DOI: 10.31279/2222-9345-2018-7-30-22-28
УДК 631.313**В. И. Коновалов, С. И. Коновалов, В. В. Кравченко, Е. Р. Минаков**

Konovalov V. I., Konovalov S. I., Kravchenko V. V., Minakov E. R.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО УЗЛА

JUSTIFICATION OF DESIGN PARAMETERS OF GRINDING UNIT

Описывается значимость предпосевной обработки почвы для получения высоких устойчивых урожаев зерновых колосовых культур после пропашных предшественников. Показана необходимость проведения многократных проходов дисковыми орудиями для повышения степени измельчения пожнивных остатков и крошения почвы. Авторами представлена актуальность применения дополнительных приспособлений к дисковым почвообрабатывающим орудиям для повышения технологической надежности и эффективности процесса обработки почвы. Описано назначение основных конструктивных элементов измельчающего узла фирмы Väderstad, а также показана необходимость проектирования конструктивно-технологических параметров для повышения эффективности его работы. Предложены теоретические зависимости для определения радиуса измельчающего узла и численности в зависимости от конструктивно-технологических параметров процесса, биометрических параметров стеблей кукурузы и твердости почвы при соблюдении установленной величины резания. В качестве примера представлен расчет по исходным данным из справочной литературы. Проведен графический анализ указанных зависимостей и намечены пути повышения эффективности использования измельчающего узла. Для повышения эффективности работы измельчающего узла в качестве технологических регулировок предложены дополнительные балластные грузы и изготовление креплений ножей на разном расстоянии от оси вращения.

Ключевые слова: дисковое почвообрабатывающее орудие, измельчающий узел, нож, пожнивные остатки, сопротивление.

The article describes the importance of pre-sowing tillage for obtaining high stable yields of cereal crops after tillage predecessors. We have shown the necessity of carrying out multiple passes by disk tools to increase the degree of grinding of crop residues and soil crumbling. We present the relevance of the use of additional devices to disk tillage tools to improve the technological reliability and efficiency of the soil treatment process. It is described the purpose of the main structural elements of the grinding unit of the company Väderstad, and also the necessity of design of constructive and technological parameters for increasing the efficiency of its work. We suggested the theoretical dependences for determination of radius of the grinding unit and number of knives depending on constructively-technological parameters of process, biometric parameters of stalks of maize and hardness of the soil at observance of the established size of cutting. As an example, the calculation of the source data from reference literature is described. A graphical analysis of these dependencies is carried out; ways to improve the efficiency of the grinding unit are outlined. To improve the efficiency of the grinding unit as technological adjustments we recommend additional ballast loads and manufacture of fasteners knives at different distances from the axis of rotation.

Key words: disk tillage tool, chopping node, knife, crop residues, resistance.

Коновалов Владимир Иванович – инженер, старший преподаватель кафедры процессов и машин в агробизнесе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет» г. Краснодар
Тел.: 8(8861)221-59-23
E-mail: konovalov.v.i@mail.ru

Коновалов Сергей Иванович – инженер учебно-опытного хозяйства «Краснодарское» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет» г. Краснодар
Тел.: 8-928-411-16-25
E-mail: pma@kubsau.ru

Кравченко Виктор Валерьевич – инженер учебно-опытного хозяйства «Кубань» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет» г. Краснодар
Тел.: 8-918-997-94-77
E-mail: pma@kubsau.ru

Минаков Евгений Романович – студент факультета механизации ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет» г. Краснодар
Тел.: 8(8861)221-59-23
E-mail: pma@kubsau.ru

Konovalov Vladimir Ivanovich – Engineer, Senior Lecturer of the Department of Processes and Machines in Agribusiness FSBEI HE «Kuban State Agrarian University» Krasnodar
Tel.: 8(8861)221-59-23
E-mail: konovalov.v.i@mail.ru

