

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕПАРАЦИИ ЛУКА НА ПРУТКОВОМ ЭЛЕВАТОРЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМ УГЛОМ НАКЛОНА ПОЛОТНА

Дорохов А.С., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»;
Сибирёв А.В., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»;
Аксенов А.Г., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Существующие машины для уборки корнеплодов и лука не в полной мере обеспечивают показатели сепарации вороха корнеплодов и лука, что и приводит к нарушению агротехнических требований при их уборке [1, 2]. Необходим поиск новых решений по увеличению показателей качества уборки корнеплодов и лука, а именно повышению полноты сепарации и снижению повреждений. В статье представлена конструкция пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна. Описали методику проведения и результаты лабораторных исследований по определению качественных показателей сепарации вороха лука-севка на экспериментальном прутковом элеваторе. Результаты проведенных лабораторных исследований машины для уборки лука-севка, оснащенной прутковым элеватором с регулируемым углом наклона полотна, показали качественное выполнение технологического процесса сепарации вороха лука-севка при оптимальных значениях параметров: поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{э,л}=1,55...1,68$ м/с, подачи вороха лука $Q_{вп}=19,7...27,1$ кг/с и угла наклона полотна пруткового элеватора, находившегося в пределах $\alpha_1=15,1...21,9$ град. Применение пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна позволяет повысить полноту сепарации лукович лука-севка на 20 %, а повреждения лукович снизить на 11 %.

Ключевые слова: машина для уборки лука, прутковый элеватор, угол наклона, технологические параметры, луковичы, лук-севок, почва, уборка.

Для цитирования: Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г. Результаты лабораторных исследований сепарации лука на прутковом элеваторе с регулируемым углом наклона полотна // Аграрный вестник Верхневолжья. 2020. № 3 (32). С. 88-96.

Введение. В машинной технологии возделывания и уборки корнеплодов и лука одним из важнейших показателей качества, определяющего длительность хранения корнеплодов, является наличие в закладываемом на хранение ворохе почвенных и растительных примесей [3-5].

Достижение заданных агротехнических требований обеспечивается при предельно допустимых жёстких режимах работы комкоразрушающих и просеивающих сепарирующих устройств машин для уборки корнеплодов и лука с целью разрушения непроходных почвенных комков, приводит к повышенным повреждениям и потерям сепарируемой продукции. Невозможность отделения почвенных комков из вороха корнеплодов и лука обусловлена тем, что на большинстве уборочных машин применяют щелевые сепарирующие рабо-

чие органы, при этом межпрутковое расстояние сепарирующего транспортера с целью исключения потерь корнеплодов выполнено меньше минимального размера сепарируемого корнеплода, что приводит к невозможности их очистки на сепарирующих рабочих органах уборочных машин, а следовательно, к травмированию значительной части товарной продукции и потерям при хранении значительной части выращенного урожая.

В результате проведенного анализа технологий и технических средств машинной уборки корнеплодов и лука выявлены основные способы и средства, способствующие снижению количества почвенных комков в товарной продукции корнеплодов и лука при их машинной уборке, имеющие свои положительные стороны и недостатки.

Качественные показатели уборки определяют тем, насколько качественно выполнены предыдущие технологические операции. При уборке лука очень важно поддерживать почву во взрыхленном состоянии, в связи с тем что применяемые на сепарации щелевые рабочие органы не способны отделить почвенные примеси от луковиц, так как он имеет небольшие размеры, и при сепарации от почвенных примесей это является трудноотделимыми [6-8]. Следовательно, разработка и исследование технологий и технических средств уборки корнеплодов и лука, обеспечивающих получение качественной товарной продукции при минимальных трудозатратах (отделение корнеплодов от соизмеримых почвенных ком-

ков), представляет научную проблему, решение которой будет способствовать инновационному развитию внутреннего рынка сельскохозяйственной продукции, устойчивому положению России на внешнем рынке и обеспечит переход к высокопродуктивному производству сельскохозяйственной продукции.

Цель исследований. Обоснование технологических параметров спирального вальца катка-ложеобразователя машины для уборки лука.

Материалы и методы. Для определения качественных показателей сепарации вороха корнеплодов и лука на прутковом элеваторе с регулируемым углом наклона полотна [9] была изготовлена лабораторная установка (рисунок 1 и 2).

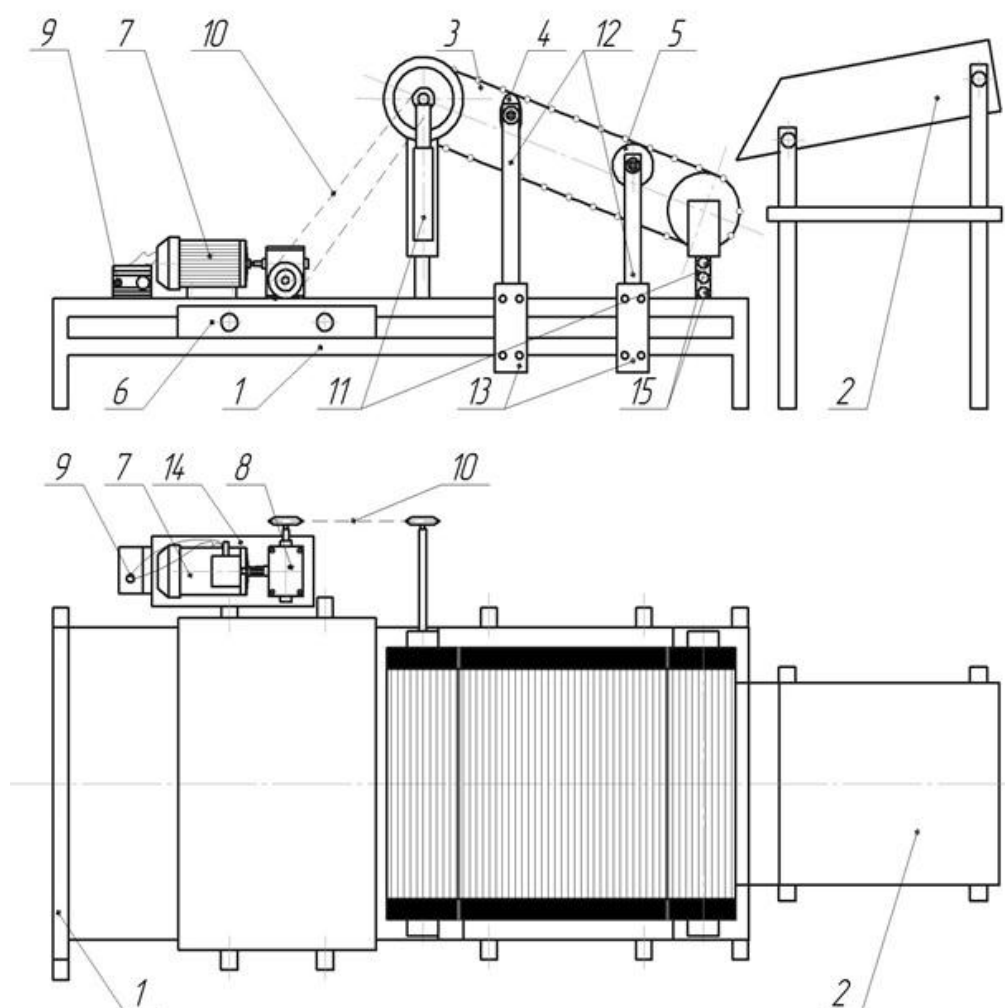


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для определения влияния технологических параметров сепарирующего пруткового элеватора на качественные показатели сепарации вороха корнеплодов и лука:

1 – рама; 2 – емкость для предварительного размещения вороха; 3 – сепарирующий прутковый элеватор; 4 – эллиптический встряхиватель; 5 – цилиндрический ролик; 6 – брезент сепарированной продукции; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор одноступенчатый; 9 – преобразователь частотный; 10 – передача цепная; 11 – стойки опорные; 12 – стойки встряхивателя и поддерживающего ролика; 13 – кронштейн соединительный; 14 – плита опорная; 15 – технологические отверстия

