

зывающими внешнюю нормальную нагрузку, напряжения в толще массива почвы, деформацию элементарного объема почвы внутри массива и изменение при этом плотности естественного сложения почвы:

1) нормальное давление движителей на почвы за период взаимодействия с почвой

$$P = rt - qt^2, \text{ где } 0 < t < T;$$

2) изменение напряженного состояния толщ массива почвы при воздействии внешней нагрузки

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2}, \text{ где } \sigma = f(P, z, t);$$

3) плотность почвы после прохода колес

$$p_1 = \frac{p_0}{1 - \frac{p_0 S}{2k} \ln \frac{p_0 + \sigma_{(P,z,t)}}{p_0 - \sigma_{(P,z,t)}}}.$$

Константы приведены в [3].

Заключение

Используя предлагаемую математическую модель уплотнения торфяно-болотной почвы, можно решать задачи, связанные с оценкой воздействия на почву ходовых аппаратов эксплуатируемых и проектируемых кормоуборочных машин.

Литература

1. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1976. – 247 с.
2. Скотников В. А., Пономарев А. В., Климанов А. В. Проходимость машин. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 326 с.
3. Кацыгин В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий. – В кн.: Вопросы с.-х. механики, т. XIII. Мн.: Урожай, 1964, с. 31-64.

УДК 631.352.9:365

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЛЮЩИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА БИЛЬНОГО ТИПА К РОТАЦИОННЫМ КОСИЛКАМ

Шушилов А.А. (БГАТУ),

Яровенко П.В. (НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства)

Обработка трав плющильным устройством бильного типа с целью интенсификации их сушки в настоящее время широко применяется на многих системах машин для скашивания трав. Бильное устройство – барабан с горизонтальной осью вращения протаскивает скошенную траву рабочими органами в зазоре между барабаном и декой, повреждает покровные ткани стеблей и укладывает на стерню для дальнейшей сушки.

Обработка травы осуществляется активной и пассивной частями рабочих органов бильного устройства: активная – рабочие органы V-образной конструкции на барабане, пассивная – дека с профилем рабочей поверхностью.

Сущность процесса обработки травы бильным устройством заключается в следующем. При захвате и последующем движении в образованном барабаном и декой канале стебли под-

вергаются двухстадийному механическому воздействию. На первой стадии происходит разрушение тканей стеблей скользящим (косым) ударом рабочих органов на входе без нарушения целостности стеблей, на второй – последующее повреждение покровных тканей (кутикулы, воскового налета) вследствие трения истиранием о поверхность рабочих органов при прочесывании ими захваченного потока травы, а также о профильную поверхность деки.

Число ударов и связанное с этим протаскивание скошенных растений в зазоре является определяющими критериями обработки: ее интенсивность тем выше, чем больше число ударных воздействий и степень сжатия стеблей в канале между барабаном и декой.

Определим число ударов планками рабочих органов по стеблю при его движении по деке. Растения, движущиеся с меньшей скоростью, чем скорость рабочих органов, подвергаются неоднократным ударам. Предположим, что их движение по деке происходит в плоскости, перпендикулярной к оси вращения барабана. Рабочие органы наносят удары по поступившим в габарит вращающегося барабана стеблям в основном на входе в канал между барабаном и декой. Затем под действием многократно приложенных ударных импульсов стебли затаскиваются и движутся по деке устройства.

Время, за которое стебель длиной $l_{ст}$ с некоторой средней скоростью V полностью войдет в канал устройства:

$$t = \frac{l_{cm}}{V}.$$

За это время по нему будет произведено несколько ударных воздействий. Путь, пройденный рабочими органами при k воздействиях на стебель:

$$l_p = \frac{\pi \cdot D}{Z} \cdot k,$$

где D – диаметр барабана;
 Z – количество рабочих органов в плоскости воздействия на стебель;
 k – число ударов рабочих органов по стеблю.

