

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.82.633.11

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-71-76

Н.И. Стрикунов, А.В. Зенков, Д.П. Гребенюк
N.I. Strikunov, A.V. Zenkov, D.P. Grebenyuk

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОСТИ ХОДА ПРИКАТЫВАЮЩЕГО КОЛЕСА ПОСЕВНОЙ СЕКЦИИ

SUBSTANTIATION OF THE MAIN PARAMETERS OF STABILITY OF THE PACKING WHEEL OF A SOWING UNIT

Ключевые слова: *посевной рабочий орган, жидкие комплексные удобрения (ЖКУ), распределитель, лаповый сошник, поводок, прикатывающее колесо.*

Совершенствование технологии посева зерновых культур по стерневому фону с применением лапового сошника является актуальной задачей. В связи этим особое внимание должно быть уделено широкозахватным посевным комплексам, например, «Кузбасс». Лаповые сошники в настоящее время находят всё большее применение в сеялках с гравитационным высевом семян и с пневмотранспортированием семян в посевных агрегатах с большой шириной захвата. Из прицепных сеялок для посева зерновых культур наибольшее распространение получили стерневые сеялки СКП-2,1 и СЗС-2,1 и посевные комплексы «Кузбасс», имеющие пять модификаций по ширине захвата (ПК-6,1; ПК-8,5; ПК-9,7; ПК-12,2; ПК-15,8). Посевная секция, разработанная на кафедре сельскохозяйственной техники и технологий, предназначена для посева зерновых и зернобобовых культур, имеющая в своём устройстве лаповый сошник, распределитель семян, долото и прикатывающее колесо. Дано описание рабочего процесса посевной секции и обоснованы параметры устойчивости движения прикатывающего колеса. При работе посевной секции вся система твердых тел находится в состоянии абсолютного и относительного движения. Характер движения посевной секции при перемещении посевного комплекса обуславливается действующими на него силами. Эти силы представлены в расчетной схеме. Характерной особенностью работы сеялки является то, что для осуществления технологического процесса рабочие органы должны перемещаться по полю, которое не-

однородно по микрорельефу, плотности почвы и другим физико-механическим показателям, поэтому большинство из указанных сил изменяется в процессе работы посевной секции по величине и направлению. В результате этого возможно нарушение равновесия действующих сил на прикатывающее колесо. Очевидно, что качество работы посевной секции, имеющей индивидуальное прикатывающее колесо, может быть достигнуто только при устойчивом движении.

Keywords: *sowing working body, liquid compound fertilizers, distributor, tine coulter, drag bar, packing wheel.*

Improving the technology of cereal crop sowing into stubble using a tine coulter is a topical issue. In this regard, special attention should be paid to wide-span sowing units as the Kuzbass sowing unit. Nowadays, tine coulters are increasingly used in seed drills with gravity seeding and with pneumatic seed transportation in wide-span sowing units. Of the trailed seeders for sowing cereal crops, the most widespread are stubble drills SKP-2.1 and SZS-2.1 and the Kuzbass sowing units which have five modifications in terms of operating width (PK-6.1; PK-8.5; PK-9.7; PK-12.2; PK-15.8). The sowing section developed at the Chair of Agricultural Machinery and Technologies is designed for sowing cereal and legume crops; it includes a tine coulter, a seed dispenser, a chisel and a packing wheel. This paper describes the working process of the sowing section and substantiates the stability parameters of the packing wheel. During the operation of the sowing section, the entire system of solid bodies is in a state of absolute and relative motion. The pattern of the sowing section movement is determined by the forces acting on it.

These forces are represented in the calculation scheme. A characteristic feature of the seeder operation is that in order to carry out the technological process, the working tools should move across a field that is not uniform in its microrelief, soil density and other physical and mechanical parameters. Therefore, most of these forces change

in magnitude and direction during the operation of the sowing section. As a result, the equilibrium of the acting forces on the packing wheel may be disrupted. Obviously, the operation quality of the seeding section having an individual packing wheel may only be achieved with steady movement.

Стрикунов Николай Иванович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: strikunov555@mail.ru.

Зенков Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: alexey_zenkov@yahoo.com.

Гребенюк Данил Петрович, аспирант, Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий РАН, р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Российская Федерация, e-mail: danil.grebenyuk@mail.ru.

Strikunov Nikolay Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: strikunov555@mail.ru.

Zenkov Aleksey Vladimirovich, Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: alexey_zenkov@yahoo.com.

