



Браженко С. А.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННОГО ОРГАНА ДЛЯ МЕЖДУРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ

Статья посвящена теоретическим исследованиям зависимости перемещения частиц почвы под действием ротационного органа предложенной конструкции. Определены конструктивно-технологические факторы, влияющие на степень распыления почвы и выведены соответствующие графоаналитические зависимости. Проведена экспериментальная проверка теоретических обоснований. На основе опытных данных оптимизированы параметры усовершенствованного рабочего органа в соответствии с обеспечением качества междурядной обработки.

Ключевые слова: ротационный орган, распыление почвы, угол наклона оси ротора, угловая скорость, оптимизация параметров

1. Введение

Целесообразность применения ротационных почвообрабатывающих машин приводного действия является предметом дискуссий ученых на протяжении последних 60...80 лет. При этом опыт отечественных и зарубежных производителей продукции растениеводства подтверждает эффективность их применения, обусловленную повышением качества обработки почвы.

Одним из основных камней преткновения на пути широкого применения активных ротационных машин является возможность роста количества эрозионно-опасных частиц почвы в корнеобитаемом слое почвы, что негативно влияет на сохранение его плодородия и влаги.

2. Постановка вопроса

Известно, что применение тяговых рабочих органов также приводит к высокому содержанию эрозионно-опасных частиц при недостаточно равномерной обработке почвы. Возникающая при их работе значительная боковая деформация не позволяет повысить скорость и степень механизации технологического процесса междурядной обработки.

Для междурядной обработки применяются ротационные орудия с горизонтальной осью вращения пассивного и приводного действия. Их существенными недостатками является высокая степень распыления почвенных частиц и отбрасывание их на расстояние превышающее ширину обрабатываемой зоны. Это явление приводит к чрезмерному иссушению почвы и к повреждению культурных растений. Применение в данном случае защитных кожухов и щитков, как например, на пропашном культиваторе КФ-5,4, только усугубляет проблему роста содержания эрозионно-опасных частиц в поверхностном слое почвы. Это объясняется дополнительным измельчением почвенных агрегатов при соударении с поверхностями защитных элементов конструкции.

Для снижения негативного действия описанных явлений, эффективным является применение орудий с вертикальной осью вращения. Такая конструкция

позволяет избежать выноса на поверхность нижних слоев почвы содержащих основную часть влаги, доступную для растений в начальный период роста, а также препятствует увеличению содержания эрозионно-опасных частиц.

К сожалению, рабочие органы с вертикальной осью вращения беспроводного действия не могут удовлетворять основные требования качества, предъявляемые к междурядной обработке, а именно: эффективное уничтожение и мульчирование сорняков; равномерность рыхления почвы по всему обрабатываемому слою; выровненный профиль обработанной поверхности; исключение скольжения и буксования рабочего органа.

Для удовлетворения требований к качеству междурядной обработки разработан активный рабочий орган с вертикальной осью вращения, технические решения которого признаны изобретениями [1, 2].

Для обоснования его рациональных параметров, с точки зрения обеспечения равномерного рыхления почвы без чрезмерного ее распыления, было решено провести теоретические и экспериментальные исследования влияния конструктивно-технологических параметров на характер перемещения частиц почвы под действием ротационного органа предложенной конструкции.

3. Анализ публикаций и исследований данного направления

Основательные исследования перемещения твердой частицы под действием центробежных сил ротационных орудий, на примере рассеивания минеральных удобрений проведены учеными П. М. Заикиной и В. В. Адамчуком [3, 4]. В их развитие были выполнены исследования В. С. Ловейкиным, Ю. В. Човнюком, А. И. Дитюком, где описан характер схождения твердой частицы минеральных удобрений с лопатки диска, с учетом влияния внешних факторов [5].

Известны результаты экспериментальных исследований К. В. Замойской по применению роторного рыхлителя почвы с горизонтальной осью вращения для предпосевной обработки. Была установлена зависимость

степени крошения почвы от ряда конструктивно-технологических параметров рыхлителя [6].