Konovalov Sergey Ivanovich – Engineer of Educational and Experimental Farm «Krasnodarskoye» FSBEI HE «Kuban State Agrarian University» Krasnodar
Tel.: 8-928-411-16-25
E-mail: pma@kubsau.ru

Kravchenko Viktor Valerievich – Engineer of Educational and Experimental Farm «Kuban» FSBEI HE «Kuban State Agrarian University» Krasnodar
Tel.: 8-918-997-94-77
E-mail: pma@kubsau.ru

Minakov Evgeniy Romanovich – Student of the Faculty of Mechanization FSBEI HE «Kuban State Agrarian University» Krasnodar
Tel.: 8(8861)221-59-23
E-mail: pma@kubsau.ru

Возделывание сельскохозяйственных культур в разрезе традиционной или минимальной технологий предусматривает обязательную подготовку почвы к посеву. Среди возделываемых сельскохозяйственных культур основную долю отводят озимым зерновым, которые наиболее часто высевают после пропашных предшественников. Подготовка почвы после пропашных предшественников, как правило, сводится к двухследной обработке почвы дисковыми почвообрабатывающими орудиями [1]. К причинам необходимости проводить два прохода можно отнести наличие большого количества пожнивных остатков и недостаточное крошение почвы.

Для повышения степени измельчения пожнивных остатков и крошения почвы современные дисковые почвообрабатывающие орудия имеют целый набор различных рабочих органов и ряд различных технологических схем размещения рабочих органов [2]. Кроме того, все чаще в технологических схемах как отечественных, так и зарубежных машин стали появляться различные приспособления, например выравнивающие планки, дополнительные измельчающие узлы, штригели и т. д. Наличие дополнительных приспособлений можно объяснить стремлением повысить производительность машин, качество обработки почвы, а также повышением их технологической надежности и эффективности [3].

Одним из перспективных приспособлений для применения является измельчающий узел фирмы Väderstad (рис. 1), который предназначен для интенсивного измельчения пожнивных остатков, обработки почвы на глубину до 3 см, а также способствует провоцированию прорастания семян падалицы и сорняков. Измельчающий узел состоит из установленных на оси роликов с закрепленными на них ножами. Ролики на оси расположены по винтовой линии, что обеспечивает увеличение давления на контактирующую поверхность ножа и обеспечивает перерезание толстостебельных культур. Ось через стойки с резиновыми демпферами закреплена на поперечной планке, которая шарнирно через кронштей-

ны устанавливается на раме орудия. Перевод измельчающего узла из рабочего положения в транспортное осуществляется при помощи гидроцилиндров. Эффективность использования данного измельчающего узла отмечена при подготовке почвы к посеву после пропашных предшественников.

Эффективное использование любой сельскохозяйственной машины возможно только при тщательном проектировании ее конструктивных параметров. Изготовление машин с необоснованными конструктивно-технологическими параметрами приводит не только к перерасходу материальных ресурсов, но и к невозможности их использования по назначению [4, 5].

Процесс измельчения пожнивных остатков крупнотебельных культур, например кукурузы, затруднен тем, что пожнивные остатки лежат непосредственно на почве. При резании стебля кукурузы ножом измельчающего узла стебель начинает изгибаться, в результате чего появляются силы реакции опоры со стороны стебля и почвы, на которой он лежит, а также сопротивление изгибу самого стебля. Если сила резания F_y будет больше, чем сумма всех сил сопротивления P при низкой скорости резания, то возможно смятие стебля без его перерезания. Если резание сопровождается динамическим действием силы, то при этом возникают силы инерции, которые в сумме с другими сопротивлениями обеспечивают условие перерезания стебля. Таким образом, условие перерезания стебля будет иметь вид [6]

$$F_y < P_{из} + P_{ин} + P_{почвы}, \quad (1)$$

где F_y – сила, необходимая для перерезания стебля, Н;
 $P_{из}$ – сопротивление стебля изгибу, Н;
 $P_{ин}$ – сила инерции стебля, Н;
 $P_{почвы}$ – сила сопротивления почвы, Н.

