

## МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК [631/358:634.7]:634.739.3

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ У ПОВЕРХНОСТИ ЗАТОПЛЕННОГО ЧЕКА ЯГОДНОГО ВОРОХА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УБОРКЕ КЛЮКВЫ КРУПНОПЛОДНОЙ

П. Ю. КРУПЕНИН, А. Г. ЛЯГУСКИЙ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: pavel@krupenin.com

(Поступила в редакцию 15.02.2024)

Механизированная уборка клюквы крупноплодной осуществляется преимущественно мокрым способом. Для плантаций клюквы крупноплодной в Республике Беларусь рациональным техническим средством для отделения ягод от побегов является битерный хедер, обеспечивающий отделение более 80 % ягод за один проход агрегата. Недостатком его работы является отрыв некоторых частей растений: листьев и стеблей как самого кустарничка клюквы, так и сорных растений, в результате чего у поверхности затопленного чека образуется плавающий ягодный ворох, состоящий из ягод и растительных примесей длиной от 1...2 до 40...50 см.

Перспективным типом технических средств для забора ягодного вороха с поверхности затопленного чека являются гидротранспортные установки. С целью адаптации данного технического средства для работы в условиях высокой засоренности ягодного вороха предложено оснастить установку активным гребневым конвейером, обеспечивающим механизированное отделение длинных примесей от вороха.

Для обоснования параметров гребневого конвейера в статье выполнено аналитическое описание формы ягоды клюквы крупноплодной и разработана методика определения координаты поверхности воды относительно геометрического центра свободно плавающих ягод. Описан процесс формирования ягодного вороха при уплотнении понтоном свободно плавающих ягод и определено их количество на 1 м<sup>2</sup> поверхности воды для характерных ситуаций: контакт ягод крупной фракции с ягодами мелкой фракции, крупной с крупной, мелкой с мелкой.

Разработана методика определения толщины надводной и подводной частей ягодного вороха в зависимости от количества ягод на 1 м<sup>2</sup> поверхности воды. Установлено, что толщина подводной части в 2,2...2,8 раза превышает толщину надводной, что увеличивает содержание в ворохе плавучих примесей и может являться фактором, влияющим на величину потерь ягод в процессе отделения длинных примесей с помощью гребневого конвейера.

**Ключевые слова:** клюква крупноплодная, теоретические исследования, аналитическая геометрия, техническое обеспечение, гидротранспорт, Mathcad.

Mechanized harvesting of large-fruited cranberries is carried out mainly using the wet method. For large-fruited cranberry plantations in the Republic of Belarus, a rational technical means for separating berries from shoots is a beater header, which ensures the separation of more than 80 % of the berries in one pass of the unit. The disadvantage of its work is the tearing off of some parts of the plants: leaves and stems of both the cranberry bush itself and weeds, as a result of which a floating heap of berries is formed at the surface of the flooded basin, consisting of berries and plant impurities with a length of 1...2 to 40...50 cm.

A promising type of technical means for collecting a heap of berries from the surface of a flooded basin is hydraulic transport installations. In order to adapt this technical means for working in conditions of high contamination of the berry heap, it is proposed to equip the installation with an active ridge conveyor, which ensures the mechanized separation of long impurities from the heap.

To substantiate the parameters of the ridge conveyor, the article provides an analytical description of the shape of the large-fruited cranberry and develops a method for determining the coordinates of the water surface relative to the geometric center of free-floating berries. The process of forming a heap of berries when free-floating berries are compacted by a pontoon is described and their quantity per 1 m<sup>2</sup> of water surface is determined for typical situations: contact of berries of the large fraction with berries of the small fraction, large with large, small with small.

A method has been developed for determining the thickness of the surface and underwater parts of a berry heap depending on the number of berries per 1 m<sup>2</sup> of water surface. It has been established that the thickness of the underwater part is 2.2...2.8 times greater than the thickness of the surface part, which increases the content of floating impurities in the heap and may be a factor influencing the amount of berry loss in the process of separating long impurities using a ridge conveyor.

**Key words:** large-fruited cranberry, theoretical research, analytical geometry, technical support, hydraulic transport, Mathcad.

## Введение

В плодах клюквы крупноплодной содержится богатый комплекс биологически активных соединений: органических кислот, полифенолов, витаминов, углеводов, пектиновых веществ, макро- и микроэлементов. Уникальный химический состав ягод обуславливает их высокую пищевую и лечебно-профилактическую ценность, а также делает их ценным сырьем для пищевой и фармацевтической промышленности [1].

Для выращивания клюквы в промышленных объемах используют культурный вид данного растения – Клюква крупноплодная (*Vaccinium macrocarpon*). Лидирующей страной по выращиванию данной культуры являются США, где клюкву выращивают на площади порядка 15800 га, собирая в год до 400 тыс. т ягод. Со значительным отставанием от США следует Канада, выращивая около 170 тыс. т в год на площади в 7500 га. Урожайность в этих двух странах достигает 24...29 т/га. Остальные страны значительно отстают. Третье место занимает Чили: урожайность – 7 т/га, площадь ягодников – 410 га [2].

