

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРИЙ РАБОТЫ РОТАЦИОННОГО РЕЖУЩЕГО АППАРАТА КОСИЛКИ ДЛЯ СКАШИВАНИЯ СИДЕРАТОВ В МЕЖДУРЯДЬЯХ МНОГОЛЕТНИХ НАСАЖДЕНИЙ

Догода П.А., д.с-х.н., профессор

Красовский В.В., аспирант

ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет»

В статье представлен анализ теоретических предпосылок для обоснования работы ротационного режущего аппарата косилки для скашивания сидератов в междурядьях многолетних насаждений. Произведен обзор существующих теорий и результатов исследований различных ученых как отечественных, так и зарубежных, которые занимались изучением данного вопроса, созданием теории расчета технологических и конструктивных параметров ротационного режущего аппарата. Теория работы роторного рабочего органа, осуществляющий безопорный срез, имеет множество различий, так как оценка работы механизмов осуществлялась в различных условиях, конструкции машин отличались друг от друга, скашиваемый материал был неоднороден и имел различные физико-механические свойства.

Ключевые слова: косилка, ротационный режущий аппарат, сидераты, многолетние насаждения.

Уборка травостоя в междурядьях многолетних насаждений является одной из наиболее трудоемких и энергоемких операций в комплексе по уходу за садами и виноградниками. Для скашивания сидератов машиностроению необходимо выпускать косилки, функциональные и эксплуатационные показатели которых должны отвечать уровню наилучших мировых аналогов.

Повышение качественных показателей процесса кошения сидератов в междурядьях многолетних насаждений является комплексной научно-технической проблемой, решение которой должно базироваться на поиске новых конструктивных решений рабочих органов, требующих теоретического обоснования их параметров и экспериментального подтверждения в проведенных исследованиях.

В настоящее время широкое распространение получили косилки с ротационными режущими аппаратами, у которых ножи могут вращаться в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Такие косилки являются наиболее рациональными для применения их в садах и на виноградниках. Вращающиеся ножи способны обеспечивать не только срез растений, но и их измельчение.

Обзор литературы. Отечественные ученые, как и зарубежные, занимались исследованием процесса бесподпорного резания, созданием теории расчета технологических и конструктивных параметров ротационного режущего аппарата. Основная работа была направлена на определение одного из главных параметров рабочего органа – оптимальной скорости, при которой осуществляется бесподпорный срез растений. Академики В.П. Горячкин, А.Ю. Ишлинский, профессора М.Б. Угланов, В.А. Желиговский, В.И. Фомин, Ю.Ф. Новиков, С.В. Мельников и другие отечественные ученые, а также зарубежные - Чанселор У., Принц Р., Феллер Р., МакРандал Д. и МакНалти П. занимались изучением вопроса бесподпорного среза растений. Основные условия для осуществления бесподпорного среза стеблевых растительных культур, или с так называемой инерционной опорой, были впервые аналитически рассмотрены академиком В.П. Горячкиным [1], относительно отдельного свободно расположенного стебля, растущего из почвы. В последующем этот вопрос рассматривался Е.М. Гутьяром [2], А.Ю. Ишлинским [3], а также был предметом фундаментальных исследований И.Ф. Василенко [4], Н.Ю. Резника [5], Е.С. Босого [6].

Для среза травостоя в междурядьях многолетних насаждений применяются косилки с роторными режущими аппаратами, которые осуществляют обычный скользящий срез плоским, круглым горизонтальным, наклонно расположенным или свободно шарнирно закрепленным ножом. Простота конструкций и высокое качество процесса среза обуславливают широкое применение таких аппаратов для различных сельскохозяйственных культур.

При разработке новой теории ротационного режущего аппарата классическая теория бесподпорного среза стеблевых культур может иметь с ней много общего. Однако, в результате отличия физико-механических свойств срезаемых растений и условий работы косилки, особенно в условия Крымского агрофона (запутанный травостой, наличие остатков грубых веток и лозы в междурядьях, каменистые неровные почвы и др.) отдельных конструктивных отличий, может иметь ряд особенностей.

Поэтому, при создании теории режущего аппарата ротационной косилки для скашивания сидератов в междурядьях многолетних насаждений, могут быть использованы основные положения классической теории бесподпорного среза зеленой массы ротационным аппаратом с вертикальной осью вращения, которая наиболее обстоятельно разработана Е.С. Босым [6].