При взаимодействии ножа измельчающего узла со стеблем последний будет изгибаться, при этом стебель можно рассматривать как упругий стержень (рис. 2).

Из теории прогибов упругих стержней можно сделать вывод, что сопротивление стебля изгибу будет определяться по выражению [7]

Рисунок 1 – Измельчающий узел Väderstad

Рисунок 2 – Схема взаимодействия ножа измельчающего узла со стеблем

$$P_{из} = \frac{3fIEJ}{b^2a^2}, \quad (2)$$

где f – величина прогиба стебля, м;
 l – длина перерезаемого стебля, м;
 E – модуль упругости стебля, Па;
 J – момент инерции стебля, м⁴;
 a и b – соответственно длины участков, на которые перерезается стебель длиной l , м.

Величина прогиба стебля характеризуется скоростью измельчающего узла и временем взаимодействия его со стеблем, которое можно определить по выражению

$$f = V_y \Delta t, \quad (3)$$

где V_y – линейная скорость наиболее удаленной точки ножа измельчающего узла, м/с;
 Δt – время взаимодействия измельчающего узла и стебля, с.

Поскольку стебель кукурузы в диаметральном сечении представляет собой окружность, то время взаимодействия измельчающего узла с ним будет

$$\Delta t = \frac{d_{ст}}{V_y}, \quad (4)$$

где $d_{ст}$ – диаметр стебля, м.

При работе измельчающий узел совершает вращательное движение, а величину пройденного пути ножа можно охарактеризовать длиной дуги, тогда величину прогиба стебля можно записать в следующем виде:

$$f = \frac{\alpha R_y}{180^\circ} = \alpha R_y, \quad (5)$$

где α – величина угла, пройденная ножом измельчающего узла при перерезании стебля, рад;

R_y – радиус измельчающего узла, м.

Сила сопротивления стебля прогибу окончательно будет иметь вид

$$P_{из} = \frac{3\alpha R_y IEJ}{b^2 a^2}. \quad (6)$$

Сила инерции стебля возникает под действием ножа измельчающего узла и стремится оставить стебель в первоначальном положении. При этом сила инерции стебля определяется по выражению

$$P_{ин} = m_{ст} a_y, \quad (7)$$

где $m_{ст}$ – масса стебля, приведенная в точку взаимодействия, кг;
 a_y – ускорение стебля, м/с².

Поскольку начальная скорость стебля равняется нулю, то выражение (7) можно записать в виде

$$P_{ин} = \frac{m_{ст} V_y^2}{\Delta t}. \quad (8)$$

Откуда:

$$P_{ин} = \frac{m_{ст} \omega_y^2 R_y}{\alpha}, \quad (9)$$

где ω_y – угловая скорость измельчающего узла, рад/с.

Сопротивление почвы внедрению в нее стебля с ножом измельчающего узла будет характеризоваться величиной твердости почвы и площадью их взаимодействия и определяется по выражению

$$P_{почвы} = T_{почвы} S_{ст}, \quad (10)$$

где $T_{почвы}$ – твердость почвы, Па;
 $S_{ст}$ – площадь контакта стебля с почвой при перерезании, м².

Стебель кукурузы по своему строению представляет собой конус (рис. 3). Величина площади взаимодействия стебля с почвой может изменяться в широких пределах и зависит от твердости как почвы, так и самого стебля. Однако для теоретического определения наиболее целесообразно брать ее максимальную величину, для которой сопротивление будет максимальным. Максимальная площадь взаимодействия стебля с почвой ограничена его осевой линией, при этом площадь контакта перерезаемого стебля с почвой будет определяться по выражению

$$S_{ст} = \frac{1}{2} p(r_1 + r_2) \sqrt{l^2 + (r_1 + r_2)^2}, \quad (11)$$

где r_1 и r_2 – соответственно радиус основания и вершины перерезаемого стебля, м;
 l – длина перерезаемого стебля, м.

