МЕХАНІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 634.7:621.867.7

В. М. ГРИЩУК

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПЛОДОВО-ЯГОДНОГО СЫРЬЯ

Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию

(Поступила в редакцию 04.02.2011)

Гидромелиоративное преобразование болотных экосистем в течение длительного времени привело к уничтожению на заболоченных площадях естественных многовидовых биогеоценозов, понижению уровня грунтовых вод, сокращению площадей дикорастущих ягодников брусничных культур [1, 2], объемы заготовок которых в настоящее время не удовлетворяют растущую потребность в них населения, фармацевтической и пищевой промышленности [3].

В этой связи особый практический интерес приобретает введение в культуру на вышедших из промышленной эксплуатации торфяных месторождениях представителей семейства брусничных – клюквы крупноплодной и голубики высокорослой, что позволит использовать антропогенно преобразованные территории в агропромышленном производстве и получать ценную ягодную продукцию.

Накопленный опыт производства плодово-ягодной продукции плантационным способом показал, что существует необходимость совершенствования технологических процессов хранения и переработки полученного урожая [4, 5]. В технологии производства и переработки плодово-ягодного сырья важным элементом являются вопросы транспортирования как к месту временного хранения, так и к линиям по переработке. Изучение передового зарубежного опыта технического обеспечения процессов технологического транспортирования плодово-ягодного сырья указывает на перспективность разработки коммуникаций, функционирование которых основано на принципах гидротранспортирования [6].

Достоинства гидротранспорта: высокая производительность, возможность транспортирования на значительные расстояния при полной автоматизации процесса, отсутствие потерь перемещаемого материала, невысокие эксплуатационные расходы, возможность совмещения процесса транспортирования с другими технологическими процессами (например, мойка плодово-ягодного сырья), низкий уровень шума и возможность произвольной укладки трубопроводов.

Цель данной работы – разработка научно-технологических основ гидротранспортирования плодово-ягодного сырья, формирование методики математического обоснования параметров гидротранспортных устройств.

Гидравлические расчеты гидротранспорта предусматривают в общем случае определение удельных потерь напора на трение и местные сопротивления, критической скорости движения пульпы, диаметра пульпопровода, дальности транспортирования [6–9]. Энергетически наиболее выгоден гидротранспорт при рабочих скоростях $v_р$, равных или несколько больших критических скоростей $v_{кр}$ [10].

Существующие способы расчета гидротранспорта. В результате многочисленных исследований был предложен ряд формул для гидравлического расчета пульповодов [6]. Приведем те из них, которые получили распространение и признание в практике проектирования.

Способ Г. Н. Роера. Им предложена следующая формула для определения критической скорости:

$$\nu_{кр} = 8,72D^{0,473}\left[(\gamma_п - \gamma_0)w_{ср}\right]^{0,326}\frac{\gamma_т^{0,0814}}{\Delta^{0,17}}, \quad (1)$$

где D – диаметр трубопровода, м; $\gamma_п$ – плотность пульпы (рабочей смеси), т/м^3; γ_0 – плотность воды, т/м^3; $\gamma_т$ – плотность твердой фракции (грунта), т/м^3; $w_{ср}$ – средняя скорость всплытия (падения) твердой фракции в спокойной воде (средняя гидравлическая крупность), м/с; Δ – активная шероховатость у дна трубопровода, м ($\Delta = (d_{95}^{0,6} + 0,5)(\gamma_п / 1,075)^{5,88}$, где d_{95} – крупность частиц транспортируемого материала, соответствующая 95% на графике гранулометрического состава, мм).

По критической скорости и заданному диаметру трубопровода определяется расход пульпы:

$$Q_п = \frac{\pi D^2}{4}v_{кр}. \quad (2)$$

При транспортировании твердой фракции с высокой степенью неоднородности критическая скорость будет определяться следующим образом:

$$\nu'_{кр} = \nu_{кр}\left(\frac{d_{ср}}{d_{95}}\right)^{0,2} \quad (3)$$

($d_{ср}$ – средний диаметр транспортируемых частиц, мм).

Способ А. П. Юфина. Формула, предложенная им для определения критической скорости, имеет такой вид:

$$v_{кр} = 2d_{ср}^{0,65}e^{\alpha}\sqrt{\gamma_п}D^{0,54}, \quad (4)$$

где e – основание натурального логарифма; α – показатель степени ($\alpha = 2,86 / d_{ср}^{0,13}$).