Теория работы роторного рабочего органа, осуществляющий бесподпорный срез, имеет множество различий, так как оценка работы механизмов осуществлялась в различных условиях, конструкции машин отличались друг от друга, скашиваемый материал был неоднороден и имел различные физико-механические свойства. Вопрос взаимодействия ножа со свободно стоящим стеблем впервые рассмотрен академиком В.П.Горячкиным. Он определил, что скорость V_n ножа, необходимая для излома стебля:

$$V_H = K_1 \sqrt{\frac{q_1}{m_c}} \quad (1)$$

где K_1 -отгиб стебля; q_1 - коэффициент упругости стебля; m_c - масса стебля.

Согласно теории Е.С.Босого свободно стоящий стебель без опоры представляют как консольную балку, жестко закрепленную в основании и подвергающуюся действию силы R со скоростью V на высоте резания H (рисунок 1).

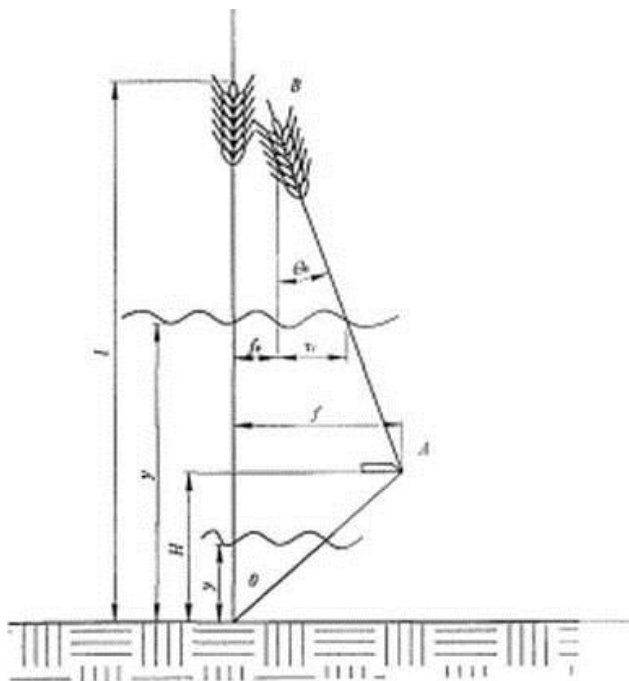


Рис. 1. Схема безопорного резания

Во время контакта с роторным режущим аппаратом процесс взаимодействия является ударом, при котором возникают упругие колебания. Данные колебания распространяются по стеблю со скоростью выше 30 м/с в форме продольных и поперечных волн [9]. Сен-Венан и Нейман занимались изучением данного процесса. В результате своих исследований они рассчитали теоретически, что в телах стержневой формы под воздействием удара возникают изгибно-сдвиговые напряжения.

$$\sigma = \frac{E_2 V^2}{\frac{E_2}{\rho_2^*} + \frac{E_1 E_2}{E_1 \rho_2^*}} = \frac{E_2 \rho_2^* V^2}{1 + \frac{E_2 \rho_2^*}{E_1 \rho_2^*}} \quad (2)$$

где: E - модуль упругости; ρ^* - плотность материала; v - скорость распространения продольных колебаний; V - скорость смещения тела после столкновения (1- толкающее тело, 2 - толкаемое тело).

Наличие напряжения не приводит к излому стебля. Излом стебля происходит из-за поперечной деформации, которая вызывается этим напряжением.

Поперечную деформацию в стебле выражают в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\nu}{E} \sigma \quad (3)$$

где: ν - коэффициент Пуассона.

Рейнерс, на основе этих зависимостей, теоретически рассчитал критическую скорость излома для различных растительных материалов [10]:

$$V = \frac{\varepsilon k}{\nu} \left(1 + \frac{E_2 \rho_2^*}{E_1 \rho_1^*} + \frac{E_2}{\rho_2^*} \right) \quad (4)$$

Из этой зависимости видно, что критическая скорость излома в главной мере зависит от физико-механических свойств соударяющихся тел.

Согласно исследованиям Е.С. Босого срезание стеблей происходит при динамическом воздействии режущего элемента [5].

