

Л.Я. Степук, В.В. Микульский, П.П. Бегун
*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: Wadim_501@mail.ru*

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ УСТАНОВКИ НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ НА ШИРОКОЗАХВАТНЫЕ ШТАНГОВЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ШНЕКО-КАТУШЕЧНОГО ТИПА

В статье приводятся теоретические доказательства о необходимости установки накопительных емкостей на широкозахватные штанговые распределители минеральных удобрений шнеко-катушечного типа на примере работы штангового распределителя с дозирующими высежными отверстиями в днище кожуха.

Ключевые слова: минеральные удобрения, внесение, штанговый распределитель, катушечный дозатор, дозирующие отверстия, накопительные ёмкости, коэффициент заполнения, межвитковое пространство, интегрирование, призма волочения.

L. Y. Stepuk, V. V. Mikulsku, P. P. Begun
*RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: Wadim_501@mail.ru*

JUSTIFICATION OF THE NECESSITY TO THE INSTALLATION OF STORAGE CONTAINERS ON WIDE-CUT ROD DISTRIBUTORS OF MINERAL FERTILIZERS OF THE SCREW AND REEL TYPE

The article provides theoretical evidence of the necessity to install storage containers on wide-cut rod distributors of mineral fertilizers of the screw and reel type using the example of the operation of a rod distributor with metering seeding holes in the base of the screw enclosure using.

Keywords: mineral fertilizers, application, rod distributor, reel dispenser, metering holes, storage containers, space factor, interturn space, integration, creep prism.

Введение

В ЦНИИМЭСХе (ныне РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства») еще в 1980-е годы был создан ряд штанговых машин для внесения гранулированных минеральных удобрений: подкормщик РШУ-12, МШХ-9 и МХС-10 [1, 2]. Принцип работы этих машин заключался в разделении общего потока удобрений, поступающего из бункера или кузова машины, на максимально большое количество малых потоков, разделение которых осуществляется штанговым распределителем с дозирующими высежными отверстиями, расположенными в нижней её части. Однако, как было установлено, такой принцип работы штанговых распределителей существенно усложняет равномерное внесение подкормочных доз удобрений, так как для этого необходимо уменьшить ширину высежных отверстий до 6 мм, через которые, естественно, не может быть обеспечено устойчивое (непрерывное) их истечение (высев) [3].

Для устранения данного недостатка разработчиками данных машин было предложено в нижней части кожухов распределяющих шнековых штанг, над отверстиями, установить катушечные дозаторы, причем размеры отверстий, в данном случае, можно было выполнять уже значительно больше размера максимального сводообразующего отверстия для вносимого материала [3]. Данное решение, по мнению разработчиков, должно было обеспечить беспрепятственное просыпание удобрений в катушечные дозаторы непрерывным потоком, исключая заклинивание и сводообразование. Катушечные дозаторы, в свою очередь, вращающимися катушками способны высокоточно вносить удобрения на поверхность поля, с

неравномерностью 3-7 % [4]. Однако экспериментальные исследования нового типа штанговых шнеко-катушечных распределителей минеральных удобрений привели к выявлению новых недостатков. Так, исследованиями установлено, что для шнека, удовлетворяющего требованиям производительности по внесению максимальных доз удобрений, наблюдается их пульсирующая подача на катушки дозаторов через отверстия, расположенные ближе к концу штанги, что приводит, соответственно, к пульсирующему высеву на поле, а, следовательно, и к высокой неравномерности внесения удобрений. Кроме того, невозможность соблюдения равенства производительностей шнека штанги и катушечных дозаторов ведет к недогрузке крайних катушечных дозаторов или к их перегрузке и заклиниванию шнека штанги.

Выходом из данной проблемы, по мнению разработчиков, одна – установка накопительных емкостей перед катушечными дозаторами, причем объем накопительных емкостей должен быть разным по длине штанги - увеличиваться от загрузочной горловины штанги к ее концу [5]. Это вызвано тем, что количество удобрений в кожухе штанги уменьшается по мере их продвижения к крайнему катушечному дозатору вследствие высева удобрений предыдущими дозаторами, что ими и было доказано [6]. Однако приведенные теоретические доказательства о необходимости установки накопительных емкостей на широкозахватные штанговые распределители минеральных удобрений шнеко-катушечного типа очень сложны и требуют некоторой доработки, поэтому в данной работе предложен новый способ такого доказательства.