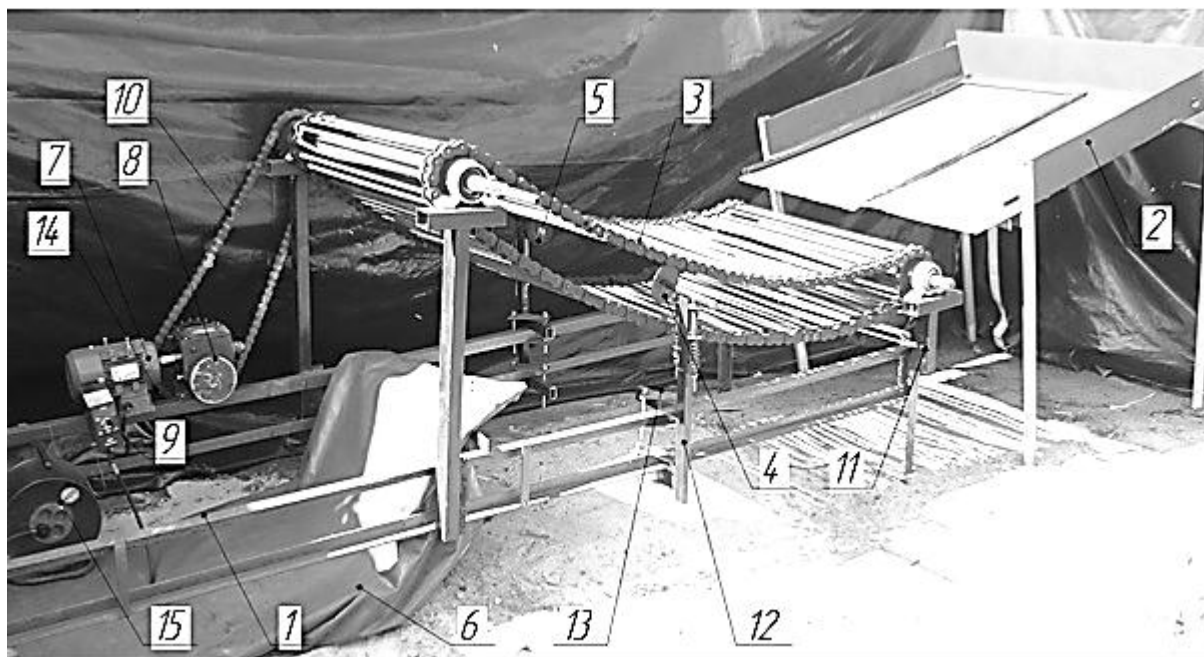


Рисунок 2 – Общий вид лабораторной установки для определения влияния технологических параметров сепарирующего пруткового элеватора на качественные показатели сепарации вороха корнеплодов (луковиц):

1 – рама; 2 – емкость для предварительного размещения вороха; 3 – сепарирующий прутковый элеватор; 4 – эллиптический встряхиватель; 5 – поддерживающий ролик; 6 – брезент сепарированной продукции; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор одноступенчатый; 9 – преобразователь частотный; 10 – передача цепная; 11 – стойки опорные; 12 – стойки встряхивателей; 13 – кронштейн соединительный; 14 – плита опорная; 15 – фильтр сетевой

Под полотном пруткового элеватора 2 установлены пассивные эллиптические встряхиватели 4 и поддерживающие ролики 5 с возможностью перемещения по раме 1 на стойках 12 фиксацией положения кронштейном 13 на раме 1 болтовым соединением.

Электрический привод пруткового элеватора 3 осуществляется от электродвигателя 7 асинхронного марки 4A180УЗ ГОСТ 1050 – 88 ($N=0,6\text{ кВт}$; $n=920/1200$ об/мин) и частотного преобразователя 9 марки Tescorp Group ($N=0,75$ кВт; $U_{\text{вх}} = 220\text{ В}$, $U_{\text{вых}} = 220\text{ В}$) через одноступенчатый редуктор 8 (модели 1-ЦУ-160-2-23), которые установлены на опорной плите 14.

Наличие частотного преобразователя 9 в конструкции лабораторной установки вызвано необходимостью в изменении частоты вращения вала электродвигателя 7.

Для сбора луковиц после сепарации в технологической схеме лабораторной установки предусмотрено наличие брезента 6.

Опорные стойки 11 пруткового элеватора 3 и стойки 12 встряхивателей изготовлены из стальной трубы прямоугольного профиля по ГОСТ 8645-78 (Сталь 10 В ГОСТ 13663-86).

При определении качественных показателей сепарации определяли следующие показатели:

- повреждения корнеплодов и лука;
- полноту сепарации вороха корнеплодов и лука.

Лабораторные исследования проводились в зависимости от различных вариантов расположения угла наклона пруткового элеватора и осуществлялись в следующей последовательности [8].

Приготавливался луко-почвенный ворох в соответствии с фракционным составом валка лука-севка при его подборе (лук-севок сорта «Штутгартен Ризен», при влажности почвы 18 %).

Состав вороха и основные физико-механические свойства его компонентов выбирались исходя из материалов полевых исследований, проведенных с участием автора работы в течение 2016...2017 гг. в АО «Озеры» Московской области:

- корнеплоды (луковицы) – 65 %;
- примесей – 35 %, в т. ч.:
- растительные примеси – 5 %;
- мелкие почвенные примеси – 15 %;
- комки почвы, соизмеримые по размерам со стандартной фракцией корнеплодов (луковиц) по поперечному размеру – 10 %;

- комки почвы, имеющие больший поперечный размер – 5 %.

Под полотном пруткового элеватора 3 устанавливался встряхиватель 4 (эллиптический и трехплечиковый).

Далее на полотно пруткового элеватора 3 из емкости 2 для предварительного размещения вороха поступал приготовленный ворох корнеплодов (луковиц).

Результаты и обсуждение. Лабораторные исследования проводились с целью определения оптимальных технологических параметров пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна в лабораторных условиях.

При исследовании процесса сепарации вороха лука-севка были выявлены факторы, общее число которых первоначально равнялось 15, которые охватывали технологические, конструктивные параметры пруткового элеватора, а также физико-механические свойства почвы и луковиц лука-севка.

Ввиду того, что при исследованиях невозможно охватить влияние всех факторов и их взаимодействия, на основании априорной информации, а также исходя из конкретных задач исследования были выделены наиболее значимые факторы, влияющие на качество сепарации лука – севка.

С первоначально выбранными, наиболее существенными факторами, влияющими на качество сепарации лука-севка проводился отсеивающий эксперимент, по результатам которого после обработки получилась информация о значимости каждого параметра, что позволило исключить из дальнейшего рассмотрения мало-значимые факторы и сократить объем дальнейших исследований.

Для проведения отсеивающего эксперимента составляли матрицу с учетом первоначально выделенных факторов методом случайного смешивания двух полуреplik типа 2^{4-1} [10-12].

После проведения отсеивающего эксперимента малозначимые факторы отсеивались и были установлены три наиболее значимых фактора, влияющие на качество заделки луковиц лука-севка, а именно:

- поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора $v_{эл}$, м/с;
- подача вороха лука-севка $Q_{вп}$, кг/с;

- угол наклона пруткового элеватора α_1 , град.

За критерий оптимизации был выбран качественный показатель уборки – полнота сепарации луковиц v , %.

После обработки результатов на основании теории многофакторного эксперимента, используя компьютерную программу Statistica 10.0, были получены значения функции отклика – полнота сепарации луковиц при варьировании факторов, в соответствии с планом второго порядка Бокса-Бенкина и получена адекватная математическая модель, описывающая зависимость полноты сепарации $v = f(v_{эл}, Q_{вп}, \alpha_1)$ луковиц после их посадки в борозде в закодированном виде от выбранных факторов:

$$Y = 98,86 + 0,15x_1 + 0,27x_2 + 0,12x_3 - 0,75x_1^2 - 0,35x_2^2 - 0,3x_3^2 + 0,1x_1x_2 + 0,09x_1x_3 + 0,25x_2x_3, \quad (1)$$

где Y – критерий оптимизации, %;

x_1 – поступательная скорость движения полотна пруткового элеватора, м/с;

x_2 – подача вороха лука-севка, кг/с;

x_3 – угол наклона пруткового элеватора, град.

Результаты многофакторного эксперимента обрабатывались на компьютерной программе «STATISTICA – 6.0», в результате были получены значения функций отклика – полнота сепарации вороха лука при варьировании факторов, в соответствии с планом второго порядка Бокса-Бенкина и получена адекватная математическая модель, описывающая зависимость полноты сепарации вороха лука $v = f(v_{эл}, Q_{вп}, \alpha_1)$ в закодированном виде от выбранных факторов:

Гипотезу об адекватности модели второго порядка проверяли статистическим анализом уравнения регрессии.

Результаты расчета статистических характеристик представлены в таблице 1.

Значение критерия Фишера F_T при 5%-м уровне значимости для полученного уравнения при степенях свободы числителя $v_1 = N_0 - (k_{\phi} + 1) = 11$ и знаменателя $v_2 = N_0(m - 1) = 30$, выбранное по таблице, равно 2,1.

Расчетное значение критерия Фишера $F = 1,97$. Так как $F_T = 2,1 > F = 1,97$, то получаем адекватную математическую модель.