Условие среза стебля при действии на него режущего элемента с определенной скоростью записывают в виде [5]:

$$R_S < P_{из} + P_{ин} + P_{в} + P_c \quad (5)$$

где R_S - сила, необходимая для перерезания стебля, Н; $P_{из}$ - сопротивление стебля изгибу, Н; $P_{ин}$ - сила инерции стебля, Н; $P_{в}$ - сопротивление воздуха при отклонении стебля, Н; P_c - сопротивление отклонению стебля рядом стоящих стеблей, Н.

При определении скорости резания одиночного стебля силы $P_{в}$ и P_c не учитывают [5]. За время удара Δt стебель отклонится на величину $f = V_H \Delta t$ и займет положение, показанное на рисунке 1.1. С учетом этого, сопротивление стебля отгибу, $P = 3fEI/H^3 = 3V_H \Delta t \cdot EI/H^3$, где EI - жесткость стебля.

Так как среднее ускорение стебля, $j = V_H/\Delta t$, то сила инерции $P_u = m \cdot V_H/\Delta t$, где m - приведенная в точку удара масса стебля. Поэтому условие среза стебля принимает вид:

$$R_S < P + mj = 3V_H \Delta t \cdot \frac{EI}{H^3} + m \cdot V_H/\Delta t \quad (6)$$

Скорость ножа, необходимая для перерезания свободно стоящего стебля в период первого соударения, когда отклонение стебля минимально, определяется по выражению [5]:

$$V_H = \frac{\alpha_{max}(q_{np} + k)}{q_{np} t_p + \frac{k}{\omega} \sin \omega t_p} \quad (7)$$

где: $\alpha_{max} = R_S/k$ - максимальное значение упруго-пластической деформации, см; q_{np} - приведенный коэффициент упругости стебля, кг/см;

k - коэффициент местной жесткости; t_p - время, необходимое для перерезания свободно стоящего стебля, с.

Из данных зависимостей можно сделать вывод, что минимальную скорость резания V_H (минимальная скорость резания V_H встречается в литературе как критическая скорость резания $V_{кр}$), определяют физико-механические свойства срезаемого материала (жесткость, плотность, величина отгиба стебля при резании, модуль упругости и др.).

Из исследований [5] видно, что критическая скорость резания $V_{кр}$ при безопорном резании растений находится в пределах 6... 10 м/с. Однако, с увеличением этой скорости $V_{кр}$ до 25 м/с усилие резания значительно

снижается. Дальнейшее увеличение скорости приведет к незначительному снижению этого усилия. Из условия снижения мощности для привода ротационного режущего аппарата, величину скорости резания принимают равной [5]:

$$V_p = (3 \dots 5)V_{кр} \quad (8)$$

Экспериментами по определению критической скорости резания $V_{кр}$ растений занимались и другие отечественные и зарубежные ученые. Опыты Е.М. Гутьяра показали, что критическая скорость резания для тонкостебельных культур находится в пределах 8-16 м/с [2]. И.Ф.Василенко [5] определил обратную зависимость между критической скоростью резания и сопротивлением стебля резанию. И.С. Сулейманов и А.М. Карланов рассчитали оптимальное необходимое число оборотов для среза стебля. При создании формулы для упругой деформации стебля учли факт изменения площади поперечного сечения стеблей растений по высоте [11]. Они вывели следующую зависимость для минимального числа оборотов ротационного режущего аппарата:

$$n = \frac{30l_c}{\pi} \sqrt{a \frac{EJ}{J_{cm}k}} \quad (9)$$

Сравнение имеющихся теорий, результатов исследований показали существенные различия в определении оптимальной окружной скорости для ротационного режущего аппарата (т.е. минимальной скорости режущей кромки, для обеспечения мгновенного разделения на отдельные части свободно стоящих стеблей растений).