На постсоветском пространстве наибольшие успехи в промышленном выращивании клюквы крупноплодной достигнуты в Республике Беларусь. Крупнейшим производителем этой культуры является ОАО «Полесские Журавины», основанное в 1985 году. Предприятие располагает 72 чеками совокупной площадью 66 га. Максимальная биологическая урожайность клюквы крупноплодной в агроклиматических условиях Беларуси составляет 12...15 т/га, средняя – 5...6 т/га [3, 4].

Механизированная уборка клюквы крупноплодной осуществляется преимущественно мокрым способом, заключающимся в выполнении следующих технологических операций: 1) заполнение чека водой; 2) механическое отделение ягод от побегов; 3) сбор и перемещение к зоне выгрузки плавающего у поверхности воды ягодного вороха с помощью понтона; 4) забор ягодного вороха с поверхности воды, отделение ягод от примесей с последующей погрузкой в транспортные средства; 5) выпуск воды из чека [5].

В сложившихся агротехнологических условиях на плантациях клюквы крупноплодной в Республике Беларусь наиболее рациональным типом технических средств для отделения ягод от побегов является передненавесной битерный хедер, рабочий орган которого представляет собой вращающийся прутковый или планчатый барабан. Битерный хедер за один проход отделяет более 80 % ягод, однако вместе с этим происходит отрыв листьев и отдельных стеблей как самого кустарничка клюквы, так и сорных растений, в результате чего на поверхности затопленного чека образуется плавающий ягодный ворох, представляющий собой смесь ягод с растительными примесями (листья, фрагменты стеблей и др.) длиной от 1...2 до 40...50 см.

Перспективным типом технических средств для забора ягодного вороха с поверхности затопленного чека являются гидротранспортные установки, состоящие из центробежного насоса с геликоидальным ротором и разделительного узла в виде наклонного решета для отделения ягод от воды и коротких примесей. Гидротранспортные установки обладают высокой производительностью при минимальном повреждении ягод, однако при высокой засоренности ягодного вороха длинными примесями, что характерно для агротехнологических условий на плантациях клюквы крупноплодной в Республике Беларусь, эффективность их работы снижается и существенно (на 10...12 чел.-ч/т ягод) увеличиваются затраты труда в связи с необходимостью вручную отделять длинные примеси от вороха. С целью устранения указанного недостатка предложена усовершенствованная конструктивно-технологическая схема гидротранспортной установки, оснащенная активным гребневым конвейером, обеспечивающим механизированное отделение длинных примесей от плавающего у поверхности затопленного чека ягодного вороха [6, 7].

## Основная часть

Для обоснования рациональных параметров гребневого конвейера необходимо получить математическую модель, описывающую поведение ягодного вороха в воде. В ходе анализа априорной информации установлено, что длина ягод клюквы крупноплодной варьируется в пределах 9...21 мм, ширина – 8...18 мм, масса – 0,57...1,60 г [8]. Основываясь на вышеприведенных данных, представим совокупность ягод клюквы в виде двух размерных фракций, равных друг другу по количеству входящих в них ягод: крупная (средняя длина ягод  $L_1 = 0,0175$  м, ширина  $D_1 = 0,015$  м, масса  $m_1 = 1,27 \cdot 10^{-3}$  кг) и мелкая ( $L_2 = 0,0125$  м,  $D_2 = 0,011$  м,  $m_2 = 0,74 \cdot 10^{-3}$  кг).

Рассмотрим поведение свободно плавающей в воде ягоды клюквы крупноплодной, которая не взаимодействует с другими ягодами. Допустим, что ягода представляет собой эллипсоид с большой осью  $L$  и малой –  $D$  с однородной (отсутствие флуктуаций плотности) внутренней структурой. В этом

случае устойчивое положение плавающей ягоды будет обеспечиваться при параллельности большой оси  $L$  плоскости зеркала воды.

Поместим в геометрический центр ягоды начало системы координат и направим ее ось  $OY$  параллельно большой оси ягоды  $L$ , а ось  $OZ$  – вертикально, т. е. перпендикулярно плоскости зеркала воды (рис. 1). Поверхность ягоды может быть описана каноническим уравнением эллипсоида [9]:

$$\frac{4x^2}{D^2} + \frac{4y^2}{L^2} + \frac{4z^2}{D^2} = 1. \quad (1)$$

Рассмотрим сечение ягоды плоскостью параллельной  $XOY$  и расположенной на расстоянии  $z \in \left[-\frac{D}{2}; \frac{D}{2}\right]$  от начала системы координат. Согласно свойствам эллипсоида форма его сечения указанной плоскостью представляет собой эллипс с полуосями  $a$  и  $b$ , длина которых зависит от координаты  $z$  [9].