Вопросами изучения перемещения частицы почвы под действием вертикально-ротационных плугов занимались В. И. Ветохин, И. М. Панов, В. А. Шимонин, В. А. Юзбашев [7]. Ими исследовался процесс основной обработки и оптимизационным параметром принимался показатель максимального крошения пласта почвы.

Учитывая известные результаты теоретических и экспериментальных исследований движения твердой частицы под действием различных ротационных орудий, характер перемещения частицы почвы вертикальным ротором и его взаимосвязь с показателями качества при междурядной обработке остается еще недостаточно изученным.

Целью статьи является теоретическое исследование характера перемещения почвы в зависимости от основных конструктивно-технологических параметров рабочего органа предложенной конструкции для обеспечения минимального негативного воздействия на фракционный состав почвы, с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов.

Методы и средства исследований. Теоретические исследования проводились с применением методов кинематического анализа и последующим построением графоаналитических зависимостей. Для экспериментальной проверки результатов теоретических исследований использовались стандартные методики испытаний, методы статистической обработки и регрессионного анализа опытных данных.

4. Изложение основного материала исследований

Исходя из условий задачи — минимализации распыления почвы, пренебрегаем сопротивлением воздуха и рассматриваем экстремальные значения перемещения частицы почвы под действием ротационного органа.

Отбрасывание частицы происходит при выходе рабочего элемента из почвы по определенному закону, которые описывают характер ее перемещения. Рассмотрим движение частицы в трехмерной системе координат при входе из почвы, например, в точке *A* (рис. 1).

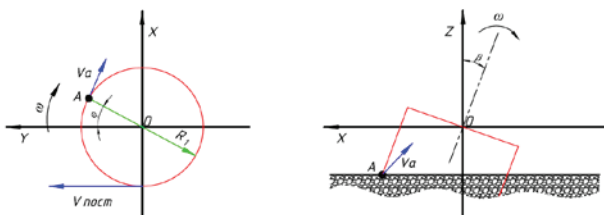


Рис. 1. Схема перемещения частицы почвы под действием ротационного органа

Закон изменения скорости частицы описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} V_x = R_1 \omega \sin \varphi; \\ V_y = R_1 \left(\frac{\omega}{\lambda} - \omega \cos \omega t \cos \beta \right); \\ V_z = R_1 \omega \cos \varphi \sin \beta - gt. \end{cases} \quad (1)$$

где R_1 — радиус внешнего диска ротора, мм; ω — угловая скорость ротора, c^{-1} ; φ — угол поворота точки ротора, град; λ — кинематический режим работы ротора; β — угол наклона оси ротора к вертикали, град; t — время движения частицы, с; g — гравитационная постоянная, $9,8 \text{ м/с}^2$.

Известно, что движение частицы вдоль оси Ox и Oz происходит одновременно, тогда при равнозамедленном движении вдоль оси Oz , время движения частицы описывается уравнением:

$$t = \frac{2R_1 \omega |\cos \varphi| \sin \beta}{g}. \quad (2)$$

С учетом условий работы ротационного органа, рассмотрим перемещение частицы почвы по оси Ox . Так как, согласно схеме (рис. 1), ряд культурных растений расположен вдоль оси Oy , то отбрасывание почвы имеет значение с точки зрения ее распыления и потенциального присыпания растений. То есть, значение перемещения частицы почвы будет косвенно влиять и на выбор защитной (необрабатываемой) зоны междурядья. После определенных преобразований уравнение перемещения частицы почвы вдоль оси Ox запишется:

$$l_x = \frac{R_1^2 \omega^2 2 \sin \varphi |\cos \varphi| \sin \beta}{g}. \quad (3)$$

Если выразить угловую скорость через частоту вращения ($\omega = 2\pi n$), уравнение (3) примет вид:

$$l_x = \frac{R_1^2 4\pi^2 n^2 \sin \varphi |\cos \varphi| \sin \beta}{g}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что на характер перемещения частицы почвы, а значит и качество обработки, влияют переменные величины угла наклона оси ротора к вертикали и частоты его вращения. Поэтому рассмотрим функцию двух переменных $l_x = l_x(n; \beta)$, определим прирост $\left(\frac{\Delta l_x}{l_x}\right)$ в зависимости от изменения переменных — Δn и $\Delta \beta$ и проанализируем их значения.