Рисунок 3 – К определению площади контакта стебля с почвой

Подставляя выражение (10) в (9), получим величину сопротивления почвы, которая будет иметь вид

$$P_{почвы} = \frac{1}{2} p T_{почвы} (r_1 + r_2) \sqrt{l^2 + (r_1 + r_2)^2}. \quad (12)$$

Окончательно условие перерезания стебля примет вид

$$F_y < \frac{3\alpha R_y IEJ}{b^2 a^2} + \frac{m_{ст} \omega_y^2 R_y}{\alpha} + \frac{1}{2} p T_{почвы} (r_1 + r_2) \sqrt{l^2 + (r_1 + r_2)^2}. \quad (13)$$

Левую часть выражения (13) можно записать в следующем виде:

$$F_y = m_y w_y^2 R_y, \quad (14)$$

где m_y – масса измельчающего узла, кг.

Подставляя выражение (14) в (13) и проводя преобразования, получим:

$$R_y = \frac{\frac{1}{2} T_{\text{почвы}} p(r_1 + r_2) \sqrt{l^2 + (r_1 + r_2)^2} \alpha b^2 a^2}{m_y w_y^2 \alpha b^2 a^2 - 3 \alpha^2 l E J - m_{\text{ст}} w_y^2 b^2 a^2}. \quad (15)$$

Выражение (15) показывает зависимость величины радиуса измельчающего узла от конструктивно-технологических параметров процесса, биометрических параметров стеблей кукурузы и твердости почвы при соблюдении условия необходимой величины резания. Следует отметить, что зависимость (15) является transcendентной, поскольку величина угла α зависит от радиуса измельчающего узла. При этом ограничением является его скорость, которая не может быть выше скорости движения агрегата, поскольку вращение происходит за счет его взаимодействия с почвой. Таким образом, соотношение радиуса измельчающего узла и его угловой скорости так же взаимосвязаны между собой. Однако, задаваясь исходными параметрами, можно определить радиус измельчающего узла, что при проектировании сельскохозяйственных машин будет незаме-

ним. Графическое представление указанной зависимости представлено на рисунке 4.

Для примера зададимся исходными данными из справочной литературы [8, 9]:

- длина перерезаемого стебля $l = 0,3$ м;
- длины участков, на которые перерезается стебель, $a = 0,15$ м, $b = 0,15$ м;
- радиус основания и вершины перерезаемого стебля $r_1 = 0,012$ м, $r_2 = 0,009$ м;
- модуль упругости стебля кукурузы $E = 2117$ МПа;
- момент инерции стебля $J = 0,3926 D^3 \delta = 0,1628 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$, где δ – толщина стенки стебля, м;
- твердость почвы $T_{\text{почвы}} = 981000$ Па;
- угловая скорость измельчающего узла, $\omega_y = 8\pi$ рад/с;
- масса стебля, приведенная в точку взаимодействия, $m_{\text{ст}} = 0,1$ кг;
- величина угла, пройденная ножом измельчающего узла при перерезании стебля, $\alpha = \pi/36$ рад;

Подставляя исходные данные в выражение (15), получим $R_y = 0,219$ м. Следует отметить, что, используя полученное значение радиуса в выражении $V_a = V_y = w_y R_y$, величина рассчитанного значения угловой скорости при заданной скорости движения агрегата не будет соответствовать величине взятой для расчета.

Рисунок 4 – Зависимость радиуса измельчающего узла от конструктивно-технологических параметров

Данный факт легко объяснить пробуксовкой измельчающего узла в почве при его работе.