Таблица 1 – Статистические характеристики ошибки опыта

№	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_u$	$\bar{Y}_u$	S_y^2	S_{LF}^2	$(\bar{Y}_u - \bar{Y}_u)^2$
1	99,1	99,2	99,6	99,3	98,32	0,1343	0,8232	0,9604
2	96,4	96,3	96,5	96,4	97,44	0,4531	0,8861	1,0816
3	97,8	97,9	97,7	97,8	97,54	0,1114	0,0607	0,0676
4	97,6	97,6	97,3	97,5	97,78	0,2952	0,0268	0,0784
5	97,7	97,5	98,2	97,8	98,17	0,3353	0,0609	0,1369
6	97,9	97,7	97,8	97,8	97,63	0,0533	0,0097	0,0289
7	96,8	96,9	96,7	96,8	97,75	0,0363	0,2479	0,9025
8	98,5	98,7	99,2	98,8	97,69	0,9781	0,3596	1,2321
9	98,1	98,3	97,9	98,1	98,85	0,8837	0,1608	0,5625
10	98,5	98,9	99,0	98,8	98,07	0,8693	0,1586	0,5329
11	97,8	97,9	98,6	98,1	98,11	0,1912	0,0345	0,0001
12	97,9	97,9	97,6	97,8	97,81	0,0301	0,0054	0,0001
13	99,4	99,2	99,3	99,3	98,86	0,3004	0,0546	0,1936
14	98,4	99,1	98,6	98,7	98,86	0,1684	0,0306	0,0256
15	98,3	98,8	98,7	98,6	98,86	0,1714	0,0311	0,0676
Σ	-	-	-	1471,6	-	5,0115	2,9501	5,8708

Уравнение (1) в раскодированном виде имеет следующий вид:

$$Y = 41,41 + 68,01v_{3Л} - 0,01Q_{Вп} + 0,26\alpha_1 - 21,64v_{3Л}^2 - 0,04Q_{Вп}^2 - 0,09\alpha_1^2 + 0,12v_{3Л}Q_{Вп} + 12,21v_{3Л}\alpha_1 - 0,54Q_{Вп}\alpha_1. \quad (2)$$

Подставляя значение $x_1 = 0$ в уравнение (1) получаем двухмерное сечения поверхности отклика, характеризующего показатель качества сепарации вороха лука от подачи вороха (x_2) и угла наклона пруткового элеватора, град (x_3):

$$Y = 98,86 + 0,27x_2 + 0,12x_3 - 0,35x_2^2 - 0,3x_3^2 + 0,25x_2x_3. \quad (3)$$

Координаты центра поверхности отклика определяем дифференцированием уравнения (3) и решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_2} = 0,27 - 0,7x_2 + 0,25x_3 = 0, \\ \frac{dy}{dx_3} = 0,12 - 0,6x_3 + 0,25x_2 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему уравнений (4), находим координаты центра поверхности функции отклика в закодированном виде: $x_2 = 0,537$, $x_3 = 0,423$ (в раскодированном виде $Q_{Вп} = 28,2$ кг/с, $\alpha_1 = 18,3$ град).

Подставляя значения x_2 и x_3 в уравнение (3), получаем значение функции отклика в центре поверхности:

$$Y_s = 98,74. \quad (5)$$

Проведя каноническое преобразование уравнения (5), получаем уравнение в канонической форме:

$$Y - 98,74 = -0,05x_2^2 - 0,51x_3^2. \quad (6)$$

Угол поворота осей составит:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_2 = \frac{-0,25}{-0,35 - 0,31} = 5,3. \quad (7)$$

Угол $\alpha_2 = 68^\circ$.

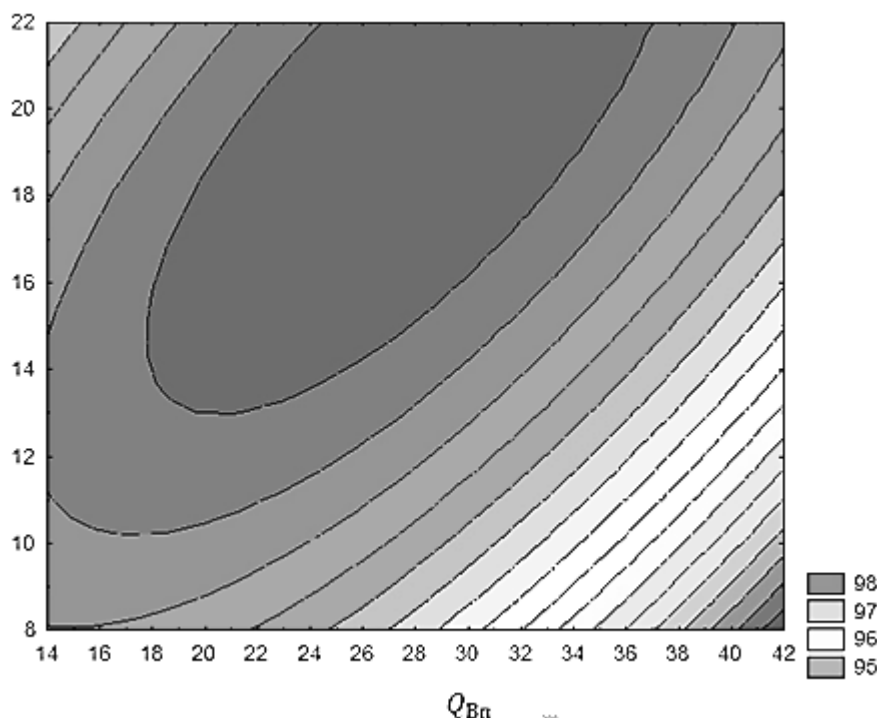


Рисунок 3 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука от подачи вороха лука (кг/с) и угла наклона полотна пруткового элеватора (град)

Подставляя различные значения функции отклика в уравнение (2), получали уравнения контурных кривых – эллипсов. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что полнота сепарации вороха лука на прутковом элеваторе с регулируемым углом наклона полотна составляет 98 % при нахождении оптимальных значений рассматриваемых факторов: подачи вороха лука $Q_{Bn}=18,6...38,4$ кг/с и угла наклона полотна $\alpha_1=13,3...23,2$ град.

Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее качество сепарации вороха лука-севка от поступательной скорости движения пруткового элеватора (x_1) и угла наклона полотна (x_3), описывается уравнением (1) при $x_2 = 0$ после чего:

$$Y = 98,86 + 0,15x_1 + 0,12x_3 - 0,75x_1^2 - 0,3x_3^2 + 0,09x_1x_3. \quad (8)$$

При дифференцировании уравнения (8) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,15 - 0,14x_1 + 0,09x_3 = 0, \\ \frac{dy}{dx_3} = 0,12 - 0,6x_3 + 0,09x_1 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

На основании системы уравнений получили координаты центра поверхности отклика:

$x_1 = 1,05$, $x_3 = -0,115$ (соответственно в раскодированном виде $v_{эл} = 1,64$ м/с, $\alpha_1 = 16,7$ град).

Подставляя значения x_1 и x_3 в уравнение (8), получаем значение функции отклика в центре поверхности:

$$Y_s = 98,28. \quad (10)$$

После расчета коэффициентов уравнения регрессии в канонической форме, уравнение регрессии в канонической форме запишется:

$$Y - 98,28 = 0,71x_1^2 - 0,92x_3^2. \quad (11)$$

Угол поворота осей составит:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_2 = \frac{0,09}{0,7 - 0,09} = 0,147. \quad (12)$$

Угол $\alpha_2 = 4,3^\circ$.

Двухмерное сечение поверхности отклика строилось на основании полученных данных (рис. 4).

Анализируя рисунок 4, видно, что полнота сепарации вороха лука на прутковом элеваторе с регулируемым углом наклона полотна составляет 98 % при нахождении оптимальных значений рассматриваемых факторов: поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора и угла наклона полотна пруткового элеватора находится в пределах $\alpha_1=13,9...18,4$ град, $v_{эл}=1,54...1,69$ м/с.

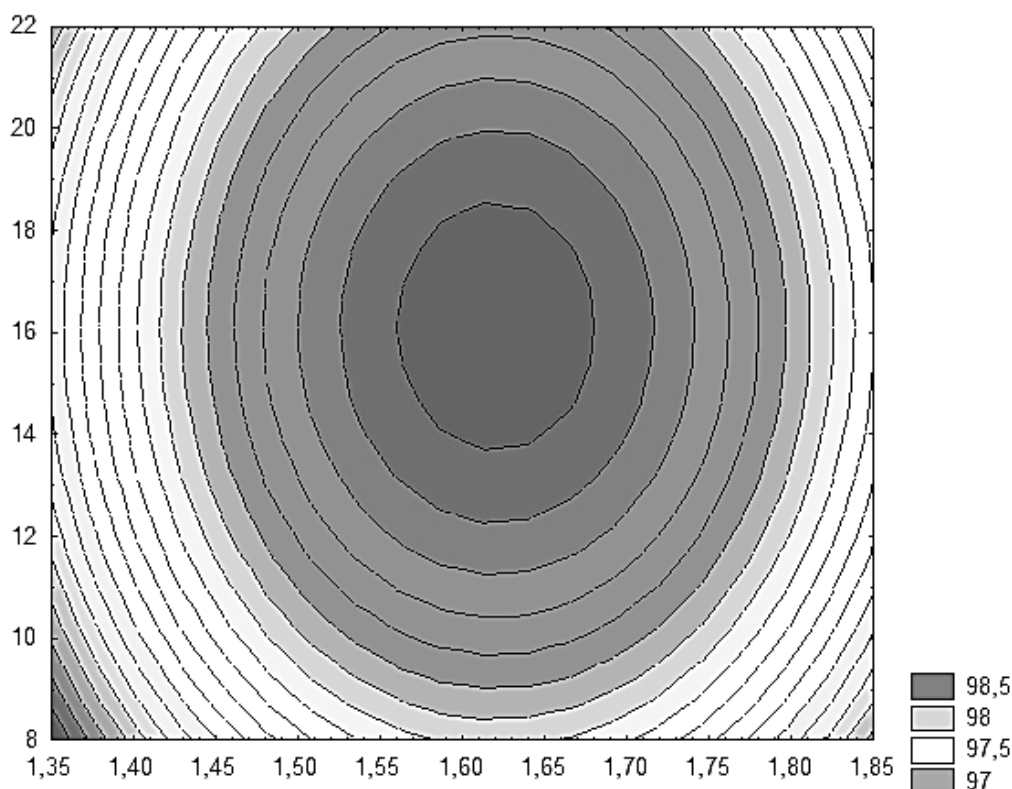


Рисунок 4 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и угла наклона полотна пруткового элеватора (град)

Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее качество сепарации вороха лука от поступательной скорости движения пруткового элеватора (x_1) и подачи вороха лука (x_2), описывается уравнением (15) при $x_3 = 0$ после чего:

$$Y = 98,86 + 0,15x_1 + 0,27x_2 - 0,75x_1^2 - 0,35x_2^2 + 0,1x_1x_2. \quad (13)$$

Продифференцировав уравнение (13) и решив систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,15 - 1,5x_1 + 0,1x_2 = 0, \\ \frac{dy}{dx_2} = 0,27 - 0,7x_2 + 0,1x_1 = 0, \end{cases} \quad (14)$$

получим координаты поверхности отклика $x_1 = 0,12$, $x_2 = 0,4$ (соответственно в раскодированном виде $v_{3л} = 1,63$ м/с, $Q_{Вп} = 23,8$ кг/с). Подставляя значения x_1 и x_2 в уравнение (13), получаем значение функции отклика в центре поверхности:

$$Y_s = 98,98. \quad (15)$$

После расчета коэффициентов уравнения регрессии в канонической форме уравнение регрессии в канонической форме запишется:

$$Y - 98,98 = 0,125x_1^2 - 0,575x_2^2. \quad (16)$$

Угол поворота осей составил

$$\operatorname{tg} 2\alpha_2 = \frac{0,1}{0,75 + 0,35} = 0,09. \quad (17)$$

Угол $\alpha_2 = 2,3^\circ$.

Анализируя рисунок 5, видно, что полнота сепарации вороха лука составляет 98 % при нахождении оптимальных значений рассматриваемых факторов: поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора и подачи вороха лука $v_{3л} = 1,55 \dots 1,68$ м/с, $Q_{Вп} = 17,9 \dots 28,3$ кг/с.

Уравнение (1) с учетом значимости коэффициентов регрессии можно представить в следующем виде:

$$Y = 41,41 + 68,01v_{3л} - 0,01Q_{Вп} + 0,26\alpha_1 - 21,64v_{3л}^2 - 0,04Q_{Вп}^2 - 0,09\alpha_1^2 + 0,12v_{3л}Q_{Вп} + 12,21v_{3л}\alpha_1 - 0,54Q_{Вп}\alpha_1. \quad (18)$$

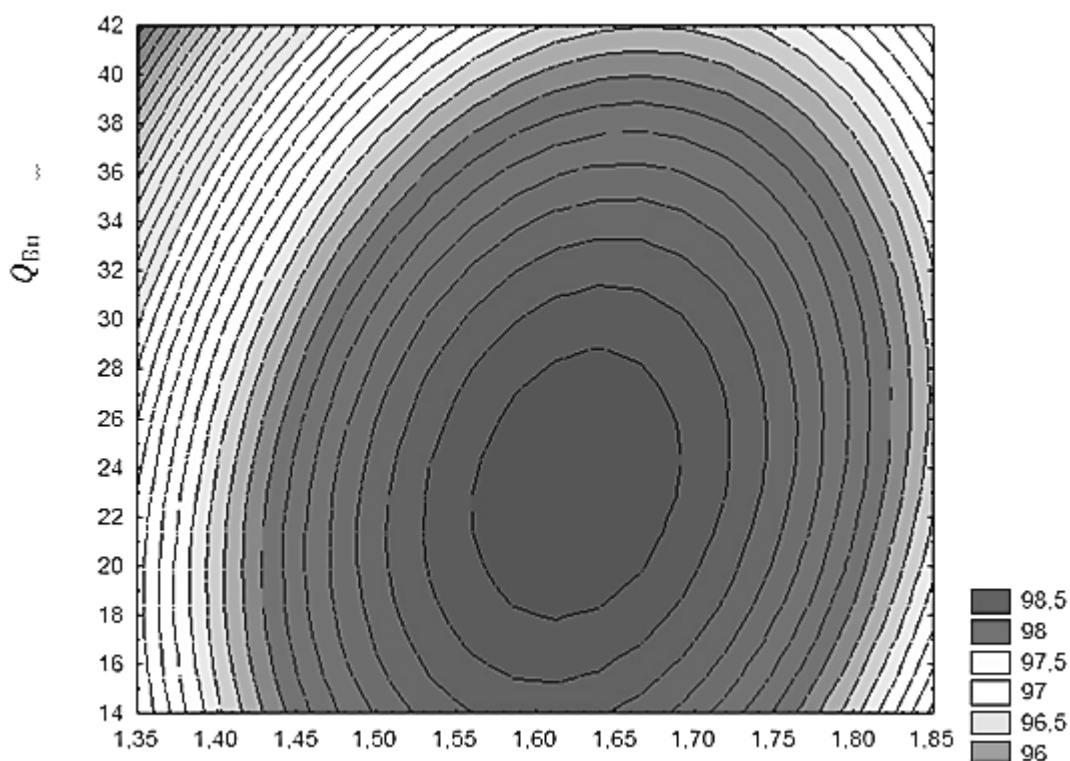


Рисунок 5 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость полноты сепарации вороха лука от поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора (м/с) и подачи вороха лука (кг/с)

Выводы. Экспериментальные лабораторные исследования пруткового элеватора с регулируемым углом наклона полотна позволяют сделать выводы о том, что максимальная полнота сепарации вороха лука составляет 98 %, при поступательной скорости движения полотна пруткового элеватора $v_{зл} = 1,55 \dots 1,68$ м/с, подачи вороха лука $Q_{вп} = 19,7 \dots 27,1$ кг/с и угла наклона полотна пруткового элеватора находится в пределах $\alpha_1 = 15,1 \dots 21,9$ град.

Работа выполнена при государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК – 4002.2018.8.

Список используемой литературы

1. Лобачевский Я.П., Емельянов П.А., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В. Машинная технология производства лука. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2016.
2. Кухмазов К.З. Совершенствование технологии и технических средств для производства лука-севка в условиях Среднего Поволжья: дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2000.
3. Ларюшин А.М. Энергосберегающие технологии и технические средства для уборки лука: дис. ... д-ра тех. наук. Пенза, 2010.

4. Ларюшин Н.П. Научные основы разработки комплекса машин для уборки и послеуборочной обработки лука: дис. ... д-ра тех. наук. Рязань, 1996.

5. Протасов А.А. Совершенствование технологических процессов и технических средств для уборки лука: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2005.

6. Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Дорохов А.С. Цифровизация машинной технологии уборки лука искусственными нейронными сетями // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. № 2. С. 21-28.

7. Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Емельянов П.А., Прямов С.Б. Обоснование конструктивных и технологических параметров подкапывающего лемеха машины для уборки корнеплодов и лука // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 1. С. 9-14.

8. Sibirev A.V. Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Experimental Laboratory Research of Separation

Intensity of Onion Set Heaps on Rod Elevator // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. № 23. pp. 10086-10091.

9. Патент № 2679734 Россия, МПК A01 D33/00. Сепарирующий транспортер машины для уборки корнеклубнеплодов и луковиц / А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов, Н.Г. Кынев, Н.В. Сазонов. № 2018117525; Заяв. 11.05.2018; Оpubл. 12.02.2019, Бюл. № 5.

10. Зыкин Е.С. Разработка и обоснование технологии и средств механизации гребневого возделывания пропашных культур: дис. ... д-ра техн. наук. Ульяновск, 2017.

11. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Кудрявцев П.П. Почвенное состояние в интенсивной технологии // Картофель и овощи. 2016. № 2. С. 35-36.

12. Зыкин Е.С., Курдюмов В.И., Ерошкин А.В. Исследование процесса формирования вторичного гребня почвы при уходе за посевами пропашных культур // Наука в центральной России. 2016. № 1 (19). С. 29-37.

References

1. Lobachevskiy Ya.P., Yemelyanov P.A., Aksekov A.G., Sibirev A.V. Mashinnaya tekhnologiya proizvodstva luka. M.: FGBNU FNATs VIM, 2016.

2. Kukhmazov K.Z. Sovershenstvovanie tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya proizvodstva luka-sevka v usloviyakh Srednego Povolzhya: diss. ... d-ra tekhn. nauk. Penza, 2000.

3. Laryushin, A.M. Energosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya uborki luka: diss. ... d-ra tekhn. nauk. Penza, 2010.

4. Laryushin N.P. Nauchnye osnovy razrabotki kompleksa mashin dlya uborki i posleuborochnoy obrabotki luka: diss. ... d-ra tekhn. nauk. Ryazan, 1996.

5. Protasov A.A. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov i tekhnicheskikh sredstv

dlya uborki luka: diss. ... d-ra tekhn. nauk / A.A. Protasov. Saratov, 2005.

