

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОСЕВА ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ УРОЖАЯ

Мельник В.И., д.т.н.,

Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Мохамед, аспирант

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко*

Предлагаемая трехмерная математическая модель посева пропашных культур позволяет получать объемные координаты положения семян под слоем почвы и, благодаря этому, моделировать максимально возможную степень реализации биопотенциала растений в зависимости от параметров и показателей качества семян, а также процесса высева и заделки их под слоем почвы.

Актуальность. Формирование агротребований к показателям качества выполнения полевых технологических операций – весьма сложный вопрос. С одной стороны, чем выше качество работ, тем лучше результат, а с другой – всегда есть некоторый предел, после достижения которого прирост качества осуществления технологических операций не будет окупаться взаимосвязанным ростом качества и количества урожая. Ситуация на рынке сейчас меняется с каждым днем, подобно природно-климатическим условиям, и поэтому жестко сформулировать такие агротребования не представляется возможным. В этой связи, существовавшие в СССР и применяющиеся на уровне закона агротребования постепенно утратили свою актуальность [1].

В качестве альтернативы Ковтун Ю.И. предложил сформулировать, и затем использовать, агроусловия (в оригинале, на украинском языке «агроумови») [1]. В соответствии с названием, акцент переносился с формулировки требований к показателям качества работы на требования к условиям, в которых должна быть способной работать сельскохозяйственная техника. Что касается показателей качества результатов работы, то тут вопрос становился открытым, т.е. «чем выше, тем лучше». В итоге проблема поиска экономически обоснованного предела увеличения показателей качества выполняемых работ свою актуальность не утратила.

Кроме того, Ковтун Ю.И. показал, что ущерб урожаю от снижения качества выполняемых полевых работ зависит от того, какие это работы. Он ранжировал их по значимости и ввел понятие коэффициента реализации биопотенциала η (КРБП) [2]. Это мультипликативный [3] по своей природе показатель

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i, \quad \eta_i \in [0,1], \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (1)$$

который в идеале может достичь единицы.

Эффективность применения КРБП позволяет, во-первых, освободиться от необходимости оперировать абсолютными цифрами урожая, который, как известно, может зависеть от многих, не подвластных человеку, факторов, а, во-вторых, показать, что если на одной операции потерял часть урожая, то в дальнейшем уже не догонишь. Посев – ключевая операция, а, значит, и ресурсы должны быть направлены в первую на нее. Известно ведь: «не посеешь – не пожнешь».

Постановка проблемы. С учетом приведенного, возникает потребность в разработке математической модели посева (ММП), которая помогла бы помочь проследить и проанализировать цепочку взаимосвязей: качество посевного материала, параметры и качество посева, КРБП.

Анализ последних исследований. В предыдущих работах автора [4, 5] предложена плоская ММП пропашных культур, основанная на применении метода Монте-Карло.

В соответствии с ней, в декартовой системе координат $Oxuz$, проекция траектории рядка посева на горизонтальную плоскость представлена в виде трех гармоник:

$$y(x) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 A_k^{(y)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_k^{(y)}} x + \phi_k^{(y)}\right) + y_0, \quad (2)$$

где $A_k^{(y)}$, $L_k^{(y)}$ и $\phi_k^{(y)}$ – амплитуда, длина волны и начальная фаза k -той ($k = 1, 2, 3$) гармоники;

x – текущее значение абсциссы;

y_0 – константа, которая необходима для смещения кривой $y(x)$ оси рядка в положительную область. Первая гармоника принадлежит колебаниям трактора, вторая – колебаниям сеялки, а третья – горизонтальным колебаниям сошников.

Выражение (2) моделирует отклонение линии сошника по горизонтали, т.е. в направлении оси Oy . Именно этим объясняется появление соответствующего верхнего индекса «(y)».