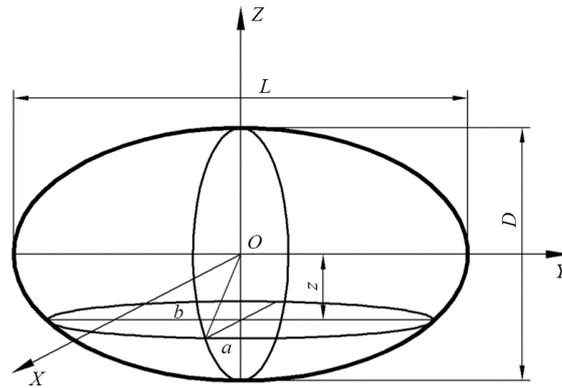


Рис. 1. Представление ягоды клюквы крупноплодной в виде эллипсоида

Рассмотрим сечение ягоды плоскостью  $XOZ$ . Согласно свойствам эллипсоида его сечение в данной плоскости является окружностью с радиусом  $\frac{D}{2}$ , а следовательно полуось  $a$  равна:

$$a(z) = \sqrt{\frac{D^2}{4} - z^2}. \quad (2)$$

Рассмотрим сечение ягоды плоскостью  $YOZ$ . Согласно свойствам эллипсоида форма его сечения в данной плоскости представляет собой эллипс, описываемый уравнением [9]:

$$\frac{4y^2}{L^2} + \frac{4z^2}{D^2} = 1. \quad (3)$$

Поскольку в рассматриваемом сечении справедливо равенство  $|y| = b(z)$ , то выражение (3) можно представить в виде:

$$\frac{4b(z)^2}{L^2} + \frac{4z^2}{D^2} = 1,$$

и выразить из него значение полуоси  $b$ :

$$b(z) = \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{4z^2}{D^2}}. \quad (4)$$

Площадь поперечного сечения ягоды клюквы в горизонтальной плоскости равна:

$$S(z) = \pi a(z)b(z) = \frac{\pi L}{2} \sqrt{\frac{4z^2}{D^2} - 2z^2 + \frac{D^2}{2}}, \quad z \in \left[-\frac{D}{2}; \frac{D}{2}\right]. \quad (5)$$

Глубина погружения ягоды клюквы в воду определяется из условия равновесия:

$$V_B(z_B)\rho = m, \quad (6)$$

где  $V_B(z_B)$  – объем воды, вытесняемый ягодой при погружении в воду до уровня, соответствующего координате  $z_B$ ,  $m^3$ ;  $\rho$  – плотность воды,  $kg/m^3$ ;  $m$  – масса ягоды,  $kg$ .

Объем вытесняемой воды  $V_B$  может быть получен интегрированием выражения (5):

$$V_B(z_B) = \int_{-\frac{D}{2}}^{z_B} S(z) dz, \quad z_B \in \left[-\frac{D}{2}; \frac{D}{2}\right]. \quad (7)$$

Для определения координаты поверхности воды  $z_B$  использовали функционал системы компьютерной алгебры Mathcad [10]. В результате решения уравнения (7) получили значения координат уровня воды для ягод крупной и мелкой фракций составили  $z_{B1} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  м и  $z_{B2} = 3,78 \cdot 10^{-3}$  м, соответственно.

Рассмотрим процесс формирования ягодного вороха у поверхности воды. Введем допущения: 1) ягоды крупной и мелкой фракции равномерно распределены по поверхности воды; 2) продольные оси ягод параллельны друг другу; 3) взаимодействие (контакт) ягод друг с другом осуществляется в плоскости  $XOZ$  (см. рис. 1). С учетом вышеприведенных допущений поперечное сечение ягодного вороха из свободно плавающих (не контактирующих друг с другом) ягод показано на рис. 2, а.