Тогда время, в течение которого рабочие органы произведут по стеблю k ударов:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{Z \cdot V_p} \cdot k.$$

Приравняв выражения (3.10) и (3.11) и решив полученное равенство относительно k , получим число ударов по стеблю при затаскивании в зазор:

$$k = \frac{l_{cm} \cdot Z \cdot V_p}{\pi \cdot D \cdot V} + 1. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что число ударных воздействий рабочих органов на стебли зависит от количества и окружной скорости рабочих органов, а также от длины самих стеблей. С уменьшением скорости движения стеблей в канале устройства возрастает число ударов по ним.

Для обеспечения дальнейшего выполнения технологического процесса необходимо выполнение условия – поступательная скорость косилки V_n должна быть не меньше окружной скорости рабочих органов барабана V_p , т. е.

$$V_p > V_n.$$

Тогда частота вращения барабана

$$n' = \frac{30 \cdot V_n}{\pi \cdot R}.$$

Приняв максимальную поступательную скорость косилки 4,2 м/с, а радиус барабана 0,3 м, получим

$$n' > \frac{30 \cdot 4,2}{3,14 \cdot 0,3} \approx 134,0 \text{ мин}^{-1}.$$

Учитывая V -образную конструкцию рабочих органов, не обеспечивающих захват растения с первого воздействия вследствие инерции и связанности с остальной массой, необходимую для обработки частоту вращения барабана можно определить путем умножения известной частоты вращения на число ударов рабочих органов по стеблю до их захвата и движения по деке:

$$134,0 k = n,$$

где k – число ударов рабочих органов по стеблю;
 n – частота вращения барабана, мин^{-1} .

Предложим, что для захвата поступивших растений двумя V -образными рабочими органами барабан должен совершить два – три оборота в радиальной плоскости. Необходимая частота вращения при этом составит $540 \dots 800 \text{ мин}^{-1}$.

При выборе частоты вращения барабана необходимо учитывать также вид обрабатываемых растений, поскольку коэффициент трения, а следовательно, и силы трения о рабочие органы при захвате у различных растений разные. Как известно, наибольший коэффициент трения у клевера [59]. С учетом этого, а также особенностей строения и крепления его листьев: состоят из трех лепестков и крепятся на длинных черенках, необходимая частота вращения барабана для обработки клевера должна приближаться к нижней границе, для обработки злаковых культур, имеющих более жесткий и менее облиственный стебель, – к верхней границе указанного выше диапазона.

Для нормальной работы бильного устройства рабочий орган должен сообщать проходящей на его долю порции стеблей такой импульс, при котором она получит ускорение, не меньшее по сравнению с предшествующим движением, т. е. ударные импульсы сообщают стеблям дополнительную к той скорости, которую они уже имели.

Следовательно, растения по деке должны двигаться ускоренно. При этом скорость потока в начале движения – на входе в канал имеет меньшее значение, чем в конце – на выходе ($V_{\text{вх}} < V_{\text{вых}}$). Тогда скорость комля и верхушки одного и того же стебля с учетом его длины в зоне выхода при подаче комлем:

$$V_{\text{ком.}} = \sqrt{V_0^2 + 2a \cdot l_i}; \quad (2)$$

$$V_{\text{верх.}} = \sqrt{V_0^2 + 2a \cdot (l_i + l_{\text{ст}})}, \quad (3)$$

где V_0 – начальная скорость стебля;
 l_i – текущая длина дуги деки;
 a – ускорение движения растения по деке.

Согласно выражению (3), скорость растения с поступившей в канал устройства комлевой частью будет меньше скорости его движения при вхождении верхушки, т. е. при захвате растения и движении в канале на входе $V_{\text{ком.}} < V_{\text{верх.}}$

Линейное перемещение стебля между двумя последовательными ударами

$$l_i = \frac{(V_i + V_{i+1}) \cdot t}{2}, \quad (4)$$

где V_i – скорость стеблей после предшествующего удара;
 V_{i+1} – скорость стеблей в момент удара;
 $t = \frac{\pi \cdot D}{n \cdot V_p}$ – время между прохождением двух соседних рабочих органов.