Продифференцировав определенные значения функции и проведя математические преобразования, получим следующую зависимость:

$$\frac{\Delta l_x}{l_x} = \frac{2\Delta n}{n}. \quad (5)$$

Исходя из обоснованного соотношения угловой и поступательной скорости, обеспечивающего равномерную обработку [8], имеем диапазон изменения частоты вращения — $n = 4 - 5 c^{-1}$. Подставив значения в уравнения (5), получим, что при изменении частоты вращения на $1 c^{-1}$ прирост исследуемой функции составит 40...50 %.

Аналогично рассмотрим прирост функции в зависимости от изменения угла наклона оси ротора к вертикали и получим зависимость:

$$\frac{\Delta l_x}{l_x} = \Delta \beta \operatorname{ctg} \beta. \quad (6)$$

При этом, конструктивно-обоснованным диапазоном изменения угла наклона оси ротора к вертикали является $\beta = 4^\circ \dots 15^\circ$. Изменение угла наклона на один градус приводит к приросту функции отбрасывания почвенных частиц вдоль оси Ox на 6,5...25 %.

Проанализируем характер перемещения частицы почвы в зависимости от угла поворота φ . Для этого определим координаты почвенной частицы по оси Ox :

$$x = \frac{R_1^2 4\pi^2 n^2 \sin \varphi |\cos \varphi| \sin \beta}{g} - R_1 \cos \varphi. \quad (7)$$

Находим значение отброса почвенной частицы при изменении угла поворота точки ротора и построим соответствующие графические зависимости. Для анализа выбираем экстремальные значения одного из влияющих факторов при среднем значении другого (рис. 2).

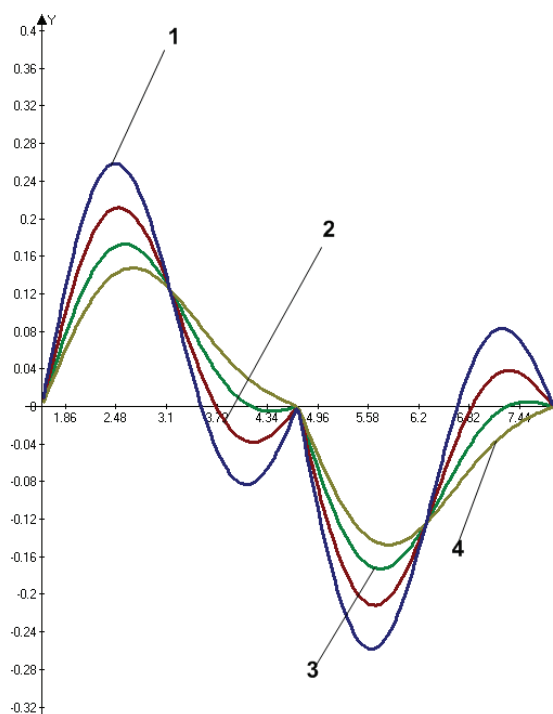


Рис. 2. График зависимости $x(\varphi)$ за один период ($\varphi \in [0, 2\pi]$):
1 — $\beta = 15^\circ$, а $n = 4,5 \text{ с}^{-1}$; 2 — $\beta = 8,5^\circ$, а $n = 5 \text{ с}^{-1}$;
3 — $\beta = 8,5^\circ$, а $n = 4 \text{ с}^{-1}$; 4 — $\beta = 4^\circ$, а $n = 4,5 \text{ с}^{-1}$

Очевидно, что изменение угла наклона оси ротора имеет большее влияние на перемещение частицы почвы. Проанализировав полученные графоаналитические зависимости, можно судить об экстремальных значениях дальности отбрасывания частицы почвы и соответствующем им угле поворота, что позволяет обосновать рациональные конструктивно-технологические и агротехнические параметры ротационного органа предложенной конструкции.