Основная часть

Шнеко-катушечная штанга (рис. 1) по-существу представляет собой многопоточный дозатор. В процессе её работы, по мере продвижения удобрений к концу штанги, происходит постоянное уменьшение коэффициента заполнения кожуха шнека от заборной камеры к последнему дозирующему отверстию.

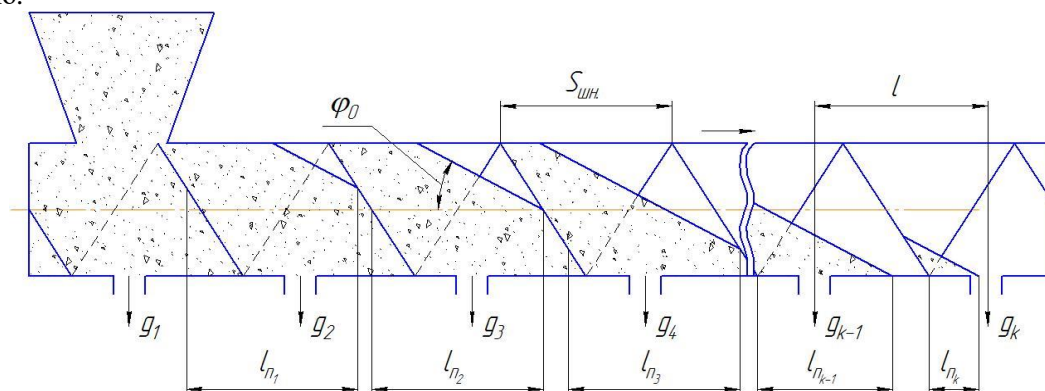


Рис. 1. Схема изменения наполнения кожуха шнека (штанги) удобрениями по мере удаления от загрузочной горловины

Из рисунка видно, что по мере продвижения удобрений от загрузочной горловины их высыпание происходит из большого количества высевных отверстий и естественно происходит снижение коэффициента заполнения (ψ_i). Причем, когда

$$l_n < S_{шн.}, \quad (1)$$

где l_n – длина подошвы тела волочения, м, происходит нарушение условия непрерывности высева удобрений над k_i -м дозатором;

$S_{шн.}$ – шаг винта шнека, м.

Для определения k_i -го по номеру дозатора, свыше которого нарушается условие непрерывности, запишем формулу для определения коэффициента заполнения шнека удобрениями над первым дозатором:

$$\psi_0 = \frac{V_{шн.}}{V_0}, \quad (2)$$

где $V_{шн.}$ – объем удобрений над первым дозатором на длине $l_{к.д.}$, $м^3$;

V_0 – объем внутренней части кожуха шнека на длине $l_{к.д.}$, $м^3$;

$l_{\text{к.д.}}$ – длина кожуха шнека в районе дозатора, м.

Указанные объемы определим из выражений:

$$V_{\text{шн}} = \frac{Q_{\text{шн.}} \cdot l_{\text{к.д.}}}{\gamma \cdot \mathfrak{D}_{\text{шн.}}}; \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{Q_{\text{шн. max}} \cdot l_{\text{к.д.}}}{\gamma \cdot \mathfrak{D}_{\text{шн.}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{шн.}}$ – производительность шнека, кг/с;

γ – насыпная плотность удобрений, кг/м³;

$\mathfrak{D}_{\text{шн.}}$ – скорость образования винтовой поверхности шнека, м/с;

$Q_{\text{шн. max}}$ – производительность шнека при коэффициенте заполнения $\Psi_0 = 1$ над первым дозатором, кг/с.

Подставив выражения (3) и (4) в формулу (2), получим:

$$\Psi_0 = \frac{Q_{\text{шн.}}}{Q_{\text{шн. max}}}. \quad (5)$$

С учетом расхода удобрений через дозаторы производительность шнека над k_i -ым дозатором:

$$Q_i = Q_{\text{шн.}} - q_{\text{д}} \cdot k_{\text{д}i}, \quad (6)$$

где $q_{\text{д}}$ – производительность дозатора, кг/с;

$k_{\text{д}i}$ – порядковый номер дозатора от загрузочной горловины штанги.