При транспорте разнородных грунтов А. П. Юфин предлагает следующую формулу для определения критической скорости:

$$\nu'_{кр} = 9,8\sqrt[3]{D}\sqrt[4]{w_{ср}}\sqrt[8]{\Delta_0}(\gamma_п - 0,4), \quad (5)$$

где Δ_0 – коэффициент разнородности твердой фракции ($\Delta_0 = 3d_{10} / d_{90}$, где d_{10} и d_{90} – крупности частиц, размер которых соответствует 10 и 90% на графике гранулометрического состава, мм).

При этом он рекомендует в формуле (5) среднюю гидравлическую крупность заменять на приведенную гидравлическую крупность:

$$w_п = w_{ср}\sqrt[3]{\Delta_0}. \quad (6)$$

Способ А. Е. Иванова. В этом способе значение критической скорости определяется по формуле:

$$v_{кр} = 14,9\sqrt[3]{(\gamma_п - 1)Dw}. \quad (7)$$

Р. Р. Чугаев и *П. Г. Киселев* предлагают следующую зависимость для определения критической скорости [5, 10]:

$$v_{кр} = 8\sqrt[3]{D}\sqrt[6]{C_0\psi}\ , \tag{8}$$

где D – диаметр пульповода, м, который связан с $v_{кр}$ зависимостью

$$D = 2\sqrt{\frac{Q}{\pi v_{кр}}}\ . \tag{9}$$

Здесь Q – расход гидросмеси, м^3/с; C_0 – объемная консистенция гидросмеси (отношение объема твердой фазы к общему объему гидросмеси); ψ – коэффициент транспортабельности материала.

После сопоставления результатов расчетов по рассмотренным формулам можно сделать вывод, что зависимости, рекомендуемые Г. Н. Роером и выведенные при полном соблюдении размерностей, наиболее приемлемы для проведения расчетов, однако присутствующие сложные показатели степеней затрудняют ими.

Необходимо также учесть, что формулу (1) для определения $v_{кр}$ можно значительно упростить, заменив выражение $8{,}72D^{0{,}473}$ на $9\sqrt[3]{D}$, а множитель $\left[(\gamma_п - \gamma_0)w_{ср}\right]^{0{,}326}$ – на $\sqrt[3]{(\gamma_п - 1)w_{ср}}$. Таким образом, для однородного материала получаем следующую зависимость:

$$v_{кр} = 9\sqrt[3]{D}\sqrt[3]{(\gamma_п - 1)w_{ср}}\,\frac{\gamma_т^{0{,}0814}}{\Delta^{0{,}17}}\ . \tag{10}$$

Очевидно, что условия взвешивания и насыщения потока грунтом определяются не шероховатостью внутренней поверхности пульповодов, а наличием транспортируемых частиц, движущихся по низовой части периметра трубы, равной $0{,}9D$ [6].

Принципы проектирования гидротранспорта. В практике проектирования гидротранспорта для расчета критических скоростей и потерь напора применяются методики, дифференцированные в зависимости от вида транспортируемого материала. Рассмотрим основные их этапы.

Исходными данными являются: $Q_т$ – требуемая производительность гидротранспорта по твердому материалу, м^3/ч; d – крупность твердого материала, мм; $\rho_т$ – плотность материала (отношение плотной твердой основы скелета к объему этого скелета), т/м^3; $\rho_в$ – плотность воды, т/м^3; m – пористость твердого материала, определяемая по формуле $m = (\rho_т - \rho_е)/\rho_т$, где $\rho_е$ – плотность породы в естественном сложении (с порами).

Расход пульпы $Q_п$ определяем по формуле

$$Q_п = Q_т\,[(1 - m) + n] \tag{11}$$

(n – удельный расход воды на транспортирование 1 м^3 твердого материала в массиве, м^3/м^3, принимается по соответствующим нормам технологического проектирования).

Критическую скорость движения гидросмеси $v_{кр}$ вычислим следующим образом:

$$v_{кр} = 4{,}9S^{0{,}36}\left(\sqrt{gD}\,/\,\sqrt[4]{C_\varphi}\right), \tag{12}$$

где S – объемная концентрация гидросмеси (пульпы); g – ускорение свободного падения, м/с^2; D – диаметр трубопровода, м; C_φ – средний коэффициент лобового сопротивления (коэффициент сопротивления частиц при свободном падении в воде).