Таким образом, результаты теоретических исследований свидетельствуют о том, что выбор и обоснование рационального значения угла наклона оси ротационного органа к вертикали имеет решающее значение для обеспечения минимального распыления почвенных частиц.

Для проверки полученных результатов были проведены полевые испытания работы экспериментальной установки с ротационными органами предложенной кон-

струкции. Исследования проводились на посевах кукурузы на зерно при первой междурядной обработке. Условия испытаний определялись согласно ГОСТ 20915 [9]: тип почвы — чернозем глубокий среднесуглинистый малогумусный, твердость почвы — 1,51 МПа, средняя относительная влажность почвы обрабатываемого слоя (0...8 см) — 18,7 %.

Для установления влияния конструктивно-технологических параметров на качество обработки определялись фракционный состав почвы, а именно содержание эрозионно-опасных частиц диаметром меньше 0,25 %, а также профиль полученной поверхности.

Исследования проводились в соответствии с методиками, описанными в СОУ 74.3-37-127:2004 [10]. При этом, угловая скорость задавалась с помощью регулировки давления рабочей жидкости на гидромоторе и контролировалась по средствам установки частотоизмерительного датчика Д4В-1 на шкив привода ротора, сигнал принимался информационно-измерительной системой на базе тензоусилителя «Spider-8», обрабатывался с помощью компьютерной программы KatMan Express 4.5 и сохранялся в формате «*.xls».

Угол оси ротора устанавливался в соответствии со значениями предусмотренными планом эксперимента из теоретически обоснованного диапазона. Профиль полученной поверхности определялся с помощью координатной рейки, а фракционный состав методом ситового анализа.

Для определения фракционного состава почвы и отклонения от горизонтального профиля было исползовано планирование эксперимента на трехуровневом ортогональном центральном композиционном плане, который позволяет получить максимально приближенную математическую модель при минимальном количестве опытов. Значения факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение влияющих факторов

Название факторов	Обозначение	Уровни факторов		
		Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)
Угол наклона оси ротационного органа к вертикали, град.	X_1	4	9,5	15
Угловая скорость ротора, об./мин.	X_2	130	190	250

Согласно матрице эксперимента, контролировались следующие показатели качества: фракционный состав почвы, % (Y_1); отклонение от горизонтального профиля полученной поверхности, см (Y_2).

На основе полученных экспериментальных данных составлены уравнения регрессии:

$$Y_1 = -12,856 + 1,276X_1 - 0,06X_1^2 + 0,168X_2 - 0,0004X_2^2 + 0,002X_1X_2, \quad (8)$$

$$Y_2 = -0,61 + 1,41X_1 - 0,03X_1^2 + 0,086X_2 - 0,0002X_2^2 + 0,005X_1X_2. \quad (9)$$

Уравнения регрессии проверены на адекватность по критерию Фишера. Согласно расчетам дисперсия адекватности $S_{ад} = 1,554$, а дисперсия воспроизводимости

$S_{\text{восп}} = 0,695$. Расчетный критерий Фишера составил: $F_{\text{теор}} = 1,554^2/0,695^2 = 5$, а теоретический: $F_{\text{теор}0,05; 8; 2} = 19,3$. Таким образом, уравнение (8) адекватно, так как $F = S_{\text{ад}}^2/S_{\text{восп}}^2 < F_{\text{теор}} = 5 < 19,3$.