Grebenyuk Danil Petrovich, post-graduate student, Siberian Federal Scientific Center of Agro-Biotechnologies of Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation, e-mail: danil.grebenyuk@mail.ru.

Введение

В значительной степени основу будущего урожая определяет способ посева и внесения минеральных удобрений, в том числе жидких форм азотно-фосфорных удобрений в виде жидких комплексных удобрений (ЖКУ) [1-3].

Проведённые исследования ученых по совершенствованию способов посева внесения удобрений показывают на возможность применения ЖКУ при посеве [4]. Это создаёт реальные предпосылки для разработки новой посевной секции. Однако эти исследования также показали, что в схемах посевных рабочих органов есть неиспользованные возможности для дальнейшего их совершенствования.

Выделим основные пути совершенствования технологической схемы работы предлагаемого посевного рабочего органа:

- применение распределителя с рабочей поверхностью, представляющей собой кривую наискорейшего спуска, обеспечивающего двухполосное распределение семян в подлаповом пространстве при их пневмотранспортировании;
- применение долота с тупым углом вхождения в почву, обеспечивающего создание бороздки с уплотнённым дном для внесения ЖКУ;
- применение индивидуального прикатывающего колеса посевной секции.

Целью работы является технологическое обеспечение устойчивости хода прикатывающего колеса посевной секции.

Требуется решить следующие **задачи**:

- 1) разработать технологическую схему посевного рабочего органа;

- 2) обосновать основные параметры устойчивости хода прикатывающего колеса посевной секции.

Основная часть

Технологический процесс разбросного посева семян при их пневмотранспортировании будем рассматривать на примере лапового сошника для внутрипочвенного разбросного посева семян, позволяющего получить требуемую равномерность двухполосного распределения семян в подсошниковом пространстве. Для определения параметров и режимов работы посевной секции с прикатывающим колесом проведём теоретические исследования [5, 6].

Для решения поставленных задач нами разработан новый рабочий орган для посевного комплекса с пневмотранспортированием семян (рис. 1).

Посевной рабочий орган для одновременного посева семян, внесения гранулированных удобрений и внесения жидких комплексных удобрений на другом уровне содержит изогнутую стойку 1, к верхней части стойки которой посредством кронштейна 11 и П-образной скобы 12 закреплен поводок 14 с прикатывающим колесом 16, имеющий шарнир 17 и пружину 13. Скобу, на поводке 14, закреплены кулиса 15 с пазами и чистик 19.

Посевной рабочий орган работает следующим образом.

При движении агрегата по полю посевной рабочий орган для одновременного посева семян, внесения гранулированных и жидких комплексных удобрений на другом уровне заглуб-

ляется в почву. При заглуплении лапового сошника в почву стрельчатая лапа 2, подрезая пласт почвы и производя ее рыхление, одновременно уничтожает сорняки. Одновременно долото 3, опирающееся на треугольное основание, скользя по дну образованной бороздки, перемещается ниже уровня глубины хода стрельчатой лапы 2, образуя уплотненное ложе для жидких комплексных удобрений. Так как долото 3 имеет тупой угол вхождения в почву, то попадающие на него остатки растений не налипают. Семена и гранулированные удобрения, двигаясь по семятукопроводу и далее по патрубку 8, попадают на распределитель 9, поверхность которого представляет собой кривую наискорейшего

спуска, меняют свое направление и равномерно двойной полосой высеваются в почву на глубину хода лапы 3, обеспечивая оптимальную площадь питания растений обеих полос. Конструкция отражателя 10 не позволяет семенам и гранулированным удобрениям попадать в центральную часть между двумя засеянными полосами. Жидкие комплексные удобрения по трубке 7 поступают к форсунке 18 и распределяются в бороздке, образованной долотом 3. Глубина подачи жидких комплексных удобрений относительно уровня расположения семян устанавливается глубиной хода долота 3 на 2,5-3 см ниже этого уровня.