Как следует из уравнений (2) – (4), линейное перемещение комлевой части стебля по деке между двумя последовательными ударами меньше, чем при ударах по верхушечной. Тогда, исходя из выражения (1), удары по прикорневой части будут наноситься чаще, чем по верхушечной.

При конструкции бильного устройства, обеспечивающей подачу стеблей в зазор ориентированно-комлевой частью вперед, это позволяет осуществлять технологический процесс обработки растительной массы в соответствии с ее физико-механическими и физиологическими свойствами.

В результате воздействия рабочих органов на прикорневую часть растения, поступающую первой и имеющую в начале деки наименьшую скорость движения, происходит более интенсивное разрушение тканей этой части и достигается в последующем ускоренное и более равномерное высыхание всего растения.

Определим скорость, приобретаемую стеблями при движении по деке от взаимодействия с рабочими органами.

Скорость стеблей, взаимодействующих при ударе с рабочим органом на входе в канал, согласно теореме о количестве движения:

$$Q \Delta t = m (V - V_0). \quad (5)$$

где Q – равнодействующая, равная разности сил трения рабочего органа и поверхности деки об обрабатываемую траву;

Δt – продолжительность взаимодействия рабочего органа с травой;

m – масса стеблей, взаимодействующих с рабочим органом;

V_0 – скорость подачи стеблей в устройство;

V – скорость, приобретаемая стеблями при взаимодействии с рабочим органом.

Процесс обработки травы сопровождается сжатием поступающего ее потока в канале между барабаном и декой. Возникающие при этом силы – активная и сила сопротивления формируются вследствие нормального давления сжатия стеблей, т. е. силы трения на поверхности рабочих органов развиваются в зависимости от нормального давления сжатия слоя стеблей.

При определении нормальной силы сжатия стеблей использовали закон сжатия [58]:

$$p = A \cdot e^{c\delta}, \quad (6)$$

где p – нормальная сила сжатия стеблей;

δ – относительное сжатие стеблей;

A, c – постоянные для данной культуры коэффициенты.

Если пренебречь влиянием скорости и удельного давления (закон Кулона), силы трения, возникающие при сжатии и приложенные по касательной к траектории движения стеблей:

активная – между стеблями и планками рабочих органов

$$Q_1 = p \cdot f_1;$$

сопротивления – от трения стеблей по деке

$$Q_2 = p \cdot f_2,$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты трения соответственно между планками рабочих органов и стеблями, между стеблями и поверхностью деки.

Равнодействующая $Q = Q_1 + Q_2$;

$$Q = A \cdot e^{c\delta} (f_1 + f_2). \quad (7)$$

Подставив полученное уравнение в выражение (5), после замены $m = \frac{q}{g} \cdot \Delta t$,

где q – секундная подача травы в устройство, и сокращения в обеих частях равенства времени Δt , получим

$$V = \frac{g}{q} \cdot A \cdot e^{c\delta} (f_1 + f_2) + V_0. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) указывает на зависимость скорости входа затягиваемых в канал устройства стеблей от предшествующего движения – величины секундной подачи, скорости подачи, от входных условий (зазор на входе), фрикционных свойств рабочих поверхностей и обрабатываемого материала.

Определим в выражении (8) значение δ относительного сжатия стеблей.

После захвата и затягивания в зазор толщина потока травы, равная до сжатия Δ , представляет собой сумму величин зазора δ между вершинами рабочих органов и декой и длины планок рабочих органов h_x , погруженных в поток травы.

Таким образом, относительное сжатие в радиальной плоскости стеблей:

$$\delta = 1 - \frac{\delta + h_x}{\Delta} \quad (9)$$

Толщину потока травы, поступающего в устройство, можно выразить равенством

$$q = \Delta \cdot l_1 \cdot V_0 \cdot \gamma,$$

где q – секундная подача травы;

Δ – толщина потока травы, поступающего от режущего аппарата;

l_1 – ширина потока травы;

V_0 – скорость стеблей в потоке;

γ – объемный вес обрабатываемой культуры.