Подставив выражение (6) в (5), получим коэффициент заполнения шнека над k_i -м дозатором:

$$\Psi_i = \frac{Q_{\text{шн.}} - q_{\text{д}} \cdot k_{\text{д}i}}{Q_{\text{шн. max}}} = \Psi_0 - \frac{q_{\text{д}} \cdot k_{\text{д}i}}{Q_{\text{шн. max}}}. \quad (7)$$

Выполнив преобразование формулы (7) получим k_i -ый по номеру дозатор, свыше которого нарушается условие непрерывности высева удобрений.

$$k_i = \frac{Q_{\text{шн. max}} (\Psi_0 - \Psi_i)}{q_{\text{д}}}. \quad (8)$$

Коэффициент заполнения Ψ_i межвиткового пространства над k_i -м дозатором, ниже которого нарушается условие непрерывности высева удобрений, можно определить, зная объём удобрений над k_i -м дозатором. Данный объём можно найти методом интегрирования.

Рассмотрим с учетом условия (1) три возможные призмы волочения материала в межвитковом пространстве (рис. 2).

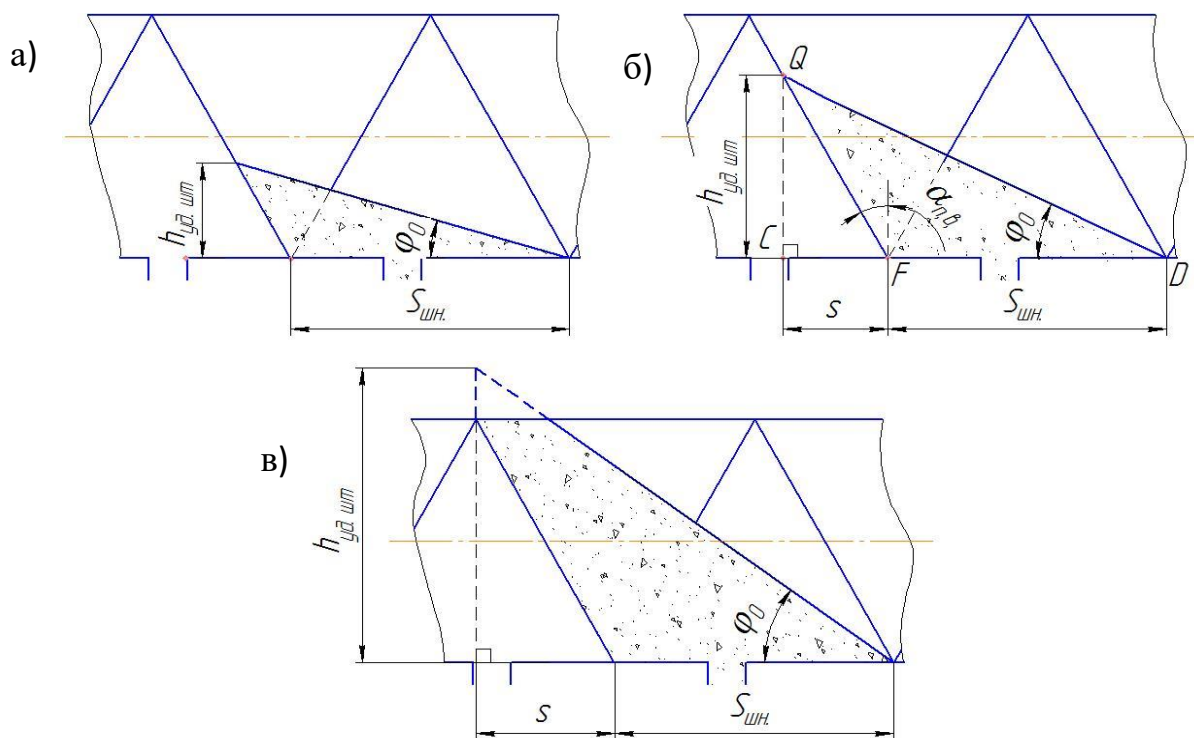


Рис. 2. Призма волочения удобрений в межвитковом пространстве
 а) $h_{уд.шт.} \leq R_{к. шн.}$; б) $R_{к. шн.} \leq h_{уд.шт.} \leq 2R_{к. шн.}$; в) $h_{уд.шт.} \geq 2R_{к. шн.}$.

$$h_{уд.шт.} \leq R_{к. шн.}; \quad (9)$$

$$R_{к. шн.} \leq h_{уд.шт.} \leq 2R_{к. шн.}; \quad (10)$$

$$h_{уд.шт.} \geq 2R_{к. шн.}, \quad (11)$$

где $h_{уд.шт.}$ – высота уровня удобрений в начале рассматриваемого отрезка межвиткового пространства шнека, м;

$R_{к. шн.}$ – внутренний радиус кожуха шнека, м.