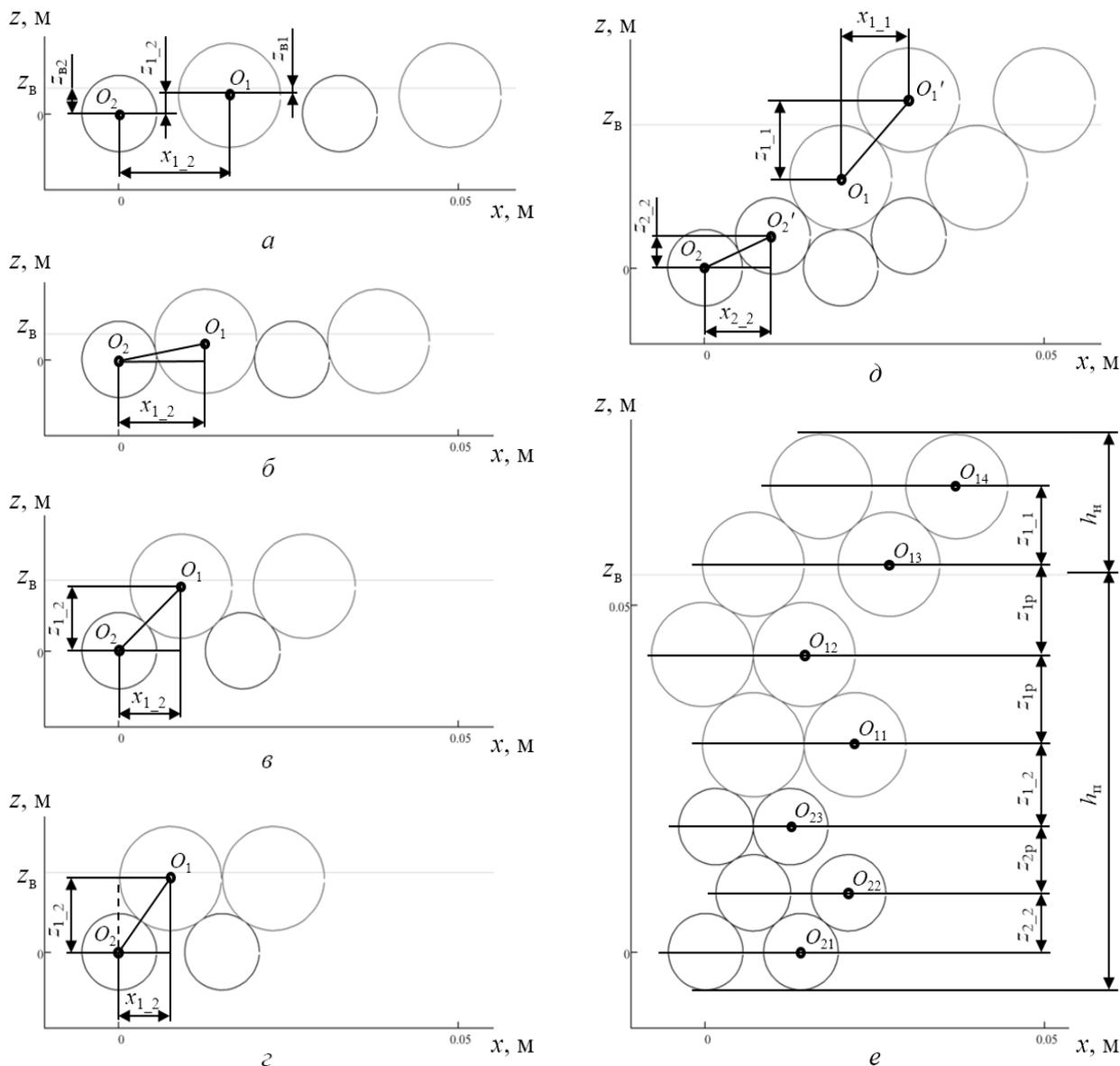


Рис. 2. Поперечные сечения ягодного вороха при различных значениях удельного количества ягод  $n$ :  
 $a - n < n_1$ ;  $б - n = n_1$ ;  $в - n_1 < n < n_2$ ;  $г - n = n_2$ ;  $д - n_2 < n < 2n_2$ ;  $е - n > 2n_2$

При размещении начала системы координат в центре ягоды мелкой фракции ( $x_2 = 0, z_2 = 0$ ) координаты центра крупной ягоды составят:

$$x_1(n) = x_2 + x_{1\_2}(n); \quad (8)$$

$$z_1(n) = z_2 + z_{1\_2}(n), \quad (9)$$

где:  $x_{1\_2}(n)$ ,  $z_{1\_2}(n)$  – разность абсцисс и ординат центров крупной  $O_1$  и мелкой  $O_2$  ягод в зависимости от удельного количества ягод на поверхности воды  $n$ , м.

В рамках принятых допущений, площадь поверхности воды, занимаемая парой ягод (крупная и мелкая), составит  $2x_{1\_2}L_1$ , а количество ягод на  $1 \text{ м}^2$  поверхности будет равно:  $n = \frac{2}{2x_{1\_2}L_1} = \frac{1}{x_{1\_2}L_1}$ .

Таким образом, зависимость разности абсцисс  $x_{1\_2}(n)$  можно представить в виде:

$$x_{1\_2}(n) = \frac{1}{nL_1}. \quad (10)$$

Смоделируем процесс уплотнения ягодного вороха понтоном. По мере уплотнения (увеличения удельного количества ягод на поверхности воды  $n$ ) расстояние  $x_{1\_2}$  между центрами  $O_1$  и  $O_2$  ягод будет сокращаться и при значении  $n = n_1$  большие и мелкие ягоды соприкоснутся (рис. 2, б). Удельное количество ягод  $n_1$  можно определить по формуле:

$$n_1 = \frac{1}{L_1(O_1O_2)_{x1}} = \frac{1}{L_1 \sqrt{\frac{(D_1 + D_2)^2}{4} - (z_{B1} - z_{B2})^2}}, \quad (11)$$

где  $(O_1O_2)_{x1}$  – проекция отрезка  $O_1O_2$  на ось абсцисс при  $n = n_1$ , м.