Объемную концентрацию пульпы – по такому выражению:

$$S = (\rho_п - \rho_в)/(\rho_т - \rho_в). \tag{13}$$

Плотность пульпы $\rho_п$ определим по формуле

$$\rho_п = [n\rho_в + \rho_т(1 - m)]/[n + (1 - m)]. \quad (14)$$

Удельные потери напора для пульпы $i_п$ определяются по формуле

$$i_п = i_в \left\{1 + 165S[v^2\sqrt{C_\varphi} / gD]^{-1,4}\right\}, \quad (15)$$

где $i_в$ – удельные потери напора для воды ($i_в = \lambda v^2/2gD$, где v – скорость движения воды, м/с); λ – коэффициент сопротивления трению ($\lambda = 1/(1{,}8lgRe - 1{,}52)^2$).

Гидравлические расчеты проводятся в следующем порядке.

1. По заданному гранулометрическому составу материала определяют значение коэффициента транспортабельности Ψ_i для каждой фракции.

2. Находят среднее значение коэффициента транспортабельности $\Psi_{ср}$ для материала в целом по формуле $\Psi_{ср} = (\Psi_1 x_1 + \Psi_2 x_2 + ... + \Psi_i x_i)/100$, где Ψ_1, Ψ_2, Ψ_i – коэффициенты транспортабельности отдельных фракций; x_1, x_2, x_i – содержание данной фракции, %.

3. По найденному значению $\Psi_{ср}$ определяют величину C_φ.

4. По заданному значению $Q_т$ определяют производительность по пульпе $Q_п$, объемную концентрацию S и плотность пульпы $\rho_п$.

5. Назначают диаметр пульпопровода D и определяют критическую скорость движения пульпы $v_{кр}$.

6. Расчетную скорость движения пульпы определяют по выражению

$$v_р = 4Q_п/(\pi D23600). \quad (16)$$

7. Находят отношение $v_р/v_{кр} = 1{,}1$. При значительных отклонениях полученной величины от 1,1 выбирают новый диаметр пульпопровода, и перечисленные выше параметры определяют заново.

Параметры насосов и мощности их приводов рассчитываются на основе суммарных потерь напора в системе гидротранспорта.

Технологические показатели транспортируемого сырья. Анализ существующих вариантов конструкторских решений закрытых гидротранспортных устройств и методов математического обоснования их конструктивно-технологических параметров позволили установить, что наиболее перспективным вариантом для гидротранспортирования плодово-ягодного сырья является использование эжектированного потока [11–14]. Это позволит обеспечить минимальную повреждаемость плодово-ягодного сырья вследствие отсутствия контакта с активными рабочими органами; для перемещения рабочей смеси в закрытых гидротранспортных устройствах стабильным потоком необходимо обеспечить скорость транспортирования ее выше критической; основными факторами, влияющими на критическую скорость транспортирования частиц, являются плотность рабочей смеси, флотационные свойства (гидравлическая крупность) компонентов и диаметр трубопроводов коммуникаций.

В теории гидромеханизации под флотационными свойствами понимают характер поведения физических тел в жидкости. Наиболее важными параметрами, влияющими на флотационность, являются их размеры, форма, плотность и специфика взаимодействия со средой. Известно, если жидкость находится в спокойном состоянии, то погруженные в нее тела могут тонуть, плавать на поверхности или плавать в погруженном состоянии.

В процессе гидротранспортирования плодово-ягодного сырья создается рабочая смесь, состоящая из воды, ягод и других включений. Очевидно, что флотационные свойства компонентов являются характеристикой расслоения рабочей смеси, влияющей на показатели технологического процесса. При этом скоростную характеристику расслоения рабочей смеси описывают гидравлической крупностью компонентов, т. е. скоростью падения (всплытия) последних в спокойной воде [6, 15]. Данный показатель определяли по отработанной методике [15] для трех размерных

групп (фракций) ягод (табл. 1). Статистическую обработку результатов производили по известной методике [16].