Из условия непрерывности высева удобрений над k_i -ым дозатором высоту уровня удобрений в начале рассматриваемого отрезка штанги при высоте уровня удобрений в конце отрезка равным нулю определим из рисунка 2б:

$$h_{уд.шт.} = \frac{S_{шн.} \cdot \cos \alpha_{п.в} \sin \varphi_0}{\cos(\alpha_{п.в} + \varphi_0)}, \quad (12)$$

где $\alpha_{п.в.}$ – угол подъема винтовой линии, град;

φ_0 – угол внутреннего трения материала, град.

Согласно рис. 2а, найдем объем удобрений в межвитковом пространстве шнека. Для этого отсечем кожух шнека, в котором расположен искомый объем удобрений, с двух сторон плоскостями параллельными плоскости XOZ так, как на рис. 3.

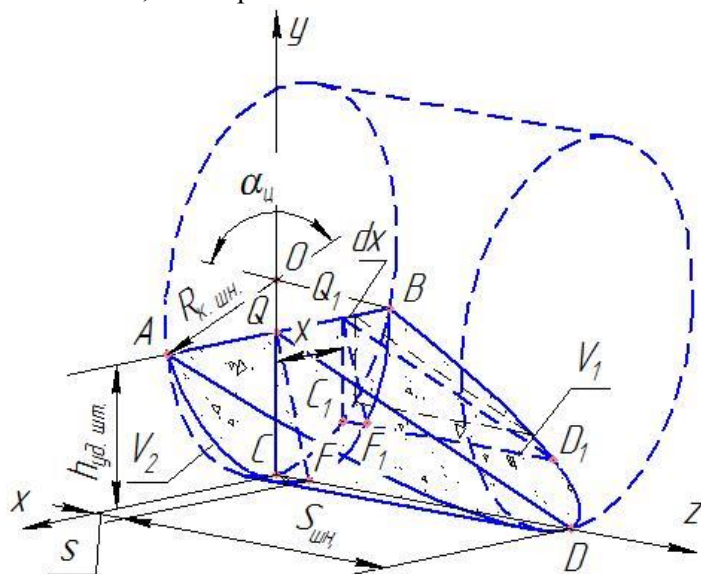


Рис. 3. К определению объема удобрений в межвитковом пространстве

Из рис. 3 видно, что полученное тело имеет форму цилиндра длиной $s + S_{\text{шн.}}$. В данном цилиндре искомое тело ограничено двумя плоскостями FAB и DAB и частью боковой поверхности цилиндра. Тогда искомый объем удобрений будет равен

$$V_{\text{шн.}} = V_1 - V_2, \quad (13)$$

где V_1 – объем материала, ограниченный плоскостями CAB и DAB и частью боковой поверхности цилиндра, m^3 ;

V_2 – объем материала, ограниченный плоскостями CAB и FAB и частью боковой поверхности цилиндра, m^3 .

Для определения V_1 , обозначим через $R_{\text{к.шн}}$ радиус OA сегмента CAB . Через $s + S_{\text{шн.}}$ обозначим высоту CD тела. Проводя прямую плоскость параллельно плоскости YOZ через прямую OD , получим прямоугольный треугольник DCQ , катеты которого – h и $s + S_{\text{шн.}}$.

Разобьем наше тело на бесконечно тонкие пластинки плоскостями, параллельными плоскости DCQ ; в сечениях получим прямоугольные треугольники, подобные треугольнику, как например, треугольник $D_1C_1Q_1$.

Обозначим через x расстояние QQ_1 от сечения $D_1C_1Q_1$ до точки Q , тогда толщина пластинки будет равна dx . Через y обозначим катет Q_1C_1 и через S_z – катет C_1D_1 .

Тогда площадь сечения $D_1C_1Q_1$ будет равна

$$S_{D_1C_1Q_1} = \frac{1}{2} y S_z.$$

Таким образом, объем пластинки (которую ввиду её бесконечной тонкости можно считать призмой с основанием $D_1C_1Q_1$ и высотой dx) равен

$$V_1 = \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{1}{2} y S_z dx, \quad (14)$$

где a – половина длины хорды AB , м.

Длина хорды окружности определяется по известной формуле:

$$a = 2R_{\text{к. шн.}} \sin \frac{\alpha_{\text{ц}}}{2},$$

где $\alpha_{\text{ц}}$ – центральный угол, град.