Исследования МакРандала показывают, что критические скорости безопорного среза стеблей растений составляет примерно 20 м/с [20]. По Фомину верхние значения критической скорости, при которой высота среза практически равна высоте стерни, находятся в области 45-60 м/с. Согласно работы [21] можно отметить, что для ножей с острозаточенной режущей кромкой оптимальная скорость резания составляет 60 м/с, когда для затупленных - 80 м/с. В работе [12] автор отмечает, что оптимальная окружная скорость ножей будет зависеть от скорости и объема подачи скашиваемого материала в режущий аппарат. Чем больше будет подача массы, тем выше будут предельные значения скорости режущей кромки ножей. Например: при подаче 4.2 кг/с - оптимальная скорость резания будет равна 50-60 м/с. В.И. Фомин утверждает, что скорость среза выше верхней критической является нецелесообразной, так как влечет за собой увеличение энергетических затрат, не оказывая дополнительного положительного эффекта на качество выполнения рабочего процесса [14]. В работе Корниловича Р. А. произведено сравнение энергоемкости кошения, из которого видно, что результаты проведенных исследований различными учеными сильно отличаются друг от друга (рисунок.2).

На рис. 2 представлен график зависимости затрачиваемой мощности на кошение $N_{уд}$ от скорости резания V_p , полученные учеными [14]: 1 - Мак Рендалом, 2 - Каифашем Ф., 3 - Карпенко М.И.

Некоторые работы зарубежных исследователей [16] рекомендуют как наиболее оптимальную скорость бесподпорного резания в области 80-90 м/с, объясняя это тем, что при таких скоростях затрачиваемая энергия на весь процесс скашивания и укладывания скошенной массы в валок минимальна. Но осуществление этого предложения ускорит износ различных элементов конструкции агрегата (рабочих органов, привода и т.п.) и повысит требования к точности его изготовления, что неизменно повлияет на стоимость всей машины.

На рис. 2 представлен график зависимости затрачиваемой мощности на кошение $N_{уд}$ от скорости резания V_p , полученные учеными [14]: 1 - Мак Рендалом, 2 - Каифашем Ф., 3 - Карпенко М.И.

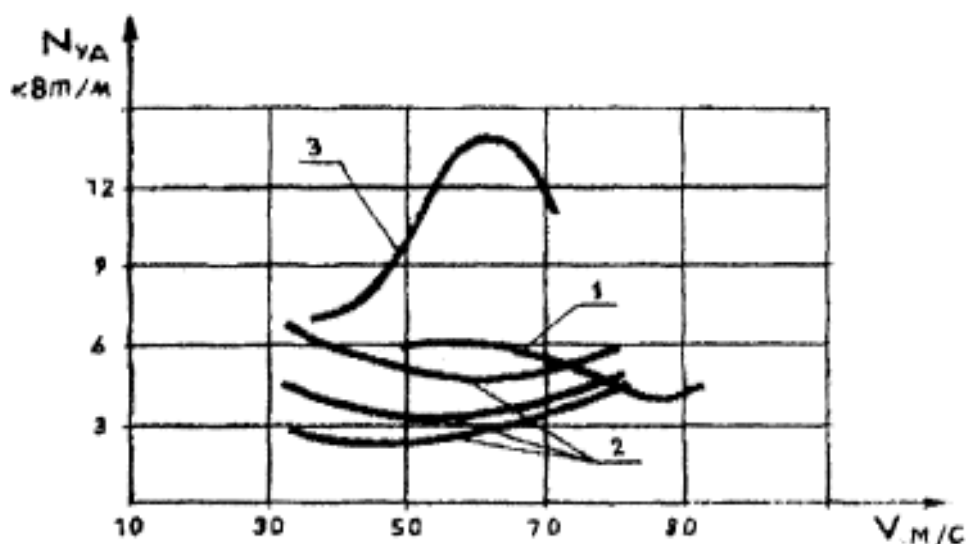


Рис. 2 Сравнительные результаты энергоёмкости кошения

Некоторые работы зарубежных исследователей [16] рекомендуют как наиболее оптимальную скорость бесподпорного резания в области 80-90 м/с, объясняя это тем, что при таких скоростях затрачиваемая энергия на весь процесс скашивания и укладывания скошенной массы в валок минимальна. Но осуществление этого предложения ускорит износ различных элементов конструкции агрегата (рабочих органов, привода и т.п.) и повысит требования к точности его изготовления, что неизменно повлияет на стоимость всей машины.

Исследования американской фирмы "Дир энд Компани" определили, что снижение скорости резания хотя бы наполовину, приведет к уменьшению затрачиваемой энергии примерно на четверть [15].