Таблица 1. **Параметры ягод исследуемых культур различных фракций**

Фракция	Длина ягоды, мм	Ширина ягоды, мм	Индекс формы	Средняя масса ягоды, г	Гидравлическая крупность, м/с
Клюква крупноплодная					
Крупные	16,0–21,0	12,0–18,0	1,23	1,60	0,2166
Средние	13,0–15,0	10,0–14,0	1,18	0,94	0,1934
Мелкие	9,0–12,5	8,0–12,0	1,17	0,57	0,1695
Голубика высокорослая					
Крупные	9,6–12,8	15,1–19,9	0,64	1,81	0,2014
Средние	9,0–10,9	13,0–15,0	0,71	1,23	0,1792
Мелкие	8,9–9,7	12,3–12,9	0,74	0,92	0,1597

Полученные значения гидравлической крупности будем использовать в расчетной методике в виде коэффициента гидравлической крупности (k_{v-n}) [17], т. е. отношения силы тяжести ягоды ($G_я$) к силе естественного выталкивания затопленной ягоды из воды (N). Для определения данного показателя были проведены экспериментальные и аналитические исследования, результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Показатели плодово-ягодного сырья для определения коэффициента гидравлической крупности (k_{v-n})**

Средний радиус ягоды ($R_я$), мм	Объем ягоды ($V_я$), м^3	Средняя площадь сечения ягоды ($S_я$), мм^2	Сила тяжести ягоды ($G_я$), Н	Сила выталкивания ягоды из воды (N), Н
Клюква крупноплодная				
6,69	$0{,}132\cdot10^{-5}$	149,3	0,01	0,013
Голубика высокорослая				
7,32	$0{,}163\cdot10^{-5}$	167,2	0,014	0,017

Математическая обработка данных табл. 2 позволила получить значения коэффициента гидравлической крупности (k_{v-n}), усредненное значение которого для клюквы крупноплодной составило 0,77, для голубики высокорослой – 0,84.

Практический смысл применения данного показателя транспортируемого материала заключается в том, что его отличие в большую или меньшую сторону от единицы прямо пропорционально влияет на увеличение или уменьшение критической скорости транспортирования, поэтому он должен вводиться в расчетные формулы для определения $v_{кр}$ в виде множителя.

Как показал проведенный анализ, наибольший интерес для определения критической скорости (м/с) передвижения ягод в трубопроводах представляет формула (10). Преобразуем ее введением рассмотренного выше показателя – коэффициента гидравлической крупности (k_{v-n}):

$$\nu_{кр} = 9\sqrt[3]{D}\sqrt[3]{(\gamma_п - 1)w_{ср}}\,\frac{\gamma_я^{0,0814}}{\Delta^{0,17}}k_{v-n}, \qquad (17)$$

($\gamma_я$ – плотность ягод, т/м^3).

Очевидно, что на критическую скорость транспортирования частиц большое влияние оказывает плотность рабочей смеси, гидравлическая крупность компонентов и диаметр трубопроводов коммуникаций.

Плотность рабочей смеси (т/м^3) конкретной группы сложности определим по общей формуле:

$$\gamma_{\text{р.с}} = (100 + P_{\text{к}}) / (100 + P_{\text{к}} / \gamma_{\text{к}}), \quad (18)$$

где $P_{\text{к}}$ – содержание компонентов в рабочей смеси, % от массы воды; $\gamma_{\text{к}}$ – плотность компонентов в плотной массе без пор, т/м^3.

Учитывая, что суммарное содержание в плотной массе листьев и стеблей не превышает 5–7% [18], данные компоненты при проведении расчетов учитывать не будем.

Теоретические исследования показывают, что плотность рабочей смеси зависит от степени насыщения ее частицами твердых компонентов, т.е. от массовой консистенции, активно влияющей на технико-экономические показатели процесса гидротранспортирования.

Таким образом, критическую скорость транспортирования рабочей смеси по трубопроводам целесообразно определять с учетом наибольшей крупности частиц твердых компонентов. Такими компонентами в рабочей смеси являются ягоды.

На основании данных о механических свойствах ягод можно получить приближенные формулы для расчета критической скорости транспортирования рабочей смеси для различных фракций ягод (на пример клюквы крупноплодной). Используя формулу (17), получаем зависимости, описывающие критические скорости транспортирования ягод клюквы крупноплодной ($\gamma_{\text{я}} \approx 0{,}2$–$0{,}5$ т/м^3). Очевидно, что с возрастанием плотности транспортируемого компонента возрастает критическая скорость транспортирования рабочей смеси, поэтому есть смысл определять критические скорости для различных фракций ягод при наибольшей плотности, т. е. при $\gamma_{\text{я}} = 0{,}5$ т/м^3. Плотность рабочей смеси в таком случае составит 0,74 т/м^3, с учетом чего: крупные – $v_{\text{кр}} = 3{,}531D^{0{,}473}$; средние – $v_{\text{ср}} = 3{,}403D^{0{,}473}$; мелкие – $v_{\text{кр}} = 3{,}26D^{0{,}473}$.