Описанная ММП [5] позволяет получить координаты (x_i, y_i) высеянных и давших всходы семян, где номер i -того (текущего) семени (растения) определяется рядом

$$i = 1, 2, \dots, N_r, \quad N_r = \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_s} n_{ij}, \quad (3)$$

где: N_r – общее количество давших всходы семян;

n_p – количество моделируемых проходов сеялки (как минимум $n_p = 2$, т.е. прямой и обратный проход);

n_s – количество сошников сеялки, которое определяется ее конструкцией;
 n_{ij} – количество давших всходы семян, приходящихся на учетный участок, i -того прохода и j -того сошника.

Кроме трех гармоник, описанная ММП учитывает заданную величину идеальной дистанции между растениями (a), продольное перемещение семян (τ_i) относительно меток идеального высева, горизонтальный рассев семян (r_i) относительно линии хода сошника, вероятность высева P_1 , вероятность высева двойников P_2 и вероятность появления всходов (всхожесть) семян P_3 .

Моделирование вероятностного характера глубины заделки семян (h_i), описанная ММП [5] не предполагает. Кроме того, она не имеет никаких механизмов моделирования связей между перечисленными параметрами и КРБП каждого из реализовавшихся растений.

В работе [6], наоборот, имеются графические данные по взаимосвязи между глубиной заделки семян и КРБП, но нет никаких моделей, которые могли бы связать вероятностный характер глубины заделки семян с результирующим КРБП посева в целом.

Целью настоящих исследований является разработка трехмерной версии ММП пропашных культур, которая позволяла бы связать между собой все перечисленные выше параметры с КРБП каждого реализовавшегося растения в отдельности и посева в целом.

Решение поставленной задачи. Чтобы смоделировать вероятностный характер распределения семян пропашных культур по глубине, предлагается дополнить уже упоминавшуюся выше ММП выражением для расчета третьей координаты z линии хода сошника:

$$z(x) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 A_k^{(z)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_k^{(z)}} x + \phi_k^{(z)}\right) + z_0, \quad (4)$$

где $A_k^{(z)}$, $L_k^{(z)}$ и $\phi_k^{(z)}$ – амплитуда, длина волны и начальная фаза k -той ($k = 1, 2, 3$) гармоники;

x – текущее значение абсциссы;

z_0 – константа, которая обозначает заданную величину глубины хода сошника. Все гармоники представляют колебания в продольно-вертикальной плоскости Oxy . Как ранее, первая гармоника принадлежит колебаниям трактора, вторая – колебаниям сеялки, а третья – вертикальным колебаниям сошников. Все эти гармоники, в основном, обусловлены неровностями поверхности поля.

Разумеется, отклонение глубины заделки семян от заданного значения z_0 обуславливается не только неравномерностью глубины хода сошника. Есть еще случайная составляющая h_i отклонения каждого i -того семени от линии хода сошника. Такую составляющую моделируют применением генератора

нормально распределенных псевдослучайных чисел (ПСЧ), как это сделано в работе [5]. Чтобы получить h_i , соответствующее заданному отличному от единицы среднеквадратическому отклонению σ_h следует воспользоваться формулой:

$$h_i = \sigma_h \Delta_i, \quad (5)$$

где Δ_i – нормально распределенное ПСЧ, рассчитанное для нулевого математического ожидания и единичной дисперсии. Правила работы генераторов нормально распределенных ПСЧ описывать не будем, а отошлем к работам [5, 7, 8].

С учетом выражений (4) и (5) результирующее положение i -того семени по глубине заделки определяется выражением

$$z_i(x_i) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 A_k^{(z)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_k^{(z)}} x_i + \phi_k^{(z)}\right) + z_0 + \sigma_h \Delta_i. \quad (6)$$

Теперь можно воспользовавшись описанной выше методикой и, применив выражение (6), сгенерировать множество из N_r чисел глубины заделки, давших всходы семян. Но, прежде изучим распределение по глубине, давших всходы семян подсолнечника, на опытном поле (посев 2012-го года) Учебно-научного института механотроники и систем менеджмента (УНИ МСМ) Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенка (ХНТУСГ).