Из рисунка 4 видно, что график зависимости радиуса измельчающего узла от угловой скорости представляет собой гиперболическую зависимость. Проанализировав представленные графики, можно сделать вывод, что на величину радиуса измельчающего узла наибольшее влияние имеет его масса. Так, согласно графикам 1, 3 и 4, увеличение массы от 50 до 110 кг позволяет уменьшить радиус режущего узла практически в 4 раза при той же угловой скорости. Согласно графику 2, увеличение диаметра перерезаемого стебля на 6 мм приводит к необходимости увеличения диаметра приблизительно на 20 % при той же угловой скорости. Согласно графикам 5 и 6, при увеличении длины перерезаемого стебля и уменьшении твердости почвы также необходимо увеличивать радиус измельчающего узла. Проанализировав представленные графические зависимости, можно сделать вывод, что при проектировании измельчающего узла имеет смысл предусмотреть возможность увеличения его массы, что будет увеличивать его центробежную силу. В качестве другого регулируемого параметра можно предусмотреть изготовление ножей с несколькими местами закрепления. Тогда путем перестановки ножа можно будет изменять радиус измельчающего узла. Изменение данных параметров фактически позволит регулировать измельчающий узел на заданные почвенно-климатические и технологические условия при соблюдении условия перерезания стеблей.

Помимо радиуса измельчающего узла, при его проектировании также необходимо установить количество ножей. Число ножей должно быть таким, чтобы длина резания лежала в агротехнических пределах, которые рекомендуем брать равными 5–10 см [10]. Для качественного измельчения крупностебельных пожнивных остатков наиболее рационально применять из-

мельчающие узлы с винтовым расположением ножей. Ножи на таком измельчающем узле можно расположить под углом, как к направлению движения, так и к перпендикуляру относительно его. Это позволит создавать фиксированные углы заземления и исключить выскальзывание стеблей.

Наиболее простым с точки зрения технологии изготовления является способ расположения ножей параллельно к оси вращения измельчающего узла (рис. 5). Рассмотрим наиболее простой случай, когда стебли располагаются перпендикулярно относительно оси вращения узла.

При таком расположении количество ножей зависит от отрезка AB , на который в свою очередь будет оказывать влияние величина заглупления измельчающего узла h . Тогда число ножей на узле при соблюдении агротехнических требований на измельчение крупностебельных пожнивных остатков будет определяться по выражению

$$n = \frac{2\pi}{\arcsin \frac{AB}{R_y}}, \quad (16)$$

где n – число ножей, шт.;

AB – величина измельчения пожнивных остатков, согласно агротехническим требованиям $AB = 5–10$ см.

Графически указанная зависимость представлена на рисунке 6.

Рисунок 5 – Схема к определению числа ножей измельчающего узла

Рисунок 6 – График зависимости числа ножей от длины измельчения и радиуса измельчающего узла

Проанализировав график на рисунке 6, можно сделать вывод, что зависимость носит прямолинейный характер, а при проектировании измельчающего узла необходимо принимать количество ножей между указанными прямыми.

Для повышения эффективности работы измельчающего узла при его проектировании необходимо ориентироваться на допустимую скорость движения агрегата, биометрические

параметры пожнивных остатков и твердость почвы. При этом регулировка измельчающего узла под условия эксплуатации возможна за счет установки дополнительных балластных грузов на него, а также изготовления ножей с возможностью их крепления на разном расстоянии от оси вращения. Представленные теоретические зависимости позволяют определить конструктивные и регулируемые параметры измельчающего узла.