Следовательно, критическую скорость транспортирования рабочей смеси с компонентами различной линейной крупности необходимо выбирать по компоненту, имеющему наибольшую критическую скорость при наибольшей плотности рабочей смеси, поэтому за критическую скорость рабочей смеси принимаем критическую скорость крупной фракции ягод.

Учитывая все вышеизложенное, определяем диаметр трубопроводов уборочной машины:

$$\frac{4Q}{\pi D^2} \geq v_{\text{кр}}, \text{ т. е. } \frac{4Q}{\pi D^2} \geq 3{,}531D^{0{,}473}, \quad (19)$$

где Q – расход рабочей смеси, пропускаемой по трубопроводам, м^3/с.

После преобразований имеем следующее неравенство, характеризующее зависимость диаметра трубопровода (м) от расхода рабочей смеси:

$$D \leq (0{,}361Q)^{\frac{1}{2{,}473}}. \quad (20)$$

Подставив показатель Q (предварительно принимаем Q = 3 т/ч = $1{,}13 \cdot 10^{-3}$ м^3/с) в формулу (20), получаем $D \leq 43$ мм.

Методика расчета эжекторного гидротранспортного устройства. Анализ научных разработок в области гидротранспорта эжектированным потоком показал, что перспективным вариантом является использование для описанного выше процесса эжектора со струйным соплом, что позволяет упростить конструкцию устройства, а также обеспечит возможность разработать для его расчета методику, основанную на известных положениях.

Для расчета будем оперировать следующими исходными данными: плотность ягод, т/м^3; плотность водно-ягодной (рабочей) смеси, т/м^3; производительность устройства (требуемая), 3 т/ч; избыточное давление в потоке, Па; давление в рабочем потоке (исходя из минимальных требований к характеристикам насоса: напор, расход), Па.

Определяем оптимальное отношение сечений аппарата:

$$\left(\frac{f_3}{f_{р1}}\right)_{опт} = \varphi_1^2\varphi_2^2\frac{\Delta p_р}{\Delta p_с}, \tag{21}$$

где f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения, м^2; $f_{р1}$ – площадь выходного сечения рабочего сопла, м^2; φ_1 – коэффициент скорости сопла; φ_2 – коэффициент скорости камеры смешения; $\Delta p_р$ – перепад давлений рабочего потока (в сопле), Па; $\Delta p_с$ – перепад давлений, создаваемый струйным насосом, Па.

Рассчитываем отношение площади выходного сечения камеры смешения (f_3) к площади входного сечения камеры смешения ($f_{н2}$):

$$n = \frac{f_3}{f_{н2}} = \frac{f_3 / f_{р1}}{f_3 / f_{р1} - 1}. \tag{22}$$

Далее – отношение (α) коэффициентов подсоса (инжекции) по жидкости ($u_в$) и твердому телу ($u_т$):

$$\alpha = \frac{u_в}{u_т}. \tag{23}$$

Составляющие уравнения (23), в свою очередь, определяются следующим образом:

$$u_т = \frac{G_т}{G_р}; \tag{24}$$

$$u_в = \frac{G_{н.в}}{G_р}, \tag{25}$$

где $G_т$ – расход инжектируемого твердого тела, кг/с; $G_{н.в}$ – расход инжектируемой жидкости, кг/с; $G_р$ – расход рабочей жидкости через сопло, кг/с.

Рассчитываем коэффициенты, которые будут использованы для последующего определения параметров эжектора.

$$a = (1+\alpha)\left[(2-\varphi_3^2)\left(\frac{v_{с.в}}{v_р}\alpha + \frac{v_т}{v_р}\right) - \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2}\right)\left(\frac{v_{н.в}}{v_р}\alpha + \frac{v_т}{v_р}\right)n\right];$$

$$b = (2-\varphi_3^2)\left[\frac{v_{с.в}}{v_р}(1+2\alpha) + \frac{v_т}{v_р}\right]; \tag{26}$$

$$c = -\left[\frac{\Delta p_р}{\Delta p_с}\varphi_1^2\varphi_2^2(2-\varphi_2) - \left(2 - \varphi_3^2\frac{v_{с.в}}{v_р}\right)\right],$$

где $v_{с.в}$, $v_т$, $v_р$, $v_{н.\,в}$ – удельные объемы смешанной жидкости, инжектируемого твердого тела, рабочей жидкости, инжектируемой жидкости соответственно, м^3/кг; φ_3 – коэффициент скорости диффузора; φ_4 – коэффициент скорости входного участка камеры смешения.