Из-за специфики сложившихся хозяйственных условий посев выполнялся на запущенных, плохо выровненных полях, и старой, не поддающейся наладке, сеялкой СУПН-6А в агрегате с трактором МТЗ-80.

Глубину заделки семени z_i определяли по истечении первой недели, после появления всходов, измерением длины этилированной части растений.

Результаты статистической обработки полученных данных представлены на гистограмме (рис. 1): $\bar{z} = 50,36$ мм – математическое ожидание глубины заделки давших всходы семян; $\sigma_z = 12,27$ – результирующее среднеквадратическое отклонение; $\omega^2 = 1,68$ – критерий фон-Мизеса [9], рассчитанной для проверки согласия экспериментального распределения с нормальным законом при доверительной вероятности 0,90. Из рис. 1, с учетом значения критерия $\omega^2 = 1,68$, следует, что фактическое распределение является нормальным. Заметим, что σ_z по своей сути не совпадает со среднеквадратическим отклонением σ_h , поскольку, первое относится к распределению глубин заделки давших всходы семян, а второе, к отклонению семян по глубина от линии хода сошника, а та, в свою очередь совершает колебания в соответствии с законом (4).

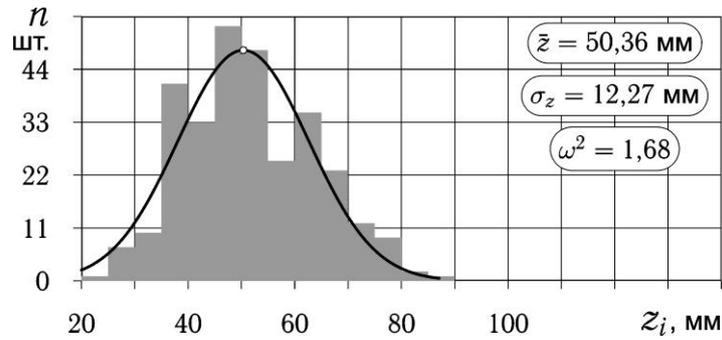


Рис. 1 – Распределение глубин заделки z_i давших всходы семян подсолнечника

Для исследования причин, по которым фактическое распределение по глубине давших всходы семян подчиняется нормальному закону, использовали описанную выше ММП.

В первом случае (рис. 2А) последовательность z_1, z_2, \dots, z_{N_r} сгенерировали при условии идеального распределения семян вдоль оси рядка с интервалом $a = 250$ мм и вертикальных колебаниях хода сошников $z = z(x)$, состоящих только из одной гармоники (6), с амплитудой $A_1^{(z)} = 1$ см, длиной волны $L_1^{(z)} = 4$ м и переменной начальной фазой $\phi_1^{(z)} \in [0, \pi]$, которая изменялась и назначалась отдельно для каждого рядка и прохода сеялки псевдослучайным образом.

Как видим полученное распределение, во-первых, не соответствует экспериментальному, а, во-вторых, не подчинено нормальному закону.

Диаметрально противоположные выводы следуют из анализа второго случая (рис. 2В), когда в ММП задействовали:

А) расчет параметров трех гармоник горизонтальных колебаний линии движения сошника –

$$A_1^{(y)} = 800R_{A1}^{(y)}, \quad A_2^{(y)} = 100R_{A2}^{(y)}, \quad A_3^{(y)} = 10 + 50R_{A3}^{(y)}, \quad (\text{мм}) \quad (7)$$

$$L_1^{(y)} = 10^4(10 + 15R_{L1}^{(y)}), \quad L_2^{(y)} = 10^3(17 + 13R_{L2}^{(y)}), \quad L_3^{(y)} = 10^3(4 + 8R_{L3}^{(y)}), \quad (\text{мм}) \quad (8)$$

$$\phi_k^{(y)} = 2\pi R_{\phi k}^{(y)}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (\text{рад.}) \quad (9)$$