Центральный угол можно определить из прямоугольного треугольника QAO по теореме синусов:

$$\alpha_{\text{ц}} = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{R_{\text{к. шн.}}^2 - (h_{\text{уд. шт.}} - R_{\text{к. шн.}})^2}}{R_{\text{к. шн.}}} \right).$$

Аналогичным образом была получена формула для определения объёма тела V_2

$$V_2 = \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{1}{2} y s_z dx. \quad (15)$$

Тогда, подставив в формулу (13) формулы (14) и (15), получим:

$$V_{\text{шн.}} = \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{1}{2} y S_z dx_1 - \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{1}{2} y s_z dx. \quad (16)$$

Для того, чтобы вычислить этот интеграл, необходимо выразить yS_z и ys_z через x .

Из подобия треугольников DCQ и $D_1C_1Q_1$ имеем:

$$\frac{S_z}{y} = \frac{s + S_{\text{шн.}}}{h_{\text{уд. шт.}}}. \quad (17)$$

где s – расстояние CF (рисунок 2а), м.

Данное расстояние можно определить по следующей формуле:

$$s = \frac{h_{\text{уд. шт.}}}{\text{tg} \varphi_0} - S_{\text{шн.}}. \quad (18)$$

Если подставить в формулу (18) формулу (12) и произвести некоторые преобразования, то получим:

$$s = \frac{S_{\text{шн.}} \cdot (\cos \alpha_{\text{п.в}} \cos \varphi_0 - \cos(\alpha_{\text{п.в}} + \varphi_0))}{\cos(\alpha_{\text{п.в}} + \varphi_0)}.$$

Выразим из формулы (17) S_z

$$S_z = \frac{s + S_{\text{шн.}}}{h_{\text{уд. шт.}}} y.$$

Проведем аналогичные операции с S_z

$$s_z = \frac{s}{h_{\text{уд. шт.}}} y.$$

Таким образом, подинтегральные функции (16) примут вид:

$$V_{\text{шн.}} = \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{(s + S_{\text{шн.}})}{2h_{\text{уд. шт.}}} y^2 dx - \int_{-a/2}^{+a/2} \frac{s}{2h_{\text{уд. шт.}}} y^2 dx. \quad (19)$$

Поскольку x и y связаны уравнением

$$x^2 + y^2 = R^2,$$

где по теореме Пифагора

$$y^2 = \left(h_{\text{уд. шт.}} - R_{\text{к. шн.}} + \sqrt{R_{\text{к. шн.}}^2 - x^2} \right)^2, \quad (20)$$

то, подставив уравнение (20) в (19) и после некоторых преобразований, получим:

$$V_{\text{шн.}} = \left(\frac{S_{\text{шн.}}}{2h} \right) \int_{-a/2}^{+a/2} \left(h_{\text{уд. шт.}} - R_{\text{к. шн.}} + \sqrt{R_{\text{к. шн.}}^2 - x^2} \right)^2 dx, \quad (21)$$

Проинтегрировав формулу (21) и подставив в (2), получим окончательную формулу для определения коэффициента заполнения над k -ым дозатором для первого варианта тела волочения:

$$\Psi_1 = \left(\frac{1}{2\pi h_{\text{уд. шт.}} R_{\text{к. шн.}}^2} \right) \left(k_1 - 2m_1 R_{\text{к. шн.}}^2 + 2g_1 h_{\text{уд. шт.}} \right), \quad (22)$$

где

$$k_1 = x h_{\text{уд. шт.}}^2 + 2x R_{\text{к. шн.}}^2 - \frac{x^3}{3};$$

$$m_1 = \frac{x \sqrt{R_{\text{к. шн.}}^2 - x^2} + R_{\text{к. шн.}}^2 \arcsin(x/R_{\text{к. шн.}})}{2};$$

$$g_1 = \frac{x \sqrt{R_{\text{к. шн.}}^2 - x^2} + R_{\text{к. шн.}}^2 \arcsin(x/R_{\text{к. шн.}})}{2} - r;$$

$$+ a/2 \leq x \leq -a/2.$$

Аналогичным образом были получены коэффициенты заполнения межвиткового пространства для второго варианта призмы волочения:

$$\Psi_2 = \frac{\left[\frac{(h_{\text{карб. шт.}} - R_{\text{к. шн.}}) S_{\text{шн.}} m_2}{h_{\text{карб. шт.}}} + \frac{S_{\text{шн.}}}{h_{\text{карб. шт.}}} \left(\frac{2}{3} R_{\text{к. шн.}}^3 - \frac{12aR_{\text{к. шн.}}^3 - a^3}{24} \right) + g_2 \right]}{\pi R_{\text{к. шн.}}^2 S_{\text{шн.}}}, \quad (23)$$