С учетом коэффициента использования длины барабана η толщина потока

$$\Delta = \frac{q}{\eta \cdot l \cdot V_0 \cdot \gamma}, \quad (10)$$

где l – длина барабана.

При определении длины планок рабочих органов, взаимодействующих с травой, возможны два случая: $\Delta \geq h + \delta$ или $\Delta < h + \delta$. В первом – при встрече с потоком планки рабочих органов полностью погружаются в траву, т. е. $h = h_x$, во втором – $h_x = \Delta(1 - \frac{\delta}{h})$.

Значения коэффициентов f_1 и f_2 в выражении (8) зависят от степени сжатия стеблей. Как известно, с увеличением степени сжатия значения коэффициентов f_1 и f_2 , а также разность между ними возрастают [59]. Кроме того, на коэффициент f_2 оказывает влияние профильная поверхность деки.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для адаптации плющильного бильного устройства к свойствам и состоянию обрабатываемой культуры, а также получения необходимой степени обработки наиболее целесообразно изменять величину зазора на входе устройства. В случае, когда этого недостаточно, например, при обработке различных видов культур, технологическую настройку на необходимый режим можно осуществлять путем изменения окружной скорости рабочих органов и последующей регулировки зазора на входе.

Зазор между вершинами планок рабочих органов и поверхностью деки в значительной мере определяет качественные и энергетические показатели работы бильного устройства. Путем изменения величины зазора бильное устройство приспособливают к свойствам и состоянию обрабатываемой культуры.

Согласно теории молотильных устройств [58], при одинаковых по всему углу обхвата зазорах в движущемся по деке потоке материала уменьшаются относительное сжатие и силы трения. Причина уменьшения сил сжатия, а следовательно, и толщины потока травы – повышающаяся с ростом скорости растаскивающая активность барабана.

Изучение процесса движения потока травы в канале устройства с помощью скоростной фотосъемки свидетельствует о нарастании скорости движения растений по деке от входа до выхода из канала устройства.

На рис. 1 показан момент обработки травы, толщина потока которой на входе в канал бильного устройства больше, чем на выходе. При различии зазоров на входе $b_{вх} = 60$ мм и выходе из деки $b_{вых} = 40$ мм разница в толщине движущегося в начале 125 мм и конце деки потока травы составляет 63 мм.

Для обеспечения эффективного воздействия всей рабочей поверхности деки на обрабатываемую траву на экспериментальной лабораторной установке проведены исследования по определению соотношения значений зазоров на входе и выходе из деки. Обработке подвергался клевер красный.

При проведении опытов были приняты следующие соотношения: 1:1 (3/3 см/см); 2:1 (6/3 см/см); 3:1 (9/3 см/см).

В табл. 1 приведена зависимость возможных потерь от соотношения зазоров на входе и выходе между декой и вершинами рабочих органов, полученная по результатам экспериментальных исследований.

Установлено, что с увеличением зазора на входе от 3 до 9 см при неизменном на выходе – 3 см возможные потери клевера несколько снижаются: с 2,86% при соотношении зазоров 1:1 до 2,62% при соотношении 3:1. Уменьшается в основном обивание листьев и соцветий, измельчение стеблей незначительное – 0,14...0,17% от общей массы обработанной травы и практически не зависит от изменения соотношения зазоров.



Рисунок 1 – Движение потока травы в бильном устройстве при

$$V = 18,8 \text{ м/с}, b_{\text{вх}} = 60 \text{ мм}, b_{\text{вых}} = 40 \text{ мм}$$

Таблица 1. Зависимость возможных потерь от соотношения зазоров на входе и выходе между декой и вершинами рабочих органов барабана
(Режим обработки: $V=18,84 \text{ м/с}$, $q=4,0 \text{ кг/с}$, культура – клевер красный)