где $R_{jk}^{(y)} \in [0, 1]$, $(j = 1, 2, 3)$, $(k = 1, 2, 3)$ – равномерно распределенные ПСЧ из независимых последовательностей;

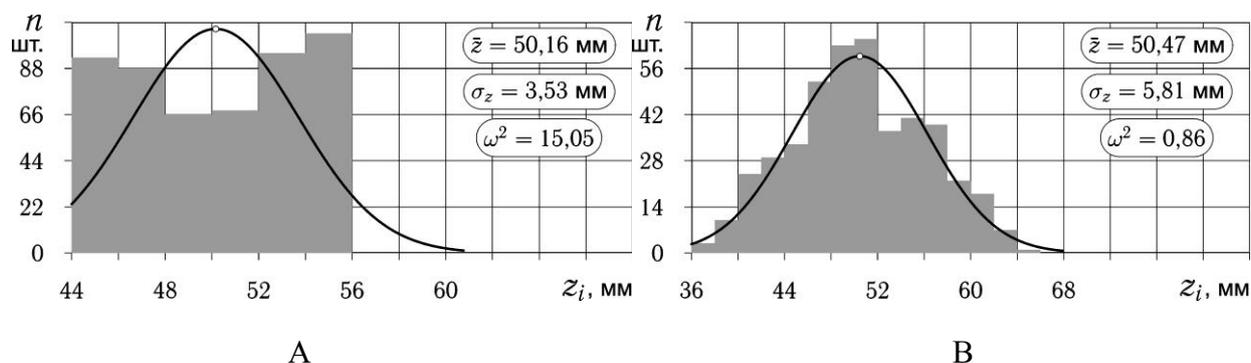


Рис. 2 – Распределения глубин заделки z_i давших всходы семян, полученные методом математического моделирования: А – идеализированный вариант; В – псевдореалистичный вариант

Б) расчет параметров трех гармоник вертикальных колебаний линии движения сошника –

$$A_1^{(z)} = 7(1 + R_{A1}^{(z)}), \quad A_2^{(z)} = 5(1 + R_{A2}^{(z)}), \quad A_3^{(z)} = 2(1 + R_{A3}^{(z)}), \quad (\text{мм}) \quad (10)$$

$$L_1^{(z)} = 10^3(4 + 10R_{L1}^{(z)}), \quad L_2^{(z)} = 10^3(4 + 5R_{L2}^{(z)}), \quad L_3^{(z)} = 10^3(4 + 2R_{L3}^{(z)}), \quad (\text{мм}) \quad (11)$$

$$\phi_k^{(z)} = \pi R_{\phi k}^{(z)}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (\text{рад.}) \quad (12)$$

где $R_{jk}^{(z)} \in [0, 1]$, $(j = 1, 2, 3)$, $(k = 1, 2, 3)$ – равномерно распределенные ПСЧ из независимых последовательностей;

В) вероятности $P_1 = 0,8$, $P_1 = 0,2$ и $P_1 = 0,9$ – высева, появления двойника и появления всхода, соответственно;

Г) параметры распределения растений вдоль и поперек оси ряда, измеряемые вдоль оси Ox расстояние между метками идеального высева (МИВ) $a = 250$ мм и среднеквадратическое отклонение растений относительно МИВ $\sigma_x = 40$ мм; измеряемые вдоль осей Oy и Oz среднеквадратические отклонения растений относительно оси ряда σ_y и σ_z равные 5 и 2 мм, соответственно.

Из сравнения рис. 1 и 2В видно, что фактическое и полученное с помощью ММП распределения растений по глубине качественно совпадают, а, значит, ничего не мешает оптимизировать параметры ММП, исходя из условия минимизации параметрических различий между ними. Поскольку адекватность ММП и реального посева доказана, то далее остановимся на изучении влияния отдельных параметров посева на результирующее значение КРБП.