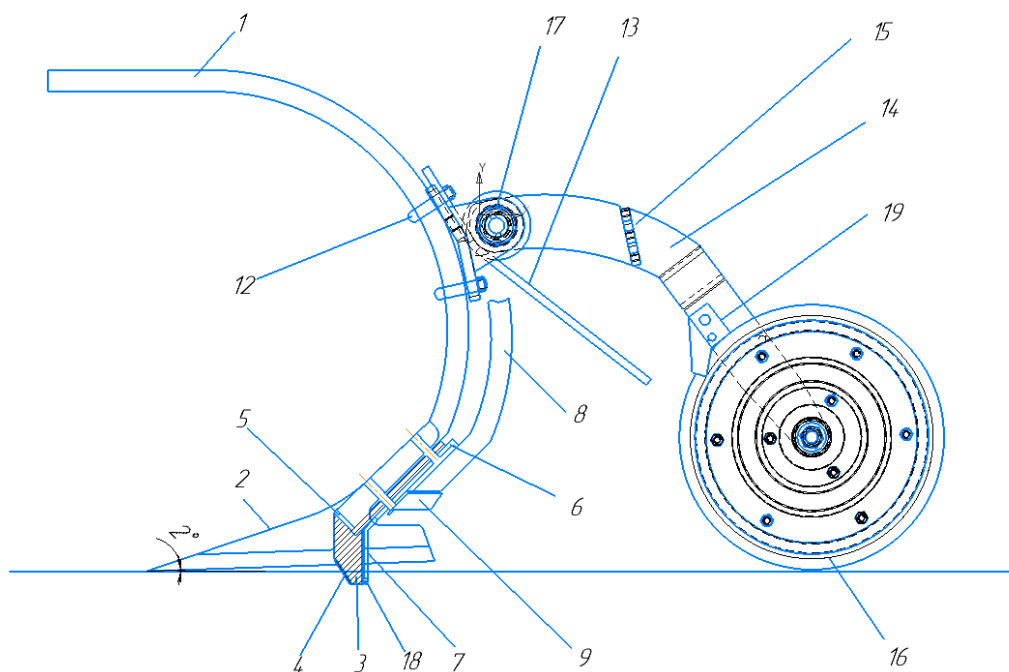


Рис. 1. Посевной рабочий орган

После прохода сошника семена и удобрения закрываются почвой, и по следу долота 3 этот слой прикатывается колесом 16, что способствует снижению испарения жидких комплексных удобрений.

Посевной рабочий орган может быть использован в качестве рабочего органа в конструкции посевного комплекса ПК-8,5 «Кузбасс».

На основании рисунка 2, где показано устройство посевной секции, представим, что по следу борозды, образованной долотом, перемещается прикатывающее колесо с резиновым ободом, которое посредством поводка и пластины двумя П-образным скобами крепится к

стойке. Давление прикатывающего колеса на почву регулируется посредством пружины \bar{Q} .

Общая масса устройства складывается из массы поводка m_1 и массы колеса m_2 .

$$m = m_1 + m_2.$$

Тогда силы тяжести будут равны:

$$F_1 = m_1g, F_2 = m_2g, \text{ и } R = m_2g.$$

Точка $O'(x, y) \Rightarrow x = x(t), y = y(t)$.

Запишем базовое уравнение всех действующих сил [7]. Согласно схеме примем, что сила сжатия пружины \bar{Q} приложена в точке изгиба поводка перпендикулярно к нему.

$$\begin{aligned} m\bar{a} &= \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{P} + \bar{Q} + \bar{R}; \\ m\bar{a} &= m\bar{g} + \bar{P} + \bar{Q} + \bar{R}. \end{aligned} \quad (1)$$