Дальнейшее уплотнение ягодного вороха понтоном ( $n > n_1$ ) приведет к накатыванию ягод крупной фракции на мелкие ягоды (см. рис. 2, в). При удельном количестве ягод на поверхности воды  $n = n_{21}$ , произойдет соприкосновение друг с другом ягод крупной фракции (см. рис. 2, г). Значение  $n_{21}$  может рассчитано по формуле:

$$n_{21} = \frac{1}{L_1(O_1O_2)_{x21}} = \frac{2}{L_1D_1}, \quad (12)$$

где  $(O_1O_2)_{x21}$  – проекция отрезка  $O_1O_2$  на ось абсцисс при  $n = n_{21}$ , м.

Дальнейшее увеличение количества ягод на  $1 \text{ м}^2$  поверхности воды приведет сначала к накатыванию друг на друга ягод крупной фракции (см. рис. 2, д), а потом к соприкосновению друг с другом ягод мелкой фракции, которое произойдет при значении  $n = n_{22}$ :

$$n_{22} = \frac{2}{L_1(O_2O_2')_{x22}} = \frac{2}{L_1D_2}, \quad (13)$$

где  $(O_2O_2')_{x22}$  – проекция отрезка  $O_2O_2'$  на ось абсцисс при  $n = n_{22}$ , м.

Для вышеприведенных параметров ягод клюквы крупноплодной расчетные значения  $n$  для характерных случаев составили:  $n_1 = 4,49 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ ,  $n_{21} = 7,62 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ ,  $n_{22} = 10,39 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ .

При удельном количестве ягод  $n > n_{21}$  формирование ягодного вороха происходит на двух уровнях (см. рис. 2, д, е). Нижний уровень образуется более плотными ягодами мелкой фракции, верхний – ягодами крупной фракции. Количество рядов ягод крупной  $i_{\max}$  и мелкой  $j_{\max}$  фракций равно увеличенному на 1 неполному частному отношений  $n / n_{21}$  и  $n / n_{22}$ , соответственно:

$$i_{\max} = 1 + n / n_{21}; \quad j_{\max} = 1 + n / n_{22}. \quad (14)$$

При совмещении начала системы координат с геометрическим центром ягоды в нижнем ряду вороха, ордината центров ягод мелкой фракции, расположенных в других рядах, составит:

$$z_{2_j}(n) = \begin{cases} 0, & j = 1; \\ z_{2\_2}(n) + z_{2p}(j - 2), & j \geq 2, \end{cases} \quad (15)$$

где  $j$  – порядковый номер ряда ягод мелкой фракции, отсчитываемый с нижнего ряда,  $j \in [1; j_{\max}]$ ;  $z_{2\_2}(n)$  – разность ординат 2-го и 1-го рядов ягод мелкой фракции при  $j_{\max} \geq 2$ , м;  $z_{2p}$  – разность ординат 3-го и 2-го рядов ягод мелкой фракции при  $j_{\max} \geq 3$ , м.

Ординаты центров ягод в рядах крупной фракции определим по формуле:

$$z_{1i}(n) = z_{2j_{\max}}(n) + z_{1-2}(n) + \begin{cases} 0, & i = 1; \\ z_{1p}(i-1), & 1 < i < i_{\max}; \\ z_{1p}(i-2) + z_{1-1}(n), & i = i_{\max}, i \neq 1, \end{cases} \quad (16)$$

где  $i$  – порядковый номер ряда ягод крупной фракции, отсчитываемый с нижнего ряда,  $i \in [1; i_{\max}]$ ;  $z_{2j_{\max}}(n)$  – значение  $z_{2j}(n)$  вычисленное для  $j = j_{\max}$  (ордината центров ягод верхнего ряда ягод мелкой фракции), м;  $z_{1-2}(n)$  – разность ординат нижнего ряда ягод крупной фракции и верхнего ряда ягод мелкой фракции, м;  $z_{1p}$  – разность ординат 2-го и 1-го рядов ягод крупной фракции при  $i_{\max} \geq 3$ , м;  $z_{1-1}(n)$  – разность ординат последнего ( $i = i_{\max}$ ) и предпоследнего ( $i = i_{\max} - 1$ ) рядов ягод крупной фракции при  $i_{\max} \geq 2$ , м.