Сначала представим имеющиеся в работе [6], графические данные по взаимосвязи между глубиной заделки семян (z) и КРБП (η) в аналитическом виде (табл. 1). Для этого определим координаты точек на рисунках [6] и, воспользовавшись методом наименьших квадратов [10], подберем функции, которые аппроксимирует их наилучшим образом.

Таблица 1 – Аналитические выражения, аппроксимирующие экспериментальные данные по влиянию глубины заделки семян на реализацию КРБП

Культура	Рис.	Аналитическое выражение		
		Значения коэффициентов	Представление	№
1 Кукуруза на зерно	3А	$C_0 = 0,75937863609E+00;$ $C_1 = 0,10346210985E-01;$ $C_2 = -0,15874491940E-02;$ $C_3 = 0,12529176109E+00$	$\eta = C_0 z^{(C_1 z + C_2 z^2)} + C_3 \ln z$	(13)
2 Подсолнечник	3В	$C_0 = 0,83369245114E+00;$ $C_1 = 0,78884973400E+00;$ $C_2 = 0,46709454396E+00;$ $C_3 = -0,37296560934E-02$	$\eta = C_0 [\ln(z + C_1)]^{C_2} + C_3 z^2$	(14)
3 Сахарная свекла	3С	$C_0 = 0,13194561428E+01;$ $C_1 = 0,29423254199E-01;$ $C_2 = 0,51927334591E+01;$ $C_3 = -0.32454350912E-01$	$\eta = \sqrt{C_0 - C_1(z - C_2)^2} + C_3 z$	(15)

Приведенные на рис. 3 графики построены с использованием приведенных в табл. 1 функций (13), (14) и (15). При этом предполагается, что температурно-влажностные условия, которые сложились в почве в интервале выделенных глубин (застрихованные участки) на момент посева соответствуют оптимальным. Если по факту оптимальные для прорастания семян условия складываются на другой глубине, то в выражения (13), (14) и (15) следует внести соответствующие поправки, которые приведут к адекватным смещениям графиков:

$$\eta = \eta(z + \Delta z_0), \quad (16)$$

где
$$\Delta z_0 = z_0 - z_{opt}, \quad (17)$$

– смещение оптимальной глубины заделки семян z_{opt} в конкретных условиях, относительно величины z_0 при которой выражения (13), (14) и (15) дают максимум, т.е. когда $\eta(z)|_{z=z_0} = 1$. Если в реальности оптимальная величина заделки семян z_{opt} меньше z_0 , то Δz_0 получается положительной, а в противном случае, наоборот – отрицательной.

Выражения (13), (14) и (15) реализуют взаимосвязь между величиной КРБП и глубиной заделки давшего всходы растения вида $\eta = \eta(z)$. В свою очередь, описанная выше ММП, позволяет получить $z \in \{z_1, z_2, \dots, z_{N_r}\}$ для каждого из N_r растений учетного участка. Следовательно, в конечном итоге получена возможность вычислять КРБП для каждого отдельного растения

$\eta_i = \eta(z_i)$, и в итоге, получать статистический ряд $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_r}\}$ и подвергать его анализу. Все входные параметры ММП, которые используются для вычисления $\{z_1, z_2, \dots, z_{N_r}\}$ теперь являются входными параметрами для вычисления $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_r}\}$, а, значит, теперь возможно проследить взаимосвязь любого параметра ММП или их комбинаций с величиной КРБП посева в целом.