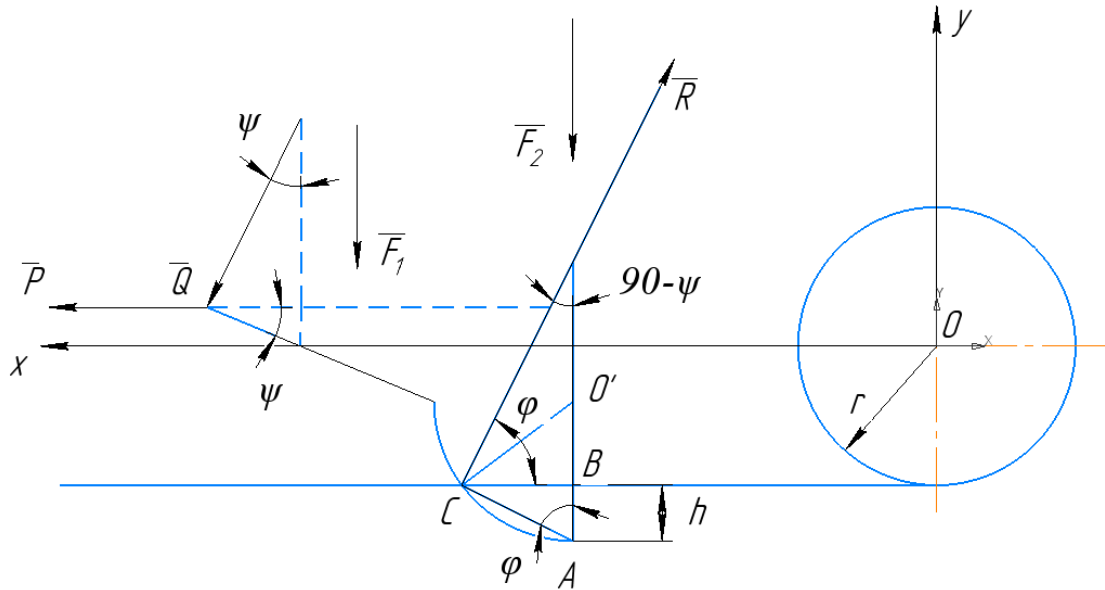


Рис. 2. Расчетная схема к определению параметров движения прикатывающего колеса посевной секции

Обозначим глубину уплотнения почвы, то есть заглубление через h , тогда $|BA| = h$.

$$\text{Из } \triangle CBA \quad \cos \varphi = \frac{h}{|CA|}$$

$$|CA|^2 = |CB|^2 + h^2;$$

из $\triangle CBO'$.

$$|CB|^2 + (r - h)^2 = r^2;$$

$$|CB|^2 + r^2 - 2rh + h^2 = r^2 \Rightarrow |CB|^2 = 2rh - h^2.$$

Тогда $|CA|^2 = 2rh - h^2 + h^2$, то есть

$$|CA| = \sqrt{2rh}.$$

Таким образом,

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{2r}};$$

$$\sin^2 \varphi = 1 - \cos^2 \varphi = 1 - \frac{h}{2r} = \frac{2r-h}{2r}; \quad (2)$$

$$\sin \varphi = \frac{\sqrt{2r-h}}{\sqrt{2r}}. \quad (3)$$

Проектируем на оси x и y базовые уравнения (1), используя формулы (2) и (3):

$$\begin{cases} O_x: m\ddot{x} = P + Q \sin \psi - R \cos \varphi \\ O_y: m\ddot{y} = -Q \cos \psi - mg + R \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

Для удобства обозначим через

$$\begin{aligned} a &= P + Q \sin \psi - R \cos \varphi, a \\ b &= -Q \cos \psi - mg + R \sin \varphi. \end{aligned}$$

Считая $a = \text{const}$ и $b = \text{const}$ постоянными, проинтегрируем каждое уравнение из системы (4):

$$m\ddot{x} = a \Rightarrow m\dot{x} = at + C_1.$$

При $t=0 \Rightarrow m\dot{x}(a) = C_1$, где $\dot{X}(0)$ – абсцисса вектора скорости центра колеса в первоначальном положении. Считаем, что в первоначальном положении колесо покоится. Это возможно при ровном микрорельефе почвы и ее

однородности, то есть имеет место статическое равновесие колеса – $\dot{X}(0) = 0$, то есть $C_1 = 0$.

$$m\dot{x} = at \Rightarrow mx = \frac{a}{2}t^2 + C_2.$$

$$X(0) = 0$$

$mx(t) = \frac{a}{2}t^2$ – закон изменения абсциссы центра колеса.

$$m\ddot{y} = b \Rightarrow m\dot{y} = bt + C_1;$$

$$\dot{y}(0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0;$$

$$m\dot{y} = bt \Rightarrow my = \frac{b}{2}t^2 + C_2;$$

$$y(0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0.$$

Получим $my(t) = \frac{b}{2}t^2$ – закон изменения ординаты.

Итак, получаем параметрическое задание траектории движения центра колеса

$$\begin{cases} x(t) = \frac{a}{2m}t^2 \\ y(t) = \frac{b}{2m}t^2 \end{cases} \quad (5)$$

Из системы (5) $\frac{y}{x} = \frac{b}{a}$, то есть $y(x) = \frac{b}{a}x$.

Стало быть, траектория движения центра колеса есть прямая, проходящая через точку O и имеющая коэффициент $\frac{b}{a}$.