6. Sibirev A.V., Aksekov A.G., Dorokhov A.S. Tsifrovizatsiya mashinnoy tekhnologii uborki luka iskusstvennymi neyronnymi setyami // Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka. 2019. № 2. S. 21-28.

7. Sibirev A.V., Aksekov A.G., Yemelyanov P.A., Pryamov S.B. Obosnovanie konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov podkapyvayushchego lemekha mashiny dlya uborki korneplodov i luka // Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina». 2019. № 1. S. 9-14.

8. Sibirev A.V., Aksekov A.G., Mosyakov M.A. Experimental Laboratory Research of Separation Intensity of Onion Set Heaps on Rod Elevator // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. № 23. pp. 10086-10091.

9. Patent № 2679734 Rossiya, MPK A01 D33/00. Separiruyushchiy transporter mashiny dlya uborki korneklubneplodov i lukovits / A.V. Sibirev, A.G. Aksekov, N.G. Kynev, N.V. Sazonov. № 2018117525; Zayav. 11.05.2018; Opubl. 12.02.2019, Byul. № 5.

10. Zykin Ye.S. Razrabotka i obosnovanie tekhnologii i sredstv mekhanizatsii grebneвого возделывания пропашных культур: diss. ... d-ra tekhn. Nauk. Ulyanovsk, 2017.

11. Kalinin A.B., Teplinskiy I.Z., Kudryavtsev P.P. Pochvennoe sostoyanie v intensivnoy tekhnologii // Kartofel i ovoshchi. 2016. № 2. S. 35-36.

12. Zykin Ye.S., Kurdyumov V.I., Yeroshkin A.V. Issledovanie protsessov formirovaniya vtorichnogo grebnya pochvy pri ukhode za posevami propashnykh kultur // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2016. № 1 (19). S. 29-37.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТЕБЛЯ С КОЖУХОМ И ПАЛЬЦЕМ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ ПОДБИРАЮЩЕГО АППАРАТА ЛЬНОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

Трофимов М.А., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА;

Лобачев А.А., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА;

Разин С.Н., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА

Подбор лент льна является одной из основных операций при его уборке. Подбирающий аппарат должен чисто подбирать стеблевую массу, не повреждать, не перекашивать и не перепутывать её. Из-за особенностей технологического процесса существующие устройства для подбора не всегда удовлетворительно выполняют данную операцию, особенно при подборе прибитых дождем к поверхности почвы или сильно проросших сорной растительностью лент, а также на полях с невыровненным микрорельефом. Для устранения этих недостатков предложен новый подбирающий аппарат. Отличительной особенностью его является то, каждый палец индивидуально подпружинен и имеет рабочую часть криволинейной формы, отклоненную от радиуса кожуха в сторону его вращения. Улучшение выполнения технологического процесса в сравнении с серийным барабаном происходит за счет того, что каждый палец копирует микрорельеф поля независимо от других, не заглубляясь в почву. Рабочая часть пальцев новых подбирающих барабанов отклонена от радиуса кожуха в сторону вращения, поэтому во время контакта со стеблями палец в большей степени действует на отрыв их от почвы. Такая форма пальцев, способствующая более полному подбору льна, при определенных условиях в момент убирания пальцев внутрь кожуха может приводить к заземлению стеблей между своей криволинейной частью и кожухом, поэтому рассмотрено взаимодействие стеблей с кожухом и пальцем. Рассмотрены силы, действующие на стебель, определены условия незаземления стебля без учёта силы натяжения ленты и с учетом данной силы. Установлено влияние угла между касательной к окружности кожуха, проведенной через точку касания стебля с кожухом и нормалью к касательной, проведенной через точку касания стебля и криволинейной части пальца. Оптимальное значение данного угла составляет 23° .

Ключевые слова: лен, стебель, уборка, подбор, подбирающий аппарат, льноуборочная машина

Для цитирования: Трофимов М.А., Лобачев А.А., Разин С.Н. Теоретическое обоснование взаимодействия стебля с кожухом и пальцем криволинейной формы подбирающего аппарата льноуборочной машины // Аграрный вестник Верхневолжья. 2020. № 3 (32). С. 97–105.

Введение. Подбирающие аппараты стеблей льна применяются в машинах для осуществления второй фазы раздельной уборки льна, в подборщиках-оборачивателях ленты, в рулонных пресс-подборщиках, вспушивателях лент и других льноуборочных машинах.

Подбирающий аппарат, прежде всего, должен чисто подбирать стеблевую массу, не повреждать, не перекашивать и не перепутывать стебли в ленте. При подборе прибитых дождем к поверхности почвы или сильно проросших сорной

растительностью лент стеблей, а также на полях с невыровненным микрорельефом наблюдаются потери стеблей от недоподбора. Дело в том, что при движении машины конец каждого вращающегося пальца подбирающего барабана с убирающимися пальцами описывает траекторию в виде трохоиды. И если поставить барабан на такую высоту, при которой пальцы в самом нижнем положении только касаются поверхности почвы, то окажется, что между траекториями соседних пальцев и почвой в продольно-

вертикальной плоскости ленты существует неподбираемое пространство, то есть пальцы в этом пространстве не действуют на стебли. Когда сила сцепления между стеблями меньше, чем между стеблями и почвой, многие стебли, находящиеся в указанном пространстве, остаются неподбранными [1, с. 15]. Чтобы этого не происходило, необходимо уменьшать высоту расположения барабана над почвой, но в этом случае подбирающие пальцы при своей работе часто заходят глубоко в почву и нагрузки на подбирающий барабан возрастают. В этот момент может происходить проскальзывание приводного ремня на шкиве или барабане, остановка последнего и, как следствие, сгребание ленты и образование скопления стеблевой массы на остановившихся пальцах. После прохождения тяжелого участка нагрузки на барабан уменьшаются, и подбирающие пальцы начинают вращаться с прежней скоростью. Однако образовавшееся скопление стеблевой массы не попадает полностью в активную зону действия пальцев, и часть стеблей остается на поверхности поля неподбранной. Если это скопление стеб-

лей будет подобрано полностью с поверхности поля, то оно может привести к забивкам рабочих органов, спаданию ремней со шкивов, остановке технологического процесса и потерям продукции при устранении забивки. Серьезный недостаток возникает также из-за большой скорости воздействия пальцев на стебли в момент их подбора. Большая скорость конца пальца наблюдается в нижнем его положении при максимальном вылете, так как в этом положении кожух толкает палец, действуя на него близко к оси вращения. Такая скорость приводит к повреждению стеблей, что особенно видно при работе на влажных лентах, когда стебли не обладают достаточной жесткостью. Ситуация усугубляется тем, что палец при этом расположен примерно перпендикулярно плоскости ленты и действует на стебли вдоль ее длины, а не на отрыв от почвы.

Цель исследования – повышение эффективности процесса подбора лент льна в благоприятных и неблагоприятных условиях.

Для устранения указанных недостатков в Костромской ГСХА предложен новый подбирающий аппарат [2], схема его показана на рис. 1 и 2.