Оптимальный режим работы агрегата, при котором содержание эрозионно-опасных частиц будет минимальным, определен путем исследования уравнения (8) на экстремумы относительно X_1, X_2 :

$$\begin{cases} \frac{\partial Y_1}{\partial X_1} = -0,12X_1 + 0,002X_2 + 1,276 = 0; \\ \frac{\partial Y_1}{\partial X_2} = 0,002X_1 - 0,0008X_2 + 0,168 = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Решение системы (10), определило значения факторов — угол наклона (X_1) $\rightarrow 0,1^\circ$; угловая скорость (X_2) — 210 об/мин, при соотношении которых содержание эрозионно-опасных частиц будет минимальным.

Подставив полученные значения в уравнение (8), определяем минимальное содержание эрозионно-опасных частиц, которое составило 4,8 %.

Анализ уравнения подтвердил, что наиболее значимым фактором, влияющим на фракционный состав, является угол наклона. На основе математической модели построена поверхность отклика (рис. 3). Анализ поверхности дает возможность оценить фракционный состав при взаимодействии угла наклона и угловой скорости.

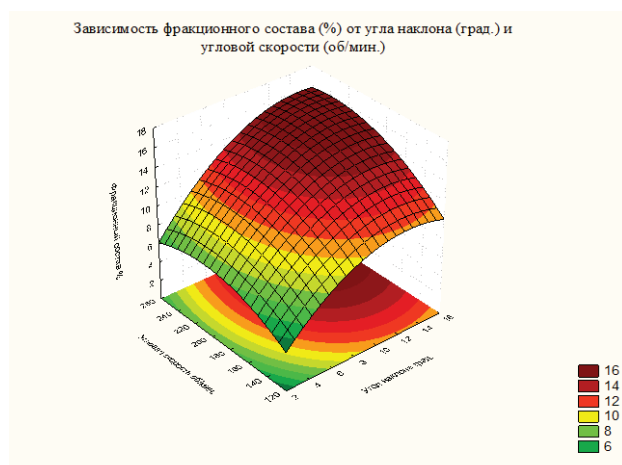


Рис. 3. Поверхность отклика зависимости фракционного состава от угла наклона оси ротационного рогана к вертикали и угловой скорости вращения

Уравнение регрессии (9) проверено на адекватность: дисперсия адекватности $S_{\text{ад}} = 0,98$; дисперсия воспроизводимости $S_{\text{восп}} = 0,425$; расчетный критерий Фишера: $F = 0,98^2/0,425^2 = 5,33$, теоретический критерий Фишера: $F_{\text{теор}0,05; 7; 2} = 19,3$ — уравнение адекватно так как: $F = S_{\text{ад}}^2/S_{\text{восп}}^2 < F_{\text{теор}} = 5,33 < 19,3$.

Определим оптимальный режим работы агрегата, при котором отклонение от горизонтального уровня будет минимальным. Для этого исследуем уравнение (9) на экстремумы относительно X_1, X_2 :

$$\begin{cases} \frac{\partial Y_2}{\partial X_1} = -0,07X_1 + 0,005X_2 + 1,41 = 0; \\ \frac{\partial Y_2}{\partial X_2} = 0,005X_1 - 0,0004X_2 + 0,086 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Решение системы (11), определяет значения факторов, при соотношении которых отклонение от горизонтального уровня будет минимальным — угол наклона (X_1) $\rightarrow 0,1^\circ$ град; угловая скорость (X_2) — 120 об/мин.

Подставив полученные значения в уравнение (9), определим минимальное отклонение от горизонтального профиля поверхности, которое составило 7 мм.

Анализ уравнения показал, что угол наклона и угловая скорость являются равнозначными факторами, влияющими на профиль поверхности.

На основе математической модели — построена поверхность отклика (рис. 4). Анализ поверхности позволяет оценить показатель профиля поверхности при взаимодействии угла наклона и угловой скорости.