На ряду со скоростью резания, немало важным фактором, влияющим на качество и энергоёмкость резания стебля, является угол наклона режущей кромки в плоскости резания. В различных работах этот показатель

обосновывается по-разному. На пример в работах Ивашко А.А., Макарова О.В., Розинцева В.Д., сизова О.А. рекомендуется наклонять нож назад, для уменьшения удельной силы и энергии резания, а в работе Погорелца А.Н. - вперед, так как при таком расположении режущей кромки наблюдаются более благоприятные условия резания. Имеют место теории, в которых обосновывается, что при расположении ножа без наклона достигается минимальные энергозатраты. Н.Е.Резник экспериментальным путем установил зависимость удельной энергоемкости резания от угла наклона ножа. Эти зависимости позволили определить угол наклона ножа в $35...40^\circ$, при котором достигается минимум затрат энергии. Он объяснил это явление трансформацией угла заточки ножа [5].

Из исследований Т.И.Егоровой видно, что при уменьшении угла заточки ножа наблюдается уменьшение усилий среза стеблей [19]. Также и В.И.Фомин указывал на то, что с уменьшением угла заточки критическая скорость среза снижается [8]. По его исследованиям, при наклоне ножа в пределах от $0,61$ до $0,26$ рад. требования будут удовлетворены в наиболее полной степени. Исследования в этой области велись и зарубежными учеными. Д.М.Рандаль и П.Б.Нульти рекомендуют для уменьшения энергоемкости резания на $5...10\%$ конец ножа срезать под углом 45° к его режущей кромке [17].

Несмотря на различный подход к обоснованию расположения заточки ножа, многие исследователи рекомендуют нижнюю заточку ножа [6]. Б.И.Штомпель указал, что при нижней заточке критическая скорость уменьшается на 25% , а Е.С.Босой считает, что уменьшение сил, изгибающих нож вниз оказывает положительное воздействие на рабочий орган и процесс скашивания растений. Но при нижней заточке ножей увеличится расщепление стерни из-за воздействия на нее фаски ножа. Поэтому, с точки зрения качества среза предпочтительна верхняя заточка ножей [13].

Форму режущей кромки обуславливают как агротехнические (равномерность высоты стерни, минимизация потерь при скашивании), так и энергетические требования [7]. По В.Д. Желиговскому, Е.С. Босому [5] рациональный угол заточки можно определить только экспериментальным путем.

Изложенные выше теоретические и экспериментальные данные сильно различаются друг от друга, по-этому только частично могут быть использованы при обосновании параметров и режимов работы ротационного режущего устройства. Это объясняется тем, что авторы проводили эксперименты и наблюдения при различных условиях над растительными материалами, разным по своим механическим свойствам.

Рассчитывая оптимальную скорость ротора, необходимую для перерезания стебля, существующие формулы не принимают в расчет силу воздушного потока, который создается при вращении роторов, его влияние на жесткость стебля, подъёмную силу. А ведь эта сила поднимает вверх остатки ветвей деревьев, виноградной лозы, стебли скашиваемой травы. Поднимая примятый травостой воздушный поток обеспечивает дополнительную жесткость стебля.

Влияние воздушного потока, создаваемого ножами ротора на процесс срезания резания и на весь технологический процесс в целом до конца не изучен. Воздушный поток обеспечивает подъем примятого и препутанного травостоя, остков веток и лозы, тем самым улучшая измельчение материалов. Ротационный режущий аппарат осуществляет безопасный срез, но создание новой конструкции рабочих органов,

обеспечивающих дополнительный воздушный поток, может создать дополнительную опору, то есть облегчить процесс перерезания стебля, за счет снижения отгиба стебля при контакте с ножами ротора. Восходящий воздушный поток, выпрямляя стебель, уменьшает площадь сечения стебля в плоскости соприкосновения лезвия ножа со стеблем растения $D_1 > D_2$ (рисунок 3)