Значения зазоров вход/выход, см/см	Соотношение зазоров на входе и выходе	Масса пробы, кг	Вид возможных потерь		Суммарные возможные потери, %
			Обивание листьев и соцветий, %	Измельчение стеблей, %	
3/3	1:1	2,0	2,72	0,14	2,86
6/3	2:1	2,0	2,63	0,14	2,77
9/3	3:1	2,0	2,45	0,17	2,62

При проведении опытов ваттметром, включенным в цепь привода электродвигателя установки, замерялась мощность на привод бильного барабана. Полученные результаты свидетельствуют о снижении этой мощности с 2,04 до 1,70 кВт при возрастании соотношения зазоров соответственно от 1:1 до 3:1. Увеличенный на входе в бильное устройство зазор способствует плавному поступлению энергии к обрабатываемому материалу.

Это оказывает положительное влияние на качество выполнения технологического процесса, обеспечивает более равномерное динамическое воздействие рабочих органов на скашиваемую траву по всей поверхности деки и способствует более плавному нарастанию скорости движения стеблей.

Как показали исследования, при соотношении зазоров 1:1 наибольшее силовое давление приходится на часть деки у входа в канал устройства. С увеличением соотношения зазоров точка приложения равнодействующих давлений на деку несколько смещается к ее заднему концу. Это позволяет уменьшить обивание листьев и соцветий в начальный период обработки и при захвате растений.

Для оценки эффективности обработки трав при изменении соотношения зазоров на входе и выходе из деки была проведена контрольная сушка проб обработанной травы (рис. 2).

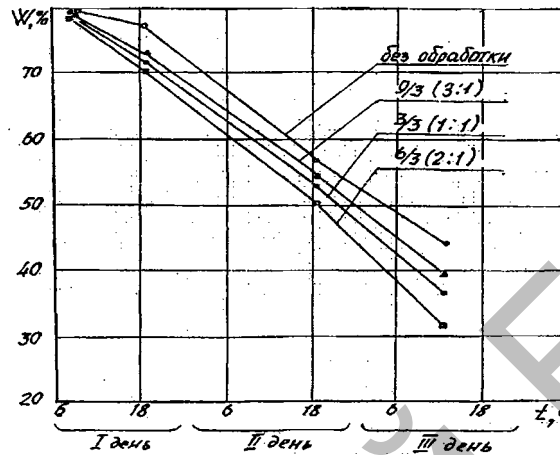


Рисунок 2. Кривые сушки клевера красного, обработанного бильным устройством с соотношением зазоров на входе и выходе: 1:1; 2:1; 3:1

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности сушки травы, обработанной с соотношением зазоров на входе и выходе из деки, близком к 2:1. При изменении соотношения зазоров до 3:1 интенсивность влагоотдачи травы снижается. Процесс сушки в данном случае уступает по интенсивности влагоотдачи сушке травы, обработанной при соотношении зазоров 1:1.

Таким образом, зазор на входе между декой и рабочими органами должен иметь большее значение, чем на выходе. При этом уменьшаются затраты энергии и обеспечивается плавный ее приток к обрабатываемому материалу и, следовательно, снижается вероятность обивания листьев и соцветий в процессе обработки.

При установке на одном кронштейне, снабженном резиновым демпфером, двух планок, отогнутых друг от друга на 15° , образуется рабочий орган V-образной формы с углом раствора 30° . Благодаря такой конструкции рабочие органы наносят по потоку травы в двух плоскостях наклонно-косые удары под острым углом, от действия которых повреждаются покровные ткани движущихся в зазоре стеблей.

Величину перекрытия планок смежных рабочих органов на барабане выбирали, исходя из толщины проходящего по деке потока травы и длины рабочей части планок, взаимодействующей с травой и близкой по значению к расстоянию между вершинами этих планок в рабочем органе. На барабане экспериментальной установки рабочие органы расставлялись с перекрытием на величину 30 мм, равную половине расстояния между вершинами планок в рабочем органе.