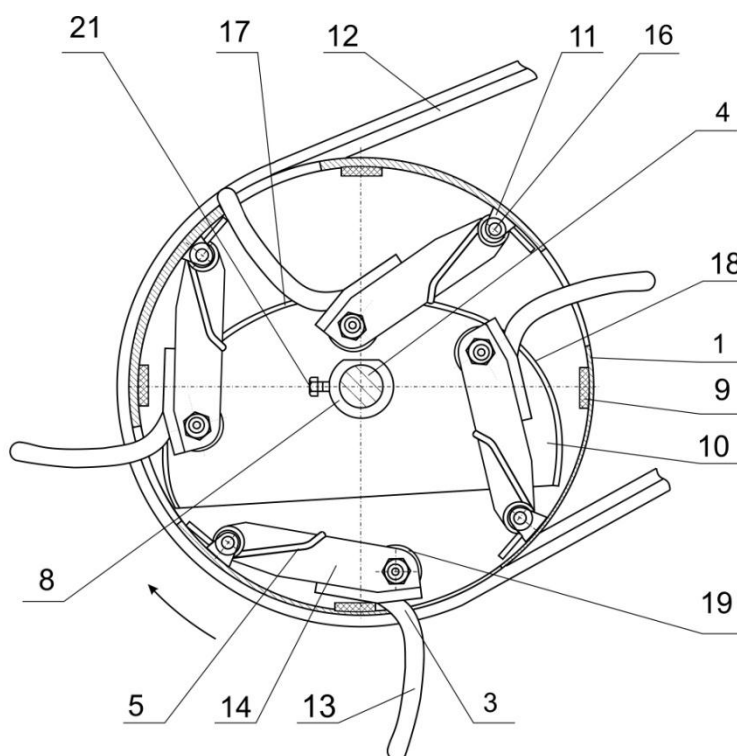


Рисунок 1 – Схема подбирающего аппарата, вид сбоку

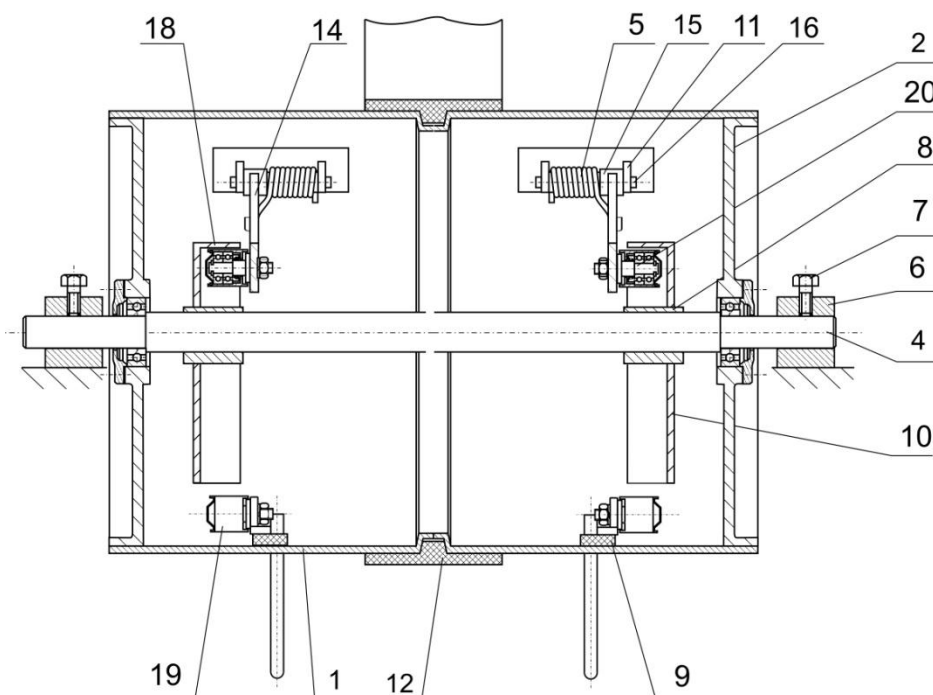


Рисунок 2 – Схема подбирающего аппарата, вид спереди в разрезе

Отличительной особенностью этого подбирающего аппарата является то, что пальцы, присоединенные посредством шарнира к кожуху внутри его, каждый палец индивидуально подпружинен и имеет рабочую часть криволинейной формы, отклоненную от радиуса кожуха в сторону его вращения. Благодаря такой конструкции каждый палец независимо от других копирует поверхность почвы и не зарывается в нее, при этом качественно подбирает стебли, в том числе и при работе на проросших травой или прибитых к почве лентах, а также на поле с невыровненным микрорельефом. В то же время уменьшается попадание почвы в подбираемую стеблевую массу. На схемах цифрами обозначены следующие элементы конструкции подбирающего аппарата: кожух 1, диск со ступицей 2, убирающийся палец 3, ось барабана 4, пружина 5, держатель 6, стопорный болт 7, ступица 8, резиновая прокладка 9, полудиск 10, ушко кожуха 11, ремень 12, рабочая часть пальца 13, поводок пальца 14, втулка пальца 15, ось пальца 16, беговая дорожка (кулачок) 17, наружная поверхность беговой дорожки 18, ролик пальца 19, ось ролика 20, стопорный болт беговой дорожки 21.

Рабочий процесс нового подбирающего аппарата барабанного типа заключается в следу-

ющем: при проворачивании приводного вала машины ремень приводит кожух во вращательное движение. Вместе с кожухом вращаются и пальцы, взаимодействуя одновременно с механизмом уборки, поэтому они в нижнем своем положении выходят из кожуха, а в верхнем убираются внутрь его.

При подборе лент льна, совсем не прибитых дождями к почве, для достижения высокой чистоты подбора нет необходимости опускать барабан так низко, чтобы при его вращении концы рабочих частей пальцев касались почвы (концы должны проходить близко к почве). Но и при таком расположении барабана пальцы в нижнем своем положении рабочими частями, полностью вышедшими из кожуха, захватывают стебли льна с почвы и приподнимают их. Хорошему захватыванию стеблевой массы пальцами способствует то, что рабочие части их выполнены криволинейными и отклонены от радиуса кожуха в сторону вращения. Далее при вращении барабана рабочие части пальцев, поднимая стебли выше, все более убираются внутрь кожуха и выходят из подбираемой ленты. В верхнем своем положении рабочие части пальцев полностью убираются под кожух и выходят из ленты стеблей. Но в это время лента

уже находится над кожухом и увлекается им, при этом она одновременно срединной частью стеблей касается и приводного ремня, активно увлекается его рабочей поверхностью и отводится от барабана, а далее передается к последующим рабочим органам машины. Пальцы сзади оси вращения кожуха выходят из него, снова приближаются к почве и готовятся вступить в контакт со стеблями для повторения выполнения технологического процесса подбора ленты.

В тяжелых условиях работы машины, когда подбираемая лента стеблей сильно прибита к почве и трудно от нее отделяется, для обеспечения чистоты подбора стеблевой массы барабан опускают ниже. В этом случае рабочие части пальцев, совершая вращательное движение вниз сзади оси вращения кожуха и выходя из него, подходят к почве раньше, чем окажутся в нижнем положении пазы на кожухе, через которые выходят из него рабочие части пальцев. Далее при вращении барабана кончики рабочих частей пальцев касаются поверхности почвы и несколько входят в нее. Но встречают сопротивление со стороны почвы, и это усилие возрастает по мере поворота барабана. Усилие от рабочей части пальца передается механизму уборки. В последнем закручиваются соответствующие пружины, что и позволяет рабочей части пальца несколько убраться внутрь кожуха. И чем больше будет усилие со стороны почвы на кончик рабочей части пальца, тем дальше уходит палец внутрь кожуха. Тем самым предотвращается зарывание рабочей части пальца в почву и отбрасывание ее в подбираемую стеблевую массу. Но при этом рабочая часть пальца не теряет способности отделять стебли льна от почвы, она выполняет технологический процесс, то есть подбирает ленту льна.

При дальнейшем движении машины вперед и повороте барабана вокруг своей оси после того, как пазы в кожухе барабана для выхода рабочих частей пальцев пройдут самое нижнее положение и будут уже удаляться от почвы, кончики рабочих частей пальцев, проскользнув по поверхности почвы, будут встречать все меньшее ее сопротивление. И когда сила сопротивления почвы, действующая на кончик рабочей части пальца, будет уменьшаться, пружина механизма уборки станет раскручиваться и через поводок пальца выдавливать его рабочую часть из кожуха. Да-

лее при нахождении пальца в переднем, верхнем и заднем положениях относительно оси вращения барабана взаимодействие всех деталей, находящихся внутри кожуха, и рабочих частей пальцев со стеблевой массой не отличается от описанного ранее.

Таким образом, и при указанном некотором уборании внутрь кожуха рабочих частей пальцев при их взаимодействии с почвой эти части пальцев будут отделять стеблевую массу от почвы, поднимать ее, одновременно выходя из ленты, на верх кожуха и к ремню, приводящему кожух во вращение, а ремень в свою очередь будет передавать ленту к последующим органам машины, то есть технологический процесс подбора ленты будет выполняться.

Улучшение выполнения технологического процесса в сравнении с серийным барабаном происходит за счет того, что каждый палец копирует микрорельеф поля независимо от других, не зарываясь в почву. Поэтому можно будет приблизить барабан к почве в тяжелых условиях его работы. При таком положении барабана увеличивается время и длина контакта пальца с почвой, то есть уменьшается площадь в продольно-вертикальной плоскости ленты между почвой и траекториями движения концов пальцев, в которой пальцы не действуют на стебли. Указанное выше приведет к повышению чистоты подбора стеблей, в том числе и на прибитых к почве или проросших травой лентах. Рабочая часть пальцев новых барабанов отклонена от радиуса кожуха в сторону вращения, поэтому во время контакта со стеблями палец действует на отрыв их от почвы в большей степени, чем палец серийного барабана. При опускании барабана палец будет действовать на отрыв стеблей еще активней, но зарываться в почву он не будет, так как имеет возможность убраться внутрь кожуха под действием почвы. Палец нового барабана действует на стебли со скоростью, в полтора – два раза меньшей, чем палец серийного барабана. Поэтому он меньше повреждает стебли. Это даст возможность использовать машину с новым барабаном в том числе и на более влажных лентах, то есть увеличивается время использования машины. Кроме указанного, так как палец нового барабана не будет зарываться в почву, уменьшится загрязнение стеблевой массы посторонними элементами.

Результаты исследования и их анализ. Криволинейная форма пальцев, способствующая более полному подбору льна, при определенных условиях в момент убирания пальцев внутрь кожуха может приводить к защемлению стеблей между своей криволинейной частью и кожухом. Поэтому необходимо рассмотреть взаимодействие стеблей с кожухом и пальцем криволинейной формы.

Для определения условия незащемления стеблей между рабочей частью пальца и кожухом рассмотрим силы, действующие на стебель.

Как показано на рис. 3, на стебель действуют следующие силы: N_1 и N_2 , направленные по нормали к поверхностям, взаимодействующим со стеблем; $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$ – силы трения, направленные по касательным к этим же поверхностям в стороны, противоположные движению стебля; $G_{ст} = m_{ст} \cdot g$ – вес стебля; $J_1 = m_{ст} \cdot \varepsilon \cdot R_B$ – тангенциальная составляющая силы инерции; $J_2 = m_{ст} \cdot \omega^2 \cdot R_B$ – нормальная составляющая силы инерции; T – сила натяжения, возникающая от сцепленности стебля с поднимаемой лентой.