Определим составляющие формул (15–16):

$$z_{1-2}(n) = \begin{cases} z_{в2} - z_{в1}, & n < n_1 \\ \sqrt{\frac{(D_1 + D_2)^2}{4} - x_{1-2}(n)^2}, & n_1 \leq n < n_{21} \\ \max \left[ \begin{array}{l} \left[ \frac{D_1 + D_2}{2} \sin \left[ \arccos \left( \frac{D_2}{D_1 + D_2} \right) - \arccos \left( \frac{x_{2-2}(n)}{D_2} \right) \right] \right] \\ \sqrt{\frac{(D_1 + D_2)^2}{4} - x_{2-2}(n)^2} \end{array} \right], & n_{21} \leq n < 2n_{22} \\ \frac{\sqrt{D_1(D_1 + 2D_2)}}{2}, & n \geq 2n_{22} \end{cases} \quad (17)$$

$$z_{1-1}(n) = \sqrt{D_1^2 - x_{1-1}(n)^2}; \quad (18)$$

$$z_{2-2}(n) = \sqrt{D_2^2 - x_{2-2}(n)^2}; \quad (19)$$

$$z_{1p} = D_1 \sin \left( \frac{\pi}{3} \right); \quad (20)$$

$$z_{2p} = D_2 \sin \left( \frac{\pi}{3} \right), \quad (21)$$

где  $x_{1-1}(n)$  – разность абсцисс последнего ( $i = i_{\max}$ ) и предпоследнего ( $i = i_{\max} - 1$ ) рядов ягод крупной фракции при  $i_{\max} \geq 2$ , м;  $x_{2-2}(n)$  – разность абсцисс 2-го и 1-го рядов ягод мелкой фракции при  $j_{\max} \geq 2$ , м.

Параметры  $x_{1-1}(n)$  и  $x_{2-2}(n)$  можно определить по формулам:

$$x_{1-1}(n) = \frac{2}{n_1(n)L_1}, \quad n \geq n_{21}; \quad (22)$$

$$x_{2-2}(n) = \frac{2}{n_2(n)L_1}, \quad n \geq n_{22}; \quad (23)$$

где  $n_1(n)$  – удельное количество ягод крупной фракции в двух верхних рядах ( $i = i_{\max} - 1, i = i_{\max}$ ), м<sup>-2</sup>;  $n_2(n)$  – удельное количество ягод мелкой фракции в 1-м и 2-м рядах ( $j = 1, j = 2$ ), м<sup>-2</sup>.

Значения  $n_1(n)$  и  $n_2(n)$  составят:

$$n_1(n) = n_{21} + n \bmod n_{21}; \quad (24)$$

$$n_2(n) = n_{22} + n \bmod n_{22}, \quad (25)$$

где  $n \bmod n_{21}$ ,  $n \bmod n_{22}$  – остаток от деления удельного количества ягод на поверхности воды  $n$  на характерные значения  $n_{21}$  и  $n_{22}$ , соответственно, м<sup>-2</sup>.

Посредством модификации формулы (5) получим зависимости для определения площади поперечного сечения ягод крупной и мелкой фракций в  $i$ -ом и  $j$ -ом рядах ягодного вороха, соответственно:

$$S_{1i}(n, z) = \frac{\pi L_1}{2} \sqrt{\frac{4(z - z_{1i}(n))^2}{D_1^2} - 2(z - z_{1i}(n))^2 + \frac{D_1^2}{2}}, \quad z \in \left[ -\frac{D_1}{2} + z_{1i}(n); \frac{D_1}{2} + z_{1i}(n) \right]; \quad (26)$$

$$S_{2j}(n, z) = \frac{\pi L_2}{2} \sqrt{\frac{4(z - z_{2j}(n))^2}{D_2^2} - 2(z - z_{2j}(n))^2 + \frac{D_2^2}{2}}, \quad z \in \left[ -\frac{D_2}{2} + z_{2j}(n); \frac{D_2}{2} + z_{2j}(n) \right]. \quad (27)$$

Объем ягод клюквы ниже горизонтальной (параллельной  $XOY$ ) плоскости, отстоящей на расстоянии  $z$  от начала системы координат  $XYZ$ , может быть определен по формуле (7) с учетом (26–27):

$$V_{1i}(n, z) = \begin{cases} 0, & z < -\frac{D_1}{2} + z_{1i}(n) \\ \int_{-\frac{D_1}{2} + z_{1i}(n)}^z S_{1i}(z) dz, & -\frac{D_1}{2} + z_{1i}(n) \leq z \leq \frac{D_1}{2} + z_{1i}(n) \\ \frac{\pi D_1^2 L_1}{8}, & z > \frac{D_1}{2} + z_{1i}(n) \end{cases} \quad (28)$$

$$V_{2j}(n, z) = \begin{cases} 0, & z < -\frac{D_2}{2} + z_{2j}(n) \\ \int_{-\frac{D_2}{2} + z_{2j}(n)}^z S_{2j}(z) dz, & -\frac{D_2}{2} + z_{2j}(n) \leq z \leq \frac{D_2}{2} + z_{2j}(n) \\ \frac{\pi D_2^2 L_2}{8}, & z > \frac{D_2}{2} + z_{2j}(n) \end{cases} \quad (29)$$

