling, sprout, growth, emergence.