Анализ уравнений регрессии фракционного состава и отклонения от горизонтального профиля поверхности позволил определить оптимальные соотношения исследуемых факторов. Однако, так как условия оптимумов не совпадают, необходимо определить общий оптимум.

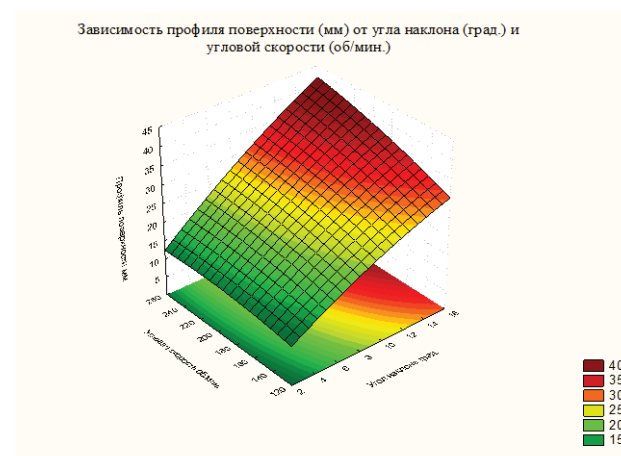


Рис. 4. Поверхность отклика зависимости профиля полученной поверхности от угла наклона оси ротора к вертикали и угловой скорости

На основе полученных математических моделей составим систему неравенств, для решения которой зададим граничные условия: а) минимальное количество эрозионно-опасных частиц не должно превышать 6 %; б) отклонение от горизонтального уровня не должно превышать 10 мм.

$$\begin{cases} -12,856 + 1,276X_1 - 0,06X_1^2 + 0,168X_2 - 0,0004X_2^2 + 0,002X_1X_2 \leq 6; \\ -0,61 + 1,41X_1 - 0,03X_1^2 + 0,086X_2 - 0,0002X_2^2 + 0,005X_1X_2 \leq 10. \end{cases} \quad (12)$$

Решением системы неравенств (12) определяем общий оптимум: угол наклона (X_1) $\rightarrow 0$ град; угловая скорость (X_2) — 210 об/мин.

Подставив найденные значения факторов в уравнения (8) и (9) получим, что $Y_1 = 4,8$ %, а $Y_2 = 8,6$ мм, следовательно, заданные условия выполняются.

Таким образом, по результатам эксперимента получены уравнения регрессии и проведена оценка их адекватности по критерию Фишера. Анализ уравнений регрессии позволил определить оптимальное соотношение независимых факторов, которое обеспечивает минимальное содержание эрозионно-опасных частиц

при минимальном отклонении от горизонтального профиля поверхности. Для графического отображения взаимосвязи факторов на показатели качества обработки построены поверхности отклика.

5. Выводы

Согласно цели исследований проведен теоретический анализ перемещения частицы почвы под действием ротационного рабочего органа предложенной конструкции, в результате которого определена взаимосвязь между конструктивно-технологическими факторами и дальностью отбрасывания частицы почвы при разных значениях угла поворота точки ротационного органа. Установлено, что по сравнению с изменением угловой скорости большее влияние имеет угол наклона оси ротора к вертикали.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность теоретических обоснований. Регрессионный анализ опытных данных и исследование полученных зависимостей на экстремумы позволил оптимизировать конструктивно-технологические параметры в соответствии с требованиями к показателям качества обработки. При этом установлено, что минимальное содержание эрозионно-опасных частиц почвы диаметром меньше 0,25 мм составило 4,8 % и отклонение от горизонтального профиля обработанной поверхности — 8,6 мм, — наблюдается при угле наклона оси ротора к вертикали $\rightarrow 0^\circ$ и угловой скорости вращения 210 об/мин.

Таким образом, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены оптимальные конструктивно-технологические параметры ротационного органа предложенной конструкции для обеспечения минимального распыления почвенных частиц и отклонения от горизонтального профиля поверхности, что упреждает эрозионные явления и иссушение корнеобитаемого слоя почвы.