Объем 1 м<sup>2</sup> ягодного вороха (собственный объем ягод клюквы в ворохе) составит:

$$V_{\text{яв}}(n, z) = \frac{n}{2} \left[ \sum_{i=1}^{i_{\max}} \frac{V_{1i}(n, z)}{i_{\max}} + \sum_{j=1}^{j_{\max}} \frac{V_{2j}(n, z)}{j_{\max}} \right]. \quad (30)$$

Координата  $z_{\text{в}}$  может быть определена из условия равновесия ягодного вороха на поверхности воды:

$$V_{\text{яв}}(n, z_{\text{в}}) \rho = \frac{n}{2} (m_1 + m_2). \quad (31)$$

Для решения уравнения (31) относительно координаты  $z_{\text{в}}$  использовали функционал системы компьютерной алгебры Mathcad. Например, для удельного количества ягод  $n = 2,67 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$  (см. рис. 2, *e*), координата уровня воды  $z_{\text{в}} = 0,054 \text{ м}$ .

Толщину надводной  $h_{\text{н}}$  и подводной  $h_{\text{п}}$  частей ягодного вороха (см. рис. 2, *e*) можно рассчитать по формулам:

$$h_{\text{н}}(n) = z_{1i_{\max}}(n) + \frac{D_1}{2} - z_{\text{в}}(n); \quad (32)$$

$$h_{\text{п}}(n) = -\frac{D_2}{2} - z_{\text{в}}(n), \quad (33)$$

где  $z_{1i_{\max}}(n)$  – значение  $z_{1i}(n)$  вычисленное по формуле (14) для  $i = i_{\max}$  (ордината центров ягод верхнего ряда ягод крупной фракции), м.

Графическая зависимость толщины надводной  $h_{\text{н}}$  и подводной  $h_{\text{п}}$  частей ягодного вороха от удельного количества ягод  $n$  на поверхности воды показана на рис. 3.

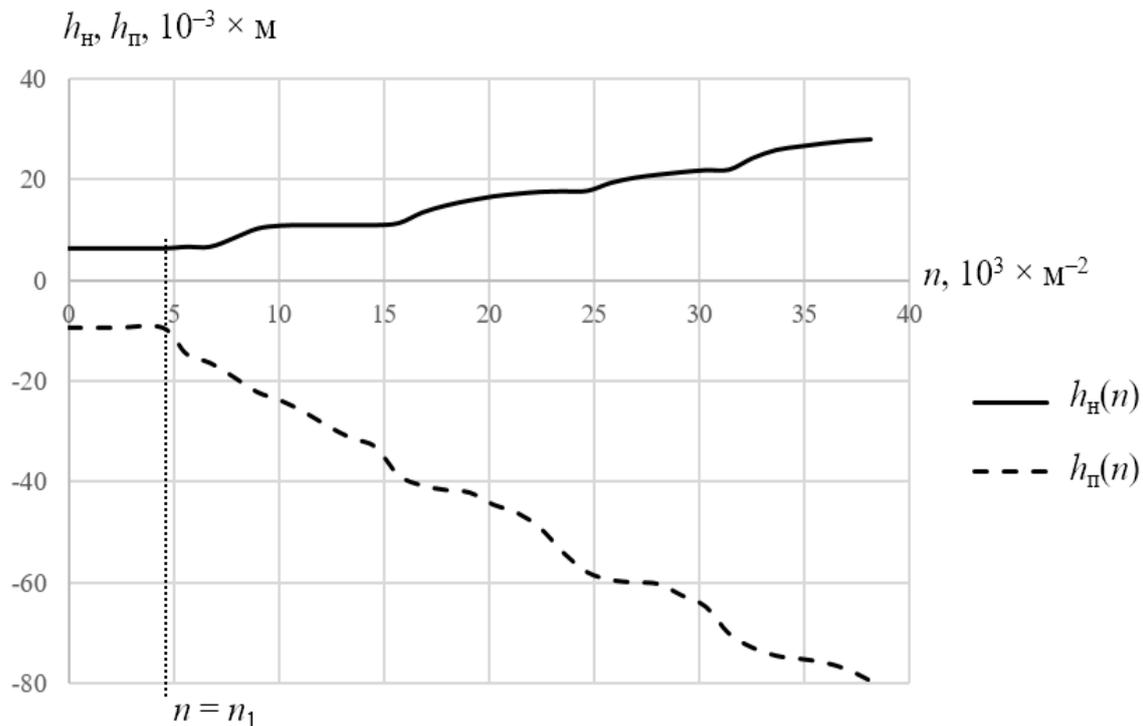


Рис. 3. Зависимость толщины  $h_n$  и  $h_p$  от удельного количества ягод  $n$

Из графика видно, что при удельном количестве ягод  $n < n_1$  толщина ягодного вороха неизменна, т. к. в указанном диапазоне значений  $n$  отсутствует взаимодействие (контакт) ягод друг с другом. При увеличении  $n > n_1$  происходит накатывание ягод друг на друга и толщина ягодного вороха увеличивается. Следует отметить, что толщина подводной части  $h_p$  ягодного вороха в 2,2...2,8 раза превышает толщину его надводной части  $h_n$ , что объясняется тем, что при формировании ягодного вороха мелкие, более плотные ягоды оказываются в его нижних слоях и создают меньшую, по сравнению с крупными ягодами, выталкивающую (Архимедову) силу.