Переобозначим $\frac{b}{a} = k$ и будем рассматривать k как функцию переменной h . В условиях проведения технологического процесса посевной секции изменение угла наклона траектории h влечет изменение k , то есть изменение угла наклона траектории движения центра.

$$x = x(h);$$

$$\Delta x = x(h + \Delta h) - x(h).$$

Определим составляющие Δx :

$$x(h) = \frac{a(h)}{2m} t^2;$$

$$x(h + \Delta h) = \frac{a(h + \Delta h)}{2m} t^2.$$

Сделаем преобразования:

$$\Delta x = \frac{t^2}{2m} (a(h + \Delta h) - a(h)) =$$

$$= \frac{t^2}{2m} (-R) \frac{1}{\sqrt{2R}} (\sqrt{2r - (h + \Delta h)} - \sqrt{2r - h}) =$$

$$= \frac{t^2}{2m} (-R) \frac{1}{\sqrt{2R}} (\sqrt{(2r - h) - \Delta h} - \sqrt{2r - h}).$$

Постоянно меняющиеся внешние воздействия на колесо при посеве вызваны неровностями профиля поверхности поля и неравномерностью физико-механических и технологических свойств почвы. Изменение положения колеса в вертикальной плоскости можно отобразить графически (рис. 3).

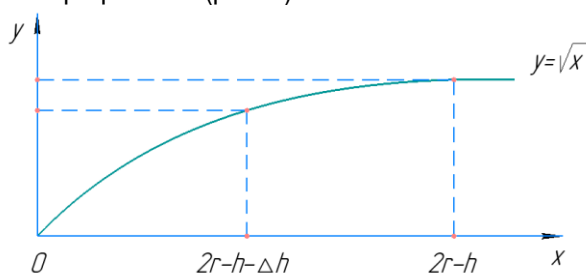


Рис. 3. Изменение угла наклона траектории движения центра колеса

$$k = \frac{b}{a} = \frac{R \sin \varphi - Q \cos \psi - mg}{P + Q \sin \psi - R \cos \psi}.$$

Используя выражения (3) и (4), преобразуем k :

$$k = \frac{R \frac{\sqrt{2r-h}}{\sqrt{2r}} - Q \cos \psi - mg}{P + Q \sin \psi - R \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{2r}}}.$$

Определим изменение угла наклона при (малом) изменении h :

$$\Delta k = k(h + \Delta h) - k(h).$$

Можно предположить, что на усовершенствованной посевной секции при наличии прижимной пружины на поводке колебания колеса уменьшаются. Это обеспечивает более устойчивую глубину хода лапового сошника, при геометрических размерах прикатывающего колеса $D_k = 310$ мм и ширине прорезиненного обода $b = 25$ мм.

Заключение

1. Разработана технологическая схема посевного рабочего органа, обеспечивающая одновременное внесение гранулированных удобрений при посеве семян и жидких комплексных удобрений ниже уровня высевы семян.

2. Проведённые теоретические исследования устойчивости хода прикатывающего колеса посевной секции подтвердили целесообразность его использования по следу долота, куда и вносятся жидкие удобрения.

3. Практически установлено, что прикатывающее колесо, способствующее снижению испарения жидких комплексных удобрений, обеспечивает стабильность хода по глубине лапового сошника.

Библиографический список

1. Абдулнатилов, М. Г. Влияние способов внесения минеральных удобрений на рост и развитие растений / М. Г. Абдулнатилов. – Текст: непосредственный // Известия Дагестанского ГАУ. – 2019. – № 4 (4). – С. 65-67.

2. О перспективах прецизионного управления продуктивностью пшеницы в условиях северного Казахстана / Б. Р. Ирмулатов, К. К. Абдуллаев, А. А. Комаров, В. В. Якушев. – Текст: непосредственный // Сельскохозяйственная биология. – 2021. – Т. 56, № 1. – С. 92-102.

3. Возделывание пшеницы в зависимости от способа посева и внесения азотных удобрений / М. С. Чекусов, А. А. Кем, Е. М. Михальцов [и др.]. – Текст: непосредственный // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2022. – Т. 52, № 1. – С. 90-99.

4. Окунев, Г. А. Ресурсосберегающие технологии – резерв повышения эффективности земледелия / Г. А. Окунев, Н. А. Кузнецов, С.С. Канатпаев. – Текст: непосредственный // АПК России. – 2017. – Т. 24, № 1. – С. 136-141.

5. Циммерман, М. З. Рабочие органы почвообрабатывающих машин / М. З. Циммерман. – Москва: Машиностроение, 1978. – 295 с. – Текст: непосредственный.

6. Ворокосов, И. В. Обоснование конструктивных параметров почвообрабатывающего орудия для предпосевной обработки почвы и посева зерновых культур / И. В. Ворокосов. – Текст: непосредственный // Вестник Курганской ГСХА. – 2017. – № 1 (21). – С. 72-74.

7. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики: статика, кинематика, динамика: учебное

пособие для вузов / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 15-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2010. – 608 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Abdulnatipov, M. G. Vliyanie sposobov vneseniya mineralnykh udobreniy na rost i razvitiye rasteniy // Izvestiya Dagestanskogo GAU. 2019. No. 4 (4). – S. 65-67.

2. Irmulatov, B.R. O perspektivakh pretsizionnogo upravleniya produktivnostyu pshenitsy v usloviyakh severnogo Kazakhstana / B.R. Irmulatov, K.K. Abdullaev, A.A. Komarov, V.V. Yakushev // Selskokhozyaystvennaya biologiya. – 2021. – Т. 56. – No. 1. – S. 92-102.

3. Chekusov, M. S. Vozdelyvanie pshenitsy v zavisimosti ot sposoba poseva i vneseniya azotnykh udobreniy / M.S. Chekusov, A.A. Kem, E.M. Mikhaltsov i dr // Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki. – 2022. – Т. 52. – No. 1. – S. 90-99.

4. Okunev, G.A. Resursosberegayushchie tekhnologii – rezerv povysheniya effektivnosti zemledeliya / G.A. Okunev, N. A. Kuznetsov, S.S. Kanatpaev // APK Rossii. – 2017. – Т. 24. – No. 1. – S. 136-141.

5. Tsimmerman, M.Z. Rabochie organy pochvoobrabatyvayushchikh mashin / M.Z. Tsimmerman. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 295 s.

6. Vorokosov, I.V. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov pochvoobrabatyvayushchego orudiya dlya predposevnoy obrabotki pochvy i poseva zernovykh kultur // Vestnik Kurganskoй GSKHA. – 2017. – No. 1 (21). – S. 72-74.

7. Yablonskiy, A.A. Kurs teoreticheskoy mekhaniki: statika, kinematika, dinamika: uchebnoye posobie dlya vuzov / A.A. Yablonskiy, V.M. Nikiforova. – 15-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2010. – 608 с.



УДК 633.2.043.2:631.363.32

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-76-85

**С.В. Брагинец, О.Н. Бахчевников,
В.И. Пахомов, Д.А. Максак**
S.V. Braginet, O.N. Bakhchevnikov,
V.I. Pakhomov, D.A. Maksak

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЛЮЦЕРНЫ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

SIMULATION OF THE UHF CONVECTIVE DRYING PROCESS OF ALFALFA HERBAGE IN A VERTICAL DRYER

Ключевые слова: СВЧ-сушка, зеленая масса, вакуум, вертикальная сушильная установка, радиопрозрачный шнек, каротин, математическое моделирование, тепломассоперенос.

Разработана и валидирована физико-математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки измельченной зеленой массы люцерны в вертикальной установке при пониженном давлении 60-80 кПа. Модель предназначена для прогнозирования динамики влагоудаления, температурных полей и потерь каротина при комбинированном воздействии СВЧ-излучения и вакуума. В отличие от однокомпонентных подходов учитывается морфологическая неоднородность сырья: отдельно описаны листовая (65%) и стеблевая (35%) фракции с различной кинетикой тепломассопереноса и диэлектрическими свойствами. Листья и стебли аппроксимированы, соответственно, пластинами и цилиндрами, что позволило количественно описать асинхронность их

сушки и перераспределение СВЧ-энергии. В модель включено уравнение термической деградации каротина, зависящее от температуры листьев и влагосодержания, что обеспечило прогнозирование сохранности питательной ценности продукта. Установлено, что разница температур между фракциями достигает 1,9-5,6°C, а между центральной и периферийной зонами камеры – 2,5-3,5°C. Максимальная температура материала составляет 89°C, при этом температура листьев не превышает 87,1-91,2°C, что ограничивает деградацию каротина. Конечная влажность продукта изменяется в диапазоне 20,5-29,6%, при этом разница влажности листьев и стеблей составляет 2,7-7,9%. Время экспозиции материала в камере варьирует от 220 до 580 с в зависимости от частоты вращения шнека (5-12 об/мин.). Оптимальный диапазон 7-10 об/мин. обеспечивает конечную влажность листьев 20,1-21,8%, стеблей – 23,8-25,9% и потери каротина не более 3,9-5,1%. Валидация модели показала коэффициент детерминации 0,987,