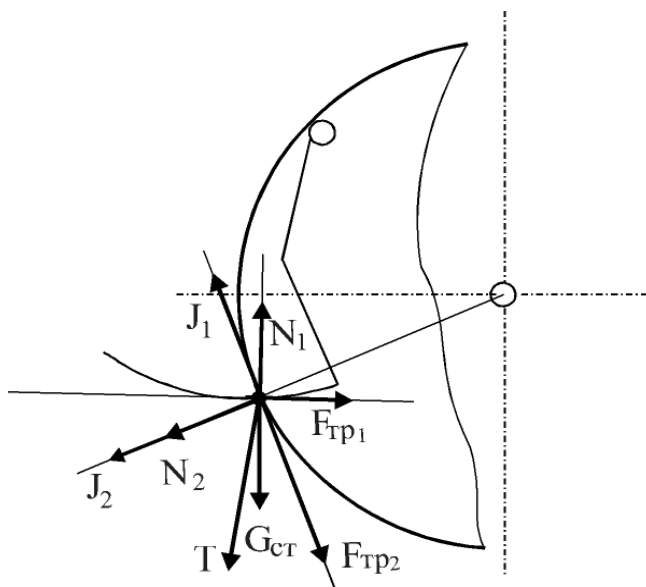


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на стебель

Для упрощения расчётов и из-за небольшой массы стебля (порядка 0,5 г) можно пренебречь силой веса стебля $G_{ст}$ и силой инерции от нормального ускорения J_2 . В случае равномерного движения стебля сила инерции от тангенциального ускорения J_1 будет равна нулю. Действие силы натяжения T рассмотрено в работе [3, с. 71-83]. Она направлена по касательной к ленте и складывается из силы сцепления стеблей с льнищем $P_{сц}$ и веса ленты $G_{л}$:

$$P_{г.сц} = T \cdot \cos \varphi, P_{в.сц} + G_{л} = T \cdot \sin \varphi.$$

Разделив второе уравнение на первое, получим: $\frac{P_{в.сц} + G}{P_{г.сц}} = \operatorname{tg} \theta$. Угол θ – это угол между направлением силы натяжения T и горизонталью. Максимальное значение сил трения равно

[4, с. 185]: $F_{тр1} = f_1 \cdot N_1$, $F_{тр2} = f_2 \cdot N_2$, где f_1 и f_2 – коэффициенты трения стебля о палец и кожух соответственно.

Для выполнения условия незащемления необходимо, чтобы во время нахождения стебля между кожухом и убирающимся пальцем результирующая сила выталкивала стебель из образующегося клина. Определим условие незащемления стебля без учёта силы натяжения ленты T . Для этого разложим действующие силы на две выбранные непараллельные координатные оси τ и τ_1 . Они направлены таким образом, что ось τ совпадает с направлением касательной к кожуху, а ось τ_1 с направлением касательной, проведенной к криволинейной части пальца. Тогда получим следующие условия незащемления стебля:

$$\begin{cases} \sum F_{\tau} = -f_2 \cdot N_2 + N_1 \cdot \cos \delta - f_1 \cdot N_1 \cdot \cos(90^\circ - \delta) \geq 0 \\ \sum F_{\tau_1} = N_2 \cdot \cos \delta - f_1 \cdot N_1 - f_2 \cdot N_2 \cdot \sin \delta \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

В соответствии с выбранными осями угол δ – это угол между касательной к окружности кожуха, проведенной через точку касания стебля с кожухом и нормалью к касательной, проведенной через точку касания стебля и криволинейной части пальца. Из рисунка видно, что такой же угол δ будет между нормалью к касательной, проведенной к окружности, и касательной к криволинейной части пальца (рис. 4).

Проведем необходимые преобразования: в первом неравенстве перенесём $(-f_2 \cdot N_2)$ из левой части в правую, заменим $\cos(90^\circ - \delta)$ на $\sin \delta$, вынесем N_1 за скобки и поделим обе части на N_1 ; во втором неравенстве перенесём $(-f_1 \cdot N_1)$ из левой части в правую, вынесем N_2 за скобки и поделим обе части на N_2 . Тогда получим:

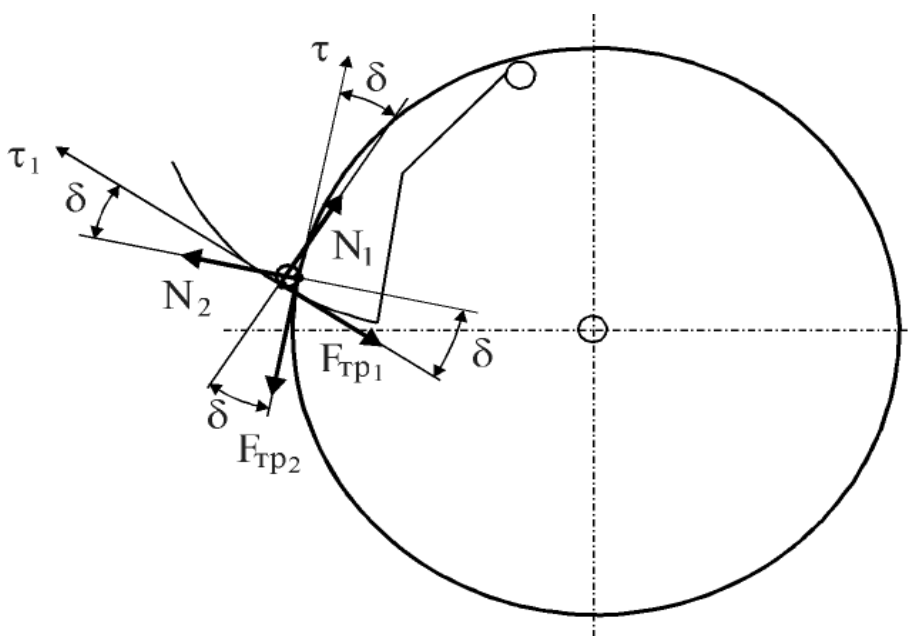


Рисунок 4 – К расчету условия незащемления

$$\begin{cases} (\cos \delta - f_1 \sin \delta) \geq f_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \\ (\cos \delta - f_2 \sin \delta) \geq f_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \end{cases}, \quad (1)$$

Зная, что коэффициент трения равен тангенсу угла трения [5, с.78], то есть $f_1 = \operatorname{tg}(\varphi_1)$, $f_2 = \operatorname{tg}(\varphi_2)$ и заменив отношение реакций $\frac{N_2}{N_1}$ на k получим:

$$\begin{cases} (\cos \delta - \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \sin \delta) \geq \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot k \\ (\cos \delta - \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \sin \delta) \geq \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \frac{1}{k} \end{cases}$$

Заменим тангенс угла отношением синуса к косинусу этого же угла и приведем левую часть обоих неравенств к общему знаменателю:

$$\begin{cases} \frac{\cos(\delta + \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \geq \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} \cdot k \\ \frac{\cos(\delta + \varphi_2)}{\cos \varphi_2} \geq \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} \cdot \frac{1}{k} \end{cases}$$

Перемножив верхнее неравенство на нижнее, получим:

$$\cos(\delta + \varphi_1) \cdot \cos(\delta + \varphi_2) \geq \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2.$$

Преобразуем данное выражение:

$$\begin{aligned} & \cos^2 \delta \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 - \cos \delta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 - \sin \delta \cdot \cos \delta \cdot \sin \varphi_1 \times \\ & \times \cos \varphi_2 + \sin^2 \delta \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 \geq \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2. \\ & \cos^2 \delta \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - \cos \delta \cdot \sin \delta \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_1) \geq 0. \\ & \cos \delta \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \geq \sin \delta \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \end{aligned}$$

Разделив обе части полученного неравенства на $\cos \delta$ и $\sin(\varphi_1 + \varphi_2)$, окончательно получим:

$$\operatorname{ctg}(\varphi_1 + \varphi_2) \geq \operatorname{tg} \delta. \quad (2)$$

Заменив котангенс суммы углов φ_1 и φ_2 через отношение тангенсов этих же углов, то есть: $\operatorname{ctg}(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2}$ и помня,

что тангенс угла трения есть коэффициент трения, окончательно можно записать:

$$\operatorname{tg} \delta \leq \frac{1 - f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2} \quad (3)$$

Выражение 3 определяет минимальное значение угла δ . Зная его, всегда можно определить угол между касательными, проведенными через точки контакта стебля с криволинейным профилем пальца и кожуха. Как видно из схемы, этот угол равен $(90^\circ - \delta)$. Приняв $f_1 = f_2 = 0,5$

[6, с. 61] и решив полученное неравенство, получим:

$$\operatorname{tg} \delta \leq \frac{1 - 0,5 \cdot 0,5}{0,5 + 0,5} \leq 0,75$$

$$\delta \leq \operatorname{arctg}(0,75)$$

$$\delta \leq 37^\circ.$$

Таким образом, величина угла δ , определяющего условие незащемления, зависит только от значений коэффициентов трения стебля о взаимодействующие поверхности. При выбранных усредненных значениях этих коэффициентов угол δ не должен превышать 37° .