Необходимо принимать во внимание, что существенное превышение толщины подводной части  $h_p$  ягодного вороха толщины его надводной части  $h_n$  увеличивает содержание в ворохе плавучих примесей, механизированное отделение которых может привести к выбрасыванию вместе с ними и некоторого количества ягод. В связи с этим, для снижения потерь продукции, при обосновании параметров гидротранспортной установки для забора ягод клюквы с поверхности воды необходимо учитывать особенности формирования ягодного вороха и предпринимать меры по снижению толщины его подводной части в момент прохождения через гребневой конвейер.

### Заключение

1. С использованием формул аналитической геометрии выполнено описание формы ягоды клюквы крупноплодной в виде эллипсоида с большой осью  $L$  и малой –  $D$ . Разработана методика определения координаты поверхности воды  $z_b$  относительно геометрического центра свободно плавающей ягоды клюквы. Установлено, что для ягод крупной (средняя длина ягод  $L_1 = 0,0175$  м, ширина  $D_1 = 0,015$  м, масса  $m_1 = 1,27 \cdot 10^{-3}$  кг) и мелкой ( $L_2 = 0,0125$  м,  $D_2 = 0,011$  м, масса  $m_2 = 0,74 \cdot 10^{-3}$  кг) фракций значения  $z_{b1} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  м и  $z_{b2} = 3,78 \cdot 10^{-3}$  м, соответственно.

2. Математически описан процесс формирования ягодного вороха при уплотнении понтоном свободно плавающих ягод клюквы крупноплодной. Определены значения количества ягод на  $1 \text{ м}^2$  поверхности воды для характерных ситуаций: контакт ягод крупной фракции с ягодами мелкой фракции  $n_1 = 4,49 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ , крупной с крупной  $n_{21} = 7,62 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ , мелкой с мелкой  $n_{22} = 10,39 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}$ .

3. Разработана методика определения толщины надводной  $h_n$  и подводной  $h_p$  частей ягодного вороха от удельного количества ягод  $n$  на поверхности воды. Толщина подводной части  $h_p$  ягодного вороха в 2,2...2,8 раза превышает толщину его надводной части  $h_n$ , что увеличивает содержание в ворохе плавучих примесей и может являться фактором, влияющим на величину потерь ягод в процессе отделения длинных примесей с помощью гребневого конвейера.

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Клюква крупноплодная в Белоруссии / АН БССР, Центр. ботан. сад. – Минск: Наука и техника, 1987. – 238 с.
2. Sandler, H. Cranberry production. A guide for Massachusetts-summary edition // H. Sandler, C. DeMoranville. – University of Massachusetts, 2008. – 198 p.
3. Характеристика сортов, включенных в Государственный реестр за период с 2005 года по 2007 год / ГУ «Гос. инспекция по испытанию и охране сортов растений». – Минск, 2007. – 439 с.
4. Ленковец, Т. И. Урожайность и масса плода сортов клюквы крупноплодной, интродуцированных в Беларуси // Плодоводство. – Т. 4. – 2022. – С. 134–139.
5. Крупенин П. Ю., Рендов А. К., Лягуский А. Г. Анализ способов уборки клюквы крупноплодной // Современные тенденции развития аграрной науки: сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф. (Брянск, 7–8 декабря 2023 г.) – Брянск: Брянский гос. аграрн. ун-т, 2023. – С. 231–237.
6. Крупенин П. Ю., Рендов А. К., Лягуский А. Г. Направление совершенствования технического обеспечения процесса уборки клюквы крупноплодной // Аграрная наука – сельскому хозяйству: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 9–10 февраля 2023 г.). – Т. 1. – Барнаул: Алтайский гос. аграрн. ун-т, 2023. – С. 131–132.
7. Крупенин П. Ю., Рендов А. К., Лягуский А. Г. Техническое обеспечение процесса уборки клюквы крупноплодной // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сб. науч. ст. 7-й междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 17 ноября 2023 г.). – Ч. 1. – Гомель: Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2023. – С. 207–212.
8. Мисун Л. В. Технологические процессы и средства механизации промышленного выращивания брусничных культур: монография. – Минск: БГАТУ, 2008. – 204 с.
9. Постников М. М. Аналитическая геометрия. – Москва: «Наука», 1973. – 751 с.
10. Новиковский Е. А. Работа в системе MathCAD: учебное пособие. – Барнаул: Типография АлтГУ, 2013. – 114 с.