Литература

1. Богус А. Э. Анализ причин неравномерного распределения посевного материала в распределительных системах зерновых пневматических сеялок с центральным дозированием // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. по материалам 72-й науч.-практ. конф. преподавателей по итогам НИР за 2016 г. (г. Краснодар, 29 марта, 2017 г.) / КубГАУ. Краснодар, 2017. С. 281–282.
2. Ротационные дисковые рабочие органы – как базовый элемент в комбинированных агрегатах для обработки почвы и посева / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, О. В. Данюкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 91. С. 465–497.
3. Заглубляющая способность дисковых борон и лузильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, В. В. Кравченко // Сельский механизатор. 2013. № 11 (57). С. 14–15.
4. Влияние обеспеченности техникой на экономические показатели растениеводства / А. П. Соколова, Ю. К. Кастиди, Г. Ф. Бершицкая, М. Е. Трубилин // Сельский механизатор. 2015. № 2. С. 22–23.
5. Кастиди Ю. К., Крепышев Д. А. Экономическая эффективность обеспеченности товаропроизводителей Краснодарского края сельскохозяйственной техникой // Труды / Кубанский государственный аграрный университет. 2011. № 28. С. 39–42.
6. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е. С. Босой, И. И. Смирнов, О. В. Верняев, Е. Г. Султаншах. М. : Машиностроение, 1978. 568 с.
7. Ковалев Н. Г., Хайлис Г. А., Ковалев М. М. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства). М. : ИК «Родник», журнал «Аграрная наука», 1998. 208 с.
8. Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашвили В. И. Сопротивление материалов : учеб. пособ. 2-е изд., испр. М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2005. 544 с.
9. Лукьянова И. В. Анализ видовых и сортовых особенностей устойчивости стеблей злаковых культур к полеганию с учетом их физико-механических свойств и архитектоники для использования в селекции :

References

1. Bogus A. E. Analysis of the causes of uneven distribution of sowing material in distribution systems of grain pneumatic drills with Central dosing // Scientific support of agro-industrial complex : collection of scientific papers on the materials of the 72-th scientific-practical conference of teachers on the results of research work for 2016 (Krasnodar, March 29, 2017) / KubSAU. Krasnodar, 2017. P. 281–282.
2. Rotating disk working bodies – as a basic element in combined machines for soil tillage and sowing / E. I. Trubilin, K. A. Sokht, V. I. Konovalov, O. V. Danyukova // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2013. № 91. P. 465–497.
3. Deepening ability of disc harrows and hoeing plough / E. I. Trubilin, K. A. Sokht, V. I. Konovalov, V. V. Kravchenko // Agricultural Mechanizer. 2013. № 11 (57). P. 14–15.
4. The impact of security technology on the economic performance of crop production / A. P. Sokolova, Yu. K. Castidi, G. F. Bershitsky, M. E. Trubilin // Agricultural Mechanizer. 2015. № 2. P. 22–23.
5. Castidi Yu. K., Krepyshchev D. A. Economic efficiency provision of producers with agricultural machinery in the Krasnodar region // Proceedings / Kuban State Agrarian University. 2011. № 28. P. 39–42.
6. Theory, design and calculation of agricultural machines / E. C. Bosoy, I. I. Smirnov, O. V. Vernaev, E. G. Sultan-Shakh. M. : Machine Building, 1978. 568 p.
7. Kovalev N. G., Khaylis G. A., Kovalev M. M. Agricultural materials (species, composition, properties). M. : IK «Rodnik», Journal «Agricultural Science», 1998. 208 p.
8. Gorshkov A. G., Troshin V. N., Shalashvili V. I. Resistance of materials : textbook. 2nd edition, corrected by. M. : FIZMATLIT, 2005. 544 p.
9. Lukyanova I. V. Analysis of species and varietal characteristics of the stability of the stalks of cereal crops to lodging, taking into account their physical and mechanical properties and architectonics for use in breeding: abstract of the thesis for Doctor of Biological Sciences. Krasnodar, 2008. 51 p.

- автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Краснодар, 2008. 51 с.
10. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве / под ред. В. И. Анискина и А. А. Артюшкина. М. : Росинформагротех, 2005. 271 с.
10. Initial requirements for basic machine technological operations in crop production / edited by V. I. Aniskin and A. A. Artyushkin. M. : Rosinformagrotech, 2005. 271 p.