Ввиду того, что сила натяжения ленты T может достигать больших значений, рассмотрим влияние этой силы на защемление стебля. На рис. 5 показана схема сил с учетом силы натяжения и расстановкой необходимых для расчета углов.

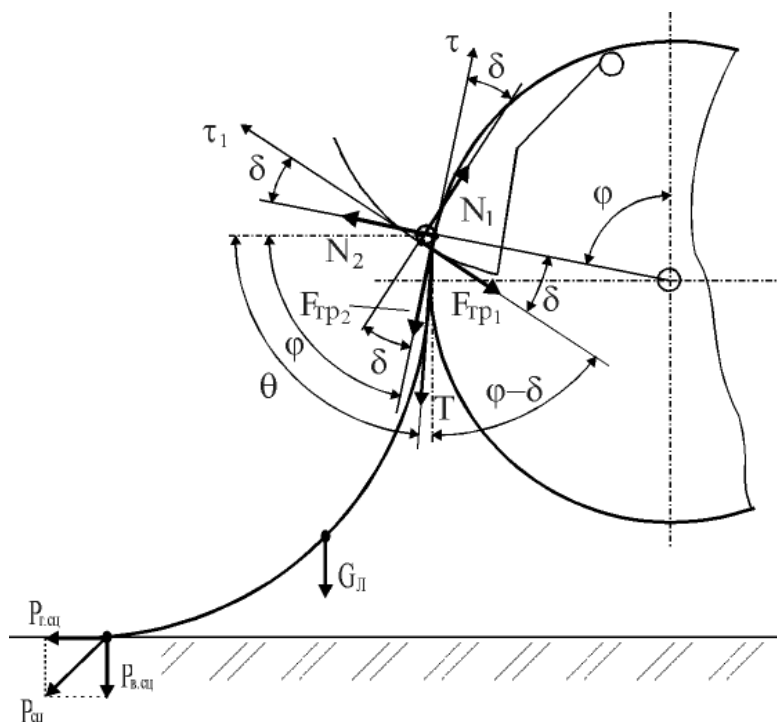


Рисунок 5 – Условие незащемления с учетом силы натяжения ленты

Тогда условие незащемления с учетом силы натяжения будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \sum F_x = -f_2 \cdot N_2 + N_1 \cdot \cos \delta - f_1 \cdot N_1 \cdot \sin \delta - T \cdot \cos(\theta - \varphi) \geq 0 \\ \sum F_y = N_2 \cdot \cos \delta - f_1 \cdot N_1 - f_2 \cdot N_2 \cdot \sin \delta - T \cdot \sin(\theta - \varphi + \delta) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим равномерное движение стебля по поверхностям, тогда знак неравенства можно заменить на знак равенства. Проведем необходимые преобразования: вынесем общий множитель за скобки, а проекцию силы натя-

жения на соответствующую ось перенесем из левой части в правую:

$$\begin{cases} N_1 \cdot (\cos \delta - f_1 \sin \delta) - f_2 \cdot N_2 = T \cdot \cos(\theta - \varphi) \\ N_2 \cdot (\cos \delta - f_2 \sin \delta) - f_1 \cdot N_1 = T \cdot \sin(\theta - \varphi + \delta) \end{cases} \quad (5)$$

Выразим N_1 из первого и второго уравнений и приравняем их:

из первого уравнения:

$$N_1 = \frac{T \cdot \cos(\theta - \varphi) + f_2 \cdot N_2}{\cos \delta - f_1 \cdot \sin \delta},$$

из второго уравнения:

$$N_1 = \frac{N_2 \cdot (\cos \delta - f_2 \cdot \sin \delta) - T \cdot \sin(\theta - \varphi + \delta)}{f_1}.$$

$$(T \cdot \cos(\theta - \varphi) + f_2 \cdot N_2) \cdot f_1 = N_2 \cdot (\cos \delta - f_2 \cdot \sin \delta) - T \cdot \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot (\cos \varphi - f_1 \cdot \sin \delta)$$

Обозначим выражения $(\cos \varphi - f_1 \cdot \sin \delta)$ как Δ_1 , а $(\cos \delta - f_2 \cdot \sin \delta)$ как Δ_2

и вынесем T за скобки, получим:

$$N_2 \cdot (f_1 \cdot f_2 - \Delta_1 \cdot \Delta_2) = -T \cdot [f_1 \cdot \cos(\theta - \varphi) + \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot \Delta_1].$$

$$N_2 = \frac{f_1 \cdot \cos(\theta - \varphi) + \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot \Delta_1}{(\Delta_1 \cdot \Delta_2 - f_1 \cdot f_2)} \cdot T. \quad (6)$$

Из выражения (5) выразим N_1 :

$$N_1 = \frac{N_2 \cdot (\cos \delta - f_2 \cdot \sin \delta) - T \cdot \sin(\theta - \varphi + \delta)}{f_1}. \quad (7)$$

Заменим N_2 выражением (6), тогда получим:

$$N_1 = \frac{f_1 \cdot \cos(\theta - \varphi) \cdot \Delta_2 + \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 - \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 +}{f_1 \cdot (\Delta_1 \cdot \Delta_2 - f_1 \cdot f_2)} \times$$

$$\times \frac{+ \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot f_1 \cdot f_2}{f_1 \cdot (\Delta_1 \cdot \Delta_2 - f_1 \cdot f_2)} \cdot T.$$

$$N_1 = \frac{\cos(\theta - \varphi) \cdot \Delta_2 + \sin(\theta - \varphi + \delta) \cdot f_2}{\Delta_1 \cdot \Delta_2 - f_1 \cdot f_2} \cdot T \quad (8)$$

Уравнения 6 и 8 позволяют определить значения нормальных реакций, если известны коэффициенты трения стебля о соответствующие поверхности и известна сила натяжения ленты.

В среде MathCAD данные уравнения были проанализированы методами математического моделирования.

Выводы. По мере роста угла δ возрастают значения нормальных реакций, причём на начальном этапе прирост незначителен, а по мере приближения к некоторому критическому значению угла $\delta_{кр}$ усилие возрастает до бесконечности. С физической точки зрения этот момент

соответствует перерезанию – разрушению стебля. Численное значение критического угла $\delta_{кр}$ защемления определяется исключительно величинами коэффициентов трения стебля о палец и кожух. С уменьшением коэффициентов трения увеличивается угол δ , то есть защемление наступит при большей кривизне пальца. Значение критического угла $\delta_{кр}$, рассчитанного по формуле 3, соответствует значению этого же угла, определенного с помощью математического моделирования с учетом силы T . Оптимальным углом $\delta_{опт}$, обеспечивающим незначительный рост реакций N_1 и N_2 , является угол равный 23° .

Список используемой литературы

References

1. Сизов В.И., Сизов И.В. Разработка обора-
чивателей льна: тенденции и перспективы // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. № 8.

2. Подбирающий барабан для стеблей сельско-
хозяйственных культур : пат. 2250594 Рос. Феде-
рация : МПК А 01 D 89/00, 45/06. / Смирнов Н.А.,
Трофимов М.А, Смирнов С.В., Лобачев А.А.; за-
явитель и патентообладатель Костромская сель-
скохоз. академ. – № 2003106075/12 заявл.
03.03.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.

3. Черников В.Г. Машины для уборки льна
(конструкция, теория, расчет). М.: Инфа-М, 1999.

4. Тарг С.М. Краткий курс теоретической
механики: учебник для вузов. 12-е изд. стер.
М.: Высш. шк., 2002.

5. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс
теоретической механики: учебник для вузов. Изд.
13-е, исправленное. М.: Интеграл-Пресс, 2006.

6. Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М.
Сельскохозяйственные материалы (виды, со-
став, свойства). М.: ИК «Родник», журнал
«Аграрная наука», 1998.

1. Sizov V.I., Sizov I.V. Razrabotka obor-
achivateley lna: tendentsii i perspektivy // *Traktory
i selskokhozyaystvennyye mashiny*. 2006. № 8.

2. Podbirayushchiy baraban dlya stebley
selskokhozyaystvennykh kultur : pat. 2250594
Ros. Federatsiya : MPK A 01 D 89/00, 45/06. /
Smirnov N.A., Trofimov M.A, Smirnov S.V., Lo-
bachev A.A.; zayavitel i patentoobladatel Ko-
stromskaya selskokhoz. akadem. – №
2003106075/12 zayavl. 03.03.2003; opubl.
27.04.2005, Byul. № 12.

3. Chernikov V.G. Mashiny dlya uborki lna
(konstruktsiya, teoriya, raschet). M.: Infa-M, 1999.

4. Targ S.M. Kratkiy kurs teoreticheskoy mek-
haniki. Uchebnik dlya vuzov. 12-e izd. ster. M.:
Vyssh. shk., 2002.

5. Yablonskiy A.A., Nikiforova V.M. Kurs te-
oreticheskoy mekhaniki: Uchebnik dlya vuzov. izd.
13-e, ispravlennoe. M.: Integral-Press, 2006.

6. Kovalev N.G., Khaylis G.A., Kovalev M.M.
Selskokhozyaystvennyye materialy (vidy, sostav,
svoystva). M.: IK «Rodnik», zhurnal «Agrarnaya
nauka», 1998.