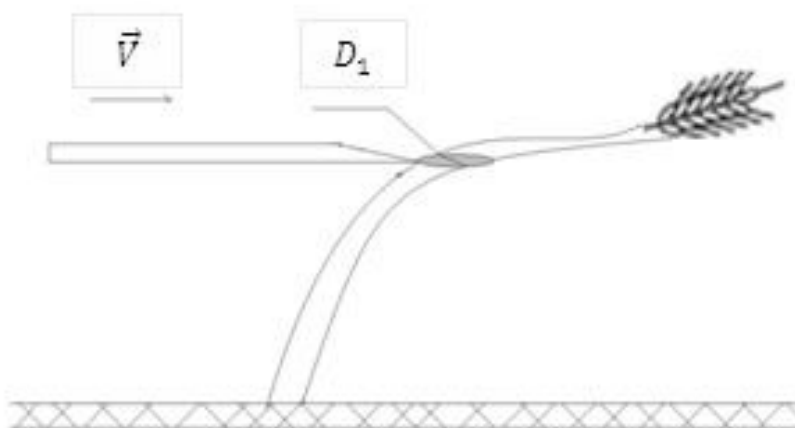


Рис. 3(а) Сечение наклоненного стебля

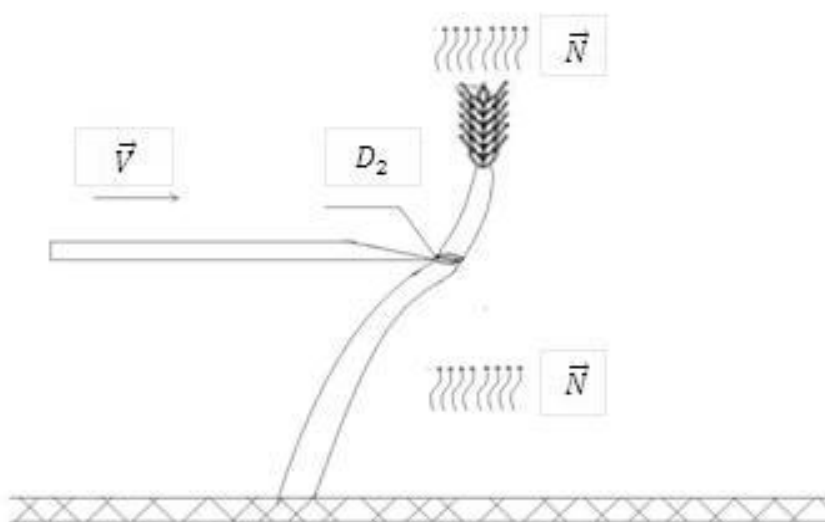


Рис. 3(б) Сечение стебля, выпрямленного воздушным потоком: \vec{V} - направление движения ротора; D_1 - диаметр сечения наклоненного стебля; D_2 - диаметр сечение стебля, выпрямленного воздушным потоком; \vec{N} – направление движения воздушного потока.

Для перерезания меньшего сечения необходимо меньше энергии. Снижение энергии на срез одного стебля может повлечь за собой уменьшение минимально необходимой скорости вращения ротора, и снижение энергозатрат в целом на выполнение технологического процесса скашивания сидератов в междурядьях многолетних насаждений.

Выводы:

- использование косилок с роторным рабочим органом для кошения сидератов в междурядьях многолетних насаждений по эффективности

работы и качеству среза являются оптимальными для работы в междурядьях многолетних насаждений;

- существующие исследования, посвященные работе ротационного режущего аппарата не дали устойчивых результатов, так как условия проведения опытов сильно отличались друг от друга;

- процесс обработки междурядий, задерненных многолетними насаждениями, нуждается в более детальном исследовании;

- сравнительный анализ имеющихся теорий, результатов исследований показали существенные различия в обосновании параметров и режимов работы ротационного режущего аппарата;

- теория работы ротационного режущего аппарата требует уточнений с учетом влияния воздушного потока, создаваемого ножами ротора на процесс скашивания сидератов в междурядьях многолетних насаждений.

Список использованных источников:

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений. Том третий. Изд. 2-е. - М.: Колос, 1968, 384 с.

2. Гутьяр Е.М. К теории срезания стеблей. - Сельхозмашина, 1931, №7, с.12-13.

3. Ишлинский А.Ю. Задача о скорости косьбы злаков. - Сельхозмашина, 1937, №5-6, с. 8-12.

4. Василенко И.Ф. Теория режущих аппаратов жатвенных машин. Труды ВИСХОМ. - М.: 1937, №5, с.7-14.

5. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. - М.: Машиностроение, 1975, 311 с.

6. Босой Е.С. Режущие аппараты уборочных машин. Теория и расчет. - М.: Машиностроение, 1967, 167 с.