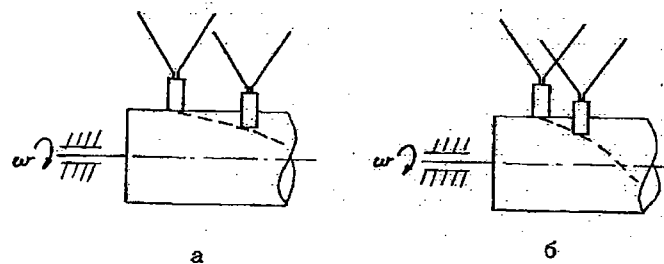


Рисунок 3. Взаимное расположение рабочих органов на барабане:
а – без перекрытия; б – с перекрытием

Шаг винтовой линии, на которой были расставлены рабочие органы, 512 и 256 мм определен из расчета кратности 250 мм – половине размера между осями вращающихся роторов ротационного режущего аппарата косилки, с которой предполагается сочетать бильное устройство.

Развертки барабана экспериментальной лабораторной установки с расположением планок без перекрытия приведены на рис. 3,а, с перекрытием – на рис. 3,б.

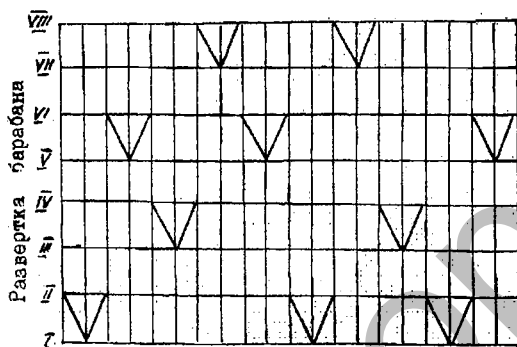


Схема 1. (одновинтовая линия с шагом 512 мм, 10 рабочих органов)

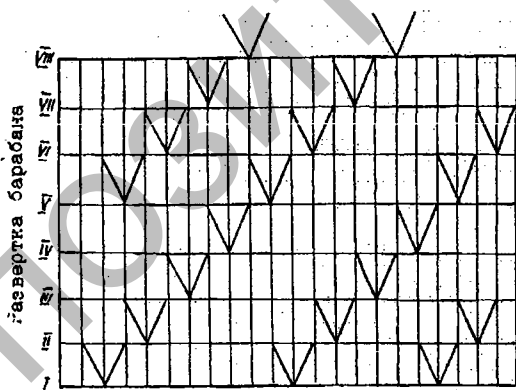


Схема 2. (двухвинтовая линия с шагом 512 мм, 10 рабочих органов)

Рисунок 4. Расположение рабочих органов без перекрытия планок

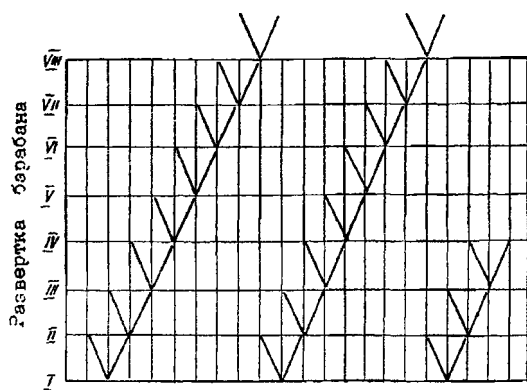


Схема 3. (двухвинтовая линия с шагом 512 мм, 20 рабочих органов)

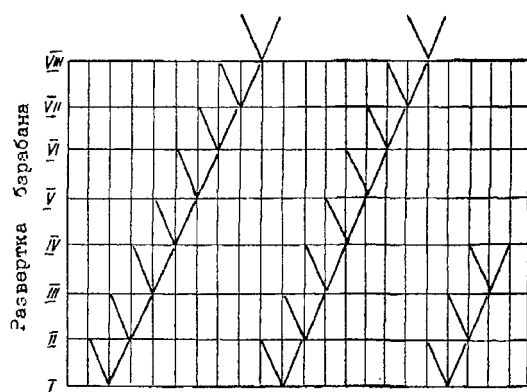


Схема 4. (одновинтовая линия с шагом 256 мм, 20 рабочих органов)

Рисунок 5. Расположение рабочих органов с перекрытием планок

Из четырех схем расстановки рабочих органов наилучшие показатели относительно повреждения стеблей получены при расположении по схемам №3 и №1. Средняя степень повреждения стеблей клевера – соответственно 81,75 и 78,30% общей массы взятой пробы. Очевидное преимущество схемы №3 достигнуто за счет установки дополнительных рабочих органов.