Литература

1. Пат. 97072 Україна, МПК6 А 01 В 35/16, А01В 39/08, А01В 39/18, А01В 21/06, А01В 33/06. Ротационний робочий орган культиватора [Текст] / Пастухов В. І., Браженко С. А.; заявник і патентовласник Пастухов В. І., Браженко С. А. — № а201104043 ; заявл. 04.04.2011; опубл. 26.12.2011, бюл. № 24.
2. Пат. 98581 Україна, МПК6 А 01 В 33/06, А01В 35/16, А01В 39/20, А01В 39/08. Спосіб обробітку міжрядь просапних культур [Текст] / Пастухов В. І., Браженко С. А.; заявник і патентовласник Пастухов В. І., Браженко С. А. — № а201105809 ; заявл. 10.05.2011; опубл. 25.05.2012, бюл. № 10.
3. Адамчук, В. В. Теория центробежных рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений [Текст] : монография / В. В. Адамчук. — К.: Аграрн. наука, 2012. — 178 с.
4. Заїка, П. М. Теорія сільськогосподарських машин [Текст] / П. М. Заїка // Машини для приготування і внесення добрив. — Том 1, (част. 3). — Харків: Око, 2002. — 352 с.
5. Ловейкін, В. С. Модель розсіювання гранул мінеральних добрив після сходження з диска відцентрового розкидача при дії вітру [Текст] / В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, А. І. Дитюк // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. — Х.: ХНТУСГ, 2012. — Вип. 124. Т. 1. — С. 27–35.

6. Замойська, К. В. Обґрунтування параметрів ротационного розпушувача ґрунту [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / К. В. Замойська. — Львів, 2008. — 21 [1] с.
7. Ветохин, В. И. Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины: Теория, расчет, результаты испытаний [Текст] : монография / В. И. Ветохин, И. М. Панов, В. А. Шмонин, В. А. Юзбашев. — К.: Феникс, 2009. — 264 с.
8. Браженко, С. А. Обґрунтування кінематичного режиму роботи ротационного робочого органу з вертикальною віссю обертання [Текст] / С. А. Браженко // Збірник наукових праць Державної наукової установи УкрНДПШВТ ім. Л. Погорілого «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки та технологій для сільського господарства України». — Дослідницьке, 2012. — Вип. 16(30). — С. 274–282.
9. ГОСТ 20915-75. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний [Текст]. — Действ. от 1975-06-19. — М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. — 33 с.
10. СОУ 74.3-37-127:2004. Випробування сільськогосподарської техніки. Машини і знаряддя для обробітку просапних культур [Текст]. — Офіц. вид. — К.: М-во аграрної політики України, 2006. — 54 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТАЦІЙНОГО ОРГАНА ДЛЯ МІЖРЯДНОЇ ОБРОБКИ

Стаття присвячена теоретичним дослідженням залежності переміщення частинок ґрунту під дією ротационного органу запропонованої конструкції. Визначено, що конструктивно-технологічні фактори впливають на ступінь розпилення ґрунту і виведені відповідні графоаналітичні залежності. Проведено експериментальну перевірку теоретичних обґрунтувань. На основі дослідних даних оптимізовані параметри вдосконаленого робочого органу відповідно із забезпеченням якості міжрядної обробки.

Ключові слова: відкидання частинки ґрунту, кут нахилу вісі ротора до вертикалі, кутова швидкість, оптимізація параметрів.

Браженко Светлана Анаольевна, аспірант кафедри сільськогосподарських машин, Харківський національний технічний університет ім. Петра Василенка, Україна, e-mail: brazhenko_sa@mail.ru.

Браженко Світлана Анаоліївна, аспірант кафедри сільськогосподарських машин, Харківський національний технічний університет ім. Петра Василенка, Україна.

Brazhenko Svetlana, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ukraine, e-mail: brazhenko_sa@mail.ru