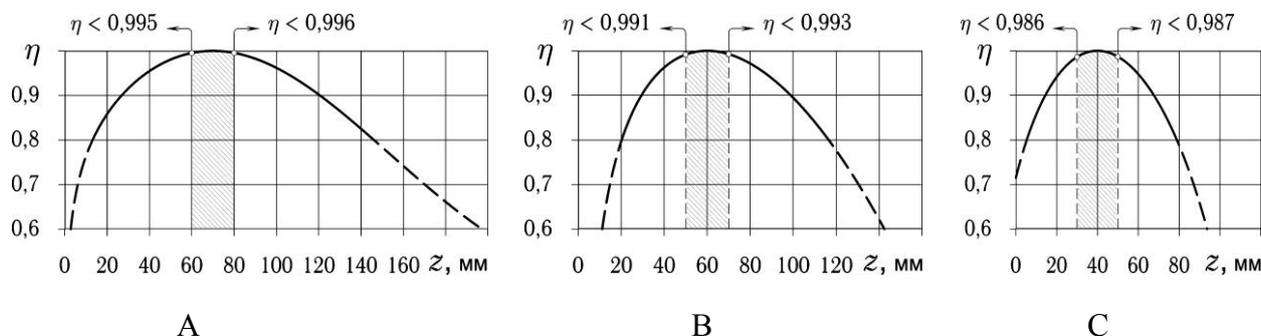


Рис. 3 – Зависимость величины η коэффициента реализации биопотенциала (КРБП) от глубины заделки семян z : А – кукурузы на зерно; В – подсолнечника; С – сахарной свеклы

В частности, возникает вопрос, как влияет характер вертикальных колебаний сошника на КРБП высеваемых растений. Ответ на него дает рис. 4, который построен для идеализированного случая, когда линия рядка изгибается только в вертикальной плоскости, и представляет собой синусоиду с переменными параметрами: $A_1^{(z)} \in [0, 40]$ мм, $L_1^{(z)} \in [1, 11]$ м и $\phi_1^{(z)} \in [0, \pi]$. Распределение семян вдоль рядка, а также их всхожесть – идеальны. Расстояние между метками идеального посева $a = 200$ мм. Случайных отклонений семян относительно линии хода сошника также не имеется.

Из рис. 4 видно, что на величине КРБП сказывается только амплитуда колебаний сошника, и никак не сказывается длина волны этих колебаний. Если принять во внимание анализ рис. 1 и 2, то можно сделать вывод, что вовлечение в использование иных параметров ММП приведет к снижению КРБП посева в целом. Такие же выводы можно сделать и в отношении подсолнечника и сахарной свеклы. В последнем случае снижение величины КРБП с ростом амплитуды вертикальных колебаний сошников будет более значительным. Это непосредственно следует из сравнения рис. 3А, 3В, 3С.

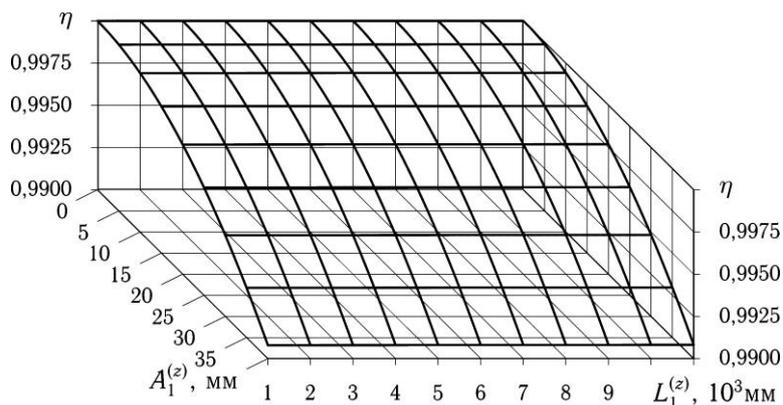


Рис. 4 – Влияние амплитуды $A_1^{(z)}$ и длины волны $L_1^{(z)}$ вертикальных синусоидальных колебаний сошника сеялки на результирующий КРБП η посева кукурузы

Выводы

1. Полученные аналитические выражения взаимосвязи между величиной КРБП и глубиной заделки семян кукурузы на зерно, подсолнечника и сахарной свеклы имеют широкое применение и, в частности, могут быть использованы другими авторами в своих моделях.