Установка дополнительных рабочих органов по второй винтовой линии со смещением относительно первой по оси на 30 мм и углу – на 180° способствует повышению полноты повреждения стеблей в результате обработки растений, проходящих ранее между планками рабочих органов без повреждений (схема №1).

Обработке подвергался клевер красный в фазе цветения (табл. 2).

За один оборот барабана растения дважды испытывают динамическое воздействие V-образных планок рабочих органов во взаимно пересекающихся плоскостях, производящих обработку потока движущихся стеблей с двух сторон. При этом улучшается балансировка рабочих органов под нагрузкой, снижается возможность зависания и наматывания стеблей на барабан.

Расстановка рабочих органов по винтовым линиям обеспечивает криволинейную траекторию движения потока травы в канале устройства. При таком расположении рабочих органов происходит смещение при укладке поступивших после обработки стеблей на 150...250 мм. Криволинейная траектория движения продольно ориентированных стеблей, смещающихся по оси барабана в направлении винта, пересекается с радиальной плоскостью воздействия на этот поток планок рабочих органов. В результате происходит счет воскового налета, кутикулярной пленки по длине стебля. Это подтверждается визуальным осмотром прошедших обработку растений.

Таблица 2. Степень повреждения стеблей клевера при различном взаимном положении *V*-образных рабочих органов на барабане

Схема расстановки рабочих органов на барабане	Степень повреждения стеблей %, в повторностях				\bar{X}	S	$S_{\bar{x}}$	V	P
	1	2	3	4					
№ 1 – 10 рабочих органов расставлены по одной винтовой линии с шагом 512 мм	-	6	9	0	8,30	2,08	1,20	2,66	1,53
№ 2 – 10 рабочих органов расставлены по двум винтовым линиям с шагом 512 мм	0	6	2	0	4,50	4,43	2,22	5,95	2,98
№ 3 – 20 рабочих органов расставлены по двум винтовым линиям с шагом 512 мм	4	2	0	1	1,75	1,71	0,85	2,09	1,04
№ 4 – 20 рабочих органов расставлены по одной винтовой линии с шагом 256 мм	8	4	3	5	0,00	7,16	3,58	10,24	5,12

При расположении рабочих органов по схемам №4 и №2 смещение укладываемого после обработки потока травы практически не происходит или совсем незначительное.

На основании полученных результатов сделан вывод о целесообразности проведения дальнейших исследований бильного устройства на лабораторной установке с барабаном, имеющим *V*-образные рабочие органы, расставленные по двум винтовым линиям с шагом 512 мм и смещением второй линии относительно первой по оси на 30 мм и углу – на 180° (схема №3, рис. 4.11).

Осевое смещение потока травы обеспечивает при расположении рабочих органов по винтовым линиям, расходящимся от середины барабана, разброс травы в прокосе на ширину, превышающую ширину бильного барабана, а при расстановке органов по сходящимся в середине винтовым линиям – улучшение процесса формирования валка. Кроме того, при комбинировании бильного устройства с ротационным режущим аппаратом шаг винтовой линии расположения рабочих органов должен быть не меньше расстояния между осями вращающихся роторов. Это дает возможность учитывать неравномерность подачи травы по ширине прокоса от ротационного режущего аппарата и более равномерно загружать бильный барабан по длине.

Литература

1. Шупилов А.А. Косилки с плющильными устройствами бильного типа для интенсификации сушки трав (теоретические и экспериментальные исследования, результаты проектирования) : монография / Минск : БГАТУ, 2007.-120с.