7. Сальников С.В. Ротационная косилка для технологий залуженного содержания междурядий в многолетних насаждениях.- Диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук.2000 , 94 с.

8. Фомин В.И. Обоснование параметров косилочного режущего аппарата сегментно-дискового типа. - Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук, Ростов н/Д, 1963, - 22 с.

9. Новиков Ю.Ф. Теория и расчет ротационного режущего аппарата с рубящими рабочими органами. - «Сельхозмашина», 1957, №8, с.1-8.

10. Reiners E. Der Mechanismus der Prallzerkleinerung beim geraden, zentralen Stoss und die Anwendung dieser Beanspruchungs art bei der Zerkleinerung von sproden Stoffen. Koin, 1962

11. Сулейманов И.С., Карланов А.М. К определению оптимальной скорости вращения рабочих органов стеблеизмельчительного аппарата. Ж-л «Тракторы и сельхозмашины», 1968, №1, - С. 39-41.

12. Каифаш Ференц. Обоснование динамических параметров и режима работы ротационного режущего аппарата. Автореф. дис. на соиск. ученой степ, канд. техн. наук, М., 1982. - 16 с.

13. Карпенко М.И. Обоснование оптимальных технологических параметров ротационного режущего аппарата косилок с пониженной скоростью ножей. Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук, Глеваха, 1984. 17 с.

14. Корнилович Р. А. Совершенствование режущего аппарата ротационной косилки. Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук, Рязань, 2007

15. Машины и оборудование для заготовки сена и кормов: Сборник докладов семинара В/О "Союзсельхозтехника". - М., 1977, с. 151-161.

16. Vanno T., Ogawa T. Studies on the gutting energy of the rotary mower. - J. Soc. Agr. Mach., Japan, 1979, N4, p.524 (англ.),

17. Цымбал А.А., Сальников С.В., Драный А.В. Роторная садовая косилка // Сборник научных трудов «Плодоводство и ягодоводство России», ВСТИСП, 1996, -С 222-224.

18. Дацишин А.В. Исследование зависимостей между нормальными, касательными и общими усилиями резания: Труды УСХА. - Киев, 1979, 224, с. 91-94.

19. Егорова Т.И. Исследование влияния параметров режущего инструмента на процесс резания лезвием: Автореф. дис... канд. техн. наук. - М., 1949. - 18 с

20. Mc Randal D.M., Mc Nalty P.V. Mechanical and physical properties of grasses. - "Trans. Asae", 1980, №4, p. 816, (англ.).

21. O'Dogherty M.I. A review of research on forage chopping. - "I. of agric, engng. res.", 1982, №27, p. 268-289, (англ.).

Догода П.О., Красовський В.В.
Аналіз існуючих теорій роботи ротацийного різального апарату косарки для скошування сидератів в міжряддях багаторічних насаджень

У статті представлений аналіз теоретичних передумов для обґрунтування роботи ротацийного різального апарату косарки для скошування сидератів в міжряддях багаторічних насаджень. Зроблено огляд існуючих теорій і результатів досліджень різних вчених як вітчизняних, так і зарубіжних, які займалися вивченням даного питання, створенням теорії розрахунку технологічних і конструктивних параметрів ротацийного різального апарата. Теорія роботи роторного

Dogoda P.A., Krasovskiy V.V.
Analysis of the existing theories of the rotary mower cutting unit for cutting green manure crops between rows of perennial crops

The paper presents an analysis of the theoretical assumptions to underpin the rotary mower cutting system for cutting green manure crops between rows of perennial crops. Performed a review of existing theories and research findings of various scholars, both domestic and foreign, who have been studying the issue, the creation of the theory of analysis of technological and design parameters of the rotary cutting device. The theory of operation of the rotary working body exercising unsupported section, has many differences as well as the evaluation of the mechanisms

робочого органу, який здійснює безпорний зріз, має безліч відмінностей, так як оцінка роботи механізмів здійснювалася в різних умовах, конструкції машин відрізнялися один від одного, скошуваємий матеріал був неоднорідний і мав різні фізико-механічні властивості.

Ключові слова: косарка, ротаційний ріжучий апарат, сидерати, багаторічні насадження.

implemented in different settings, the machine design differed from each other, mowed material was heterogeneous and had different physical and mechanical properties.

Keywords: mower, rotary cutting machine, green manure crops, perennial plantings.