2. Разработанная математическая модель посева теперь получила развитие и, во-первых, позволяет вычислять множество трехмерных координат давших всходы семян учетного участка, а, во-вторых, множество значений КРБП для каждого из растений в зависимости от глубины его произрастания.

3. Метод псевдослучайного моделирования (Монте-Карло), который положен в основу предлагаемой математической модели, весьма эффективен с позиции дальнейшего усовершенствования модели, т.к. вовлечение в модель новых факторов не предполагает ее кардинальной переделки.

4. С точки зрения равномерности глубины заделки семян в процессе посева и ее влияния на реализацию биопотенциала решающее значение имеет амплитуда и количество гармоник вертикальных колебаний сошника и вовсе не имеет значения длина волны этих гармоник.

Список использованных источников

1. Ковтун Ю. І. Агровимоги чи агрооснови створення і застосування сільгоспмашин / Ю. І. Ковтун, О. А. Маковецький // Механізація сільськогосподарського виробництва: вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – Вип. 21. – С. 502 – 505.
2. Мазоренко Д. І. Проблема термінології механізованого землеробства / Д. І. Мазоренко, Ю. І. Ковтун, В. І. Пастухов // Механізація сільськогосподарського виробництва: вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2008. – Вип. 75. Т. 1. – С. 5 – 15.
3. Нагірний Ю. П. Обґрунтування інженерних рішень: Навчальний посібник / Ю. П. Нагірний. – К: Урожай, 1994. – 216 с.

4. Мельник В. И. Математическое моделирование посева пропашных культур / В. И. Мельник, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Моххамед // Бюллетень научных работ. Выпуск 31 / Белгород: Издательство БелГСХА им. В.Я.Горина, 2012. – С. 182 – 192.
5. Мельник В. И. Проверка адекватности разработанной математической модели посева пропашных культур / В. И. Мельник, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Моххамед, С. А. Никитенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету [Електронний ресурс]. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – Вип. 2, Т. 3. – С. 95-100. – Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/nvtduu>.
6. Пастухов В. І. Обґрунтування оптимальних комплексів машин для механізації польових робіт: Дис... д-ра техн. наук: 05.05.11 / Харків: ХНТУСГ ім Петра Василенка, 2006. – 419 с.
7. Мельник В. И. Внутрипочвенное внесение жидкостей в растениеводстве: [монография] / В. И. Мельник. – Харьков: Міськдрук, 2010. – 439 с.
8. Мельник В. И. Распределение жидкостей под слоем почвы: [монография] / В. И. Мельник. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 441 с.
9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь . – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
10. Горяинов В. Б. Математическая статистика: Учеб. для вузов / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова, О. И. Тескин; Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с.
11. Баврин И. И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник / И. И. Баврин. – М.: Высшая школа, 2005. – 160 с.

Анотація

ЗАСТОСУВАННЯ ТРИВИМІРНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОСІВУ ПРОСАПНИХ КУЛЬТУР ДЛЯ ОЦІНКИ ВТРАТ УРОЖАЮ

Мельник В.І., Аль-Фтіххат Моусаб Абдулвахід Моххамед

Запропонована тривимірна математична модель посіву просапних культур дозволяє отримувати об'ємні координати розташування насіння під шаром ґрунту і через них моделювати максимально можливу міру реалізації біопотенціалу рослин залежно від параметрів і показників якості насіння, а також процесу висіву та заробки їх під шаром ґрунту.

Abstract

THE APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL ROW CROP PLANTING TO ASSESS CROP LOSS

V. Melnik, Al Ftihhat Mousab Abdulwahid Mohamed

The proposed three-dimensional mathematical model of planting row crops can produce bulk coordinates of the seed below the soil surface and, thereby, to simulate the maximum possible extent to biopotential of plants, depending on the condition and quality of seeds, as well as the process of seeding and burying them under a layer of soil.