где

$$m_2 = \frac{\pi R_{\text{к. шн.}}^2}{2} + (h_{\text{уд. шт.}} - R_{\text{к. шн.}}) R_{\text{к. шн.}} \sin \frac{\alpha_{\text{ц}}}{2};$$

$$g_2 = \frac{2}{3} R_{\text{к. шн.}}^3 \frac{S_{\text{шн.}}}{h_{\text{уд. шт.}}}.$$

Для третьего варианта призмы волочения:

$$\Psi_3 = \frac{3\pi S_{\text{шн.}} (h_{\text{уд. шт.}} - R_{\text{к. шн.}}) + 4[h_{\text{уд. шт.}} S_{\text{шн.}} + (h_{\text{уд. шт.}} - 2R_{\text{к. шн.}})(s + S_{\text{шн.}})]}{6\pi S_{\text{шн.}} h_{\text{уд. шт.}}}. \quad (24)$$

Заключение

Таким образом, рассчитав по формуле (12) высоту уровня удобрений в начале отрезка межвиткового пространства шнека штанги в момент нарушения условия непрерывности их высева, и по полученному результату, согласно условиям (9–11), определив их призму волочения и соответствующий ей коэффициент заполнения по формулам (22), (23) или (24) (в зависимости от варианта призмы волочения), по формуле (8) можно определить k_i -й дозатор широкозахватного штангового распределителя, свыше которого нарушается условие непрерывности высева удобрений из последнего.

Применив данный алгоритм к конкретной машине, например, к рассеивателю РМУ-11000 со штанговыми распределителями шнеко-катушечного типа шириной захвата 18 м (разработка РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства») установлено, что при внесении хлористого калия с начальным коэффициентом заполнения кожуха шнека над первым дозатором $\Psi_0 = 0,95$, внутреннем радиусе кожуха шнека $R_{\text{к.шн}} = 0,071$ м, шаге винта шнека $S_{\text{шн}} = 0,128$ м и максимальной производительности катушечного дозатора $q_{\text{д}} = 0,0583$ кг/с (36 катушечных дозаторов на одной 9-ти метровой штанге), уже начиная с 21-го дозатора прекращается непрерывная подача удобрений в них.

В результате получается, что для того чтобы над всеми дозаторами штанги постоянно находился материал, подлежащий дозированию, необходимо предусмотреть между кожухом шнека и дозаторами накопительные ёмкости, которые позволят, не увеличивая габариты штанги (диаметра винта и кожуха), обеспечить непрерывную работу всех дозаторов, что и было реализовано в данном распределителе.

Список использованных источников

1. Степук, Л. Я. Машины для применения средств химизации в земледелии: конструкция, расчет, регулировки: учеб. пособие / Л. Я. Степук, В. Н. Дашков, В. Р. Петровец. – Минск : Дикта, 2006. – 447 с.

2. Степук, Л. Я. О проблемах механизации применения известковых материалов и химизации МХС-10 / Л. Степук [и др.] // Аграрная экономика. – 2012. – № 4. – С. 55–59.
3. Машина штанговая для внесения минеральных удобрений: пат. 5575 Респ. Беларусь, МПК А01С15/00 / Л.Я. Степук, В.В. Барабанов; заявитель Респуб. унитар. предпр. «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – № а 20110579; заявл. 30.12.2012; опубл. 30.10.2013.// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 142.
4. Минеральные удобрения с максимальной эффективностью// Официальный сайт научно-практического журнала «Белорусское сельское хозяйство» [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: [http://agriculture.by/articles/tehnika-i-tehnologii /mineralnye-udobrenija-s-maksimalnoj-jeffektivnostju](http://agriculture.by/articles/tehnika-i-tehnologii/mineralnye-udobrenija-s-maksimalnoj-jeffektivnostju). – Дата доступа: 22.05.2020.].
5. Машина штанговая для внесения минеральных удобрений: пат. 17624 Респ. Беларусь, МПК А01С15/00 / Л.Я. Степук, В.В. Барабанов, Л.М. Протько; заявитель Респуб. унитар. предпр. «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – № u 20090184; заявл. 10.03.2009; опубл. 30.10.2009.// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5. – С. 58.
6. Степук, Л. Я. Обоснование объема накопительных емкостей на штангах шнекокатушечного типа / Л. Я. Степук, В. В. Барабанов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г. : в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 77–90.