Обычно в струйных аппаратах для гидротранспорта удельные объемы рабочей, инжектируемой и смешанной жидкостей одинаковы, поэтому для воды имеет смысл следующая запись: $v_{с.в.} = v_р = v_{н.в} = 0{,}001$ м^3/кг.

Коэффициент инжекции по твердому телу ($u_т$) с учетом известных коэффициентов будем определять по следующей зависимости:

$$u_т = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \tag{27}$$

При необходимости построения характеристики $\Delta p_с / \Delta p_р = f(u_т)$ эжектора для гидротранспортирования ягод клюквы крупноплодной могут использоваться зависимости:

$$\frac{\Delta p_с}{\Delta p_р} = \varphi_1^2 \frac{f_{р1}}{f_3}\{2\varphi_2\left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2}\right)\frac{f_{р1}}{f_3} n u_т (1+\alpha)\left(\frac{v_{н.в}}{v_р}\alpha + \frac{v_т}{v_р}\right) -$$
$$-(2-\varphi_3^2)\frac{f_{р1}}{f_3}\left[1 + u_т(1+\alpha)\right]\left[\frac{v_{с.в}}{v_р}(1+\alpha\, u_т) + \frac{v_т}{v_р}u_т\right]\}. \tag{28}$$

Зависимость (28) для рассматриваемых технологических условий после подстановки значений показателей имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta p_с}{\Delta p_р} = 0,2746 + 0,3455 u_т - 0,0045 u_т^2. \tag{29}$$

Далее производится расчет основных сечений аппарата.

Выходное сечение рабочего сопла определяется по следующей формуле:

$$f_{р1} = \frac{G_р}{\varphi_1}\sqrt{\frac{v_р}{2\Delta p_р}}. \tag{30}$$

Исходя из этого определяются диаметр выходного сечения рабочего сопла, диаметр камеры смешения.

Для подбора правильного положения рабочего сопла необходимо рассчитать длину рабочей струи ($l_{с1}$) и диаметр свободной струи (d_4) на расстоянии $l_{с1}$ от выходного сечения сопла. Так как $u \geq 0,5$ ($u = u_т + u_в$), т.е. свободная струя включает не только начальный, но и основной участок, длину рабочей струи будем рассчитывать по такой зависимости:

$$l_{с1} = \frac{0,37 + u}{4,4a} d_1 \tag{31}$$

(a – опытная константа, находящаяся для упругих сред в диапазоне 0,07–0,09).

Диаметр свободной струи:

$$d_4 = 1,55 d_1 (1+u). \tag{32}$$

Длина цилиндрической камеры смешения струйных аппаратов выбирается в пределах 6–10 ее диаметров:

$$l_к = (6-10) d_3. \tag{33}$$

Длина диффузора определяется графически исходя из угла раствора 8–10° с таким расчетом, чтобы в самой широкой части раструба получить диаметр, соответствующий диаметру присоединяемого полимерного транспортного трубопровода.

Расчет конструктивно-технологических параметров эжекторного гидротранспортного устройства. Исходные данные: плотность ягод – 0,5 т/м^3; плотность рабочей смеси – 0,74 т/м^3; производительность устройства (требуемая) – 3 т/ч; избыточное давление в потоке (планируемая высота поднятия рабочей смеси в процессе работы устройства составляет 5 м) – $0{,}05\cdot10^6$ Па; давление в рабочем потоке (исходя из минимальных требований к характеристикам насоса: напор – 40 м, расход – 6 м^3/ч) – $0{,}4\cdot10^6$ Па.

Определим оптимальное отношение сечений аппарата по формуле (21):

$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_{опт} = 0{,}95^2 \cdot 0{,}875^2 \frac{0{,}35\cdot10^6}{0{,}05\cdot10^6} = 4{,}84 \ .$$

Отношение площади выходного сечения камеры смешения (f_3) к площади входного сечения камеры смешения ($f_{н2}$) вычислим по выражению (22):

$$n = \frac{(4{,}84)}{(4{,}84-1)} = 1{,}26$$

Отношение (α) коэффициентов подсоса (инжекции) по жидкости ($u_в$) и твердому телу ($u_т$) найдем по выражениям (23)–(25):

$$u_т = \frac{0{,}833}{1{,}667} = 0{,}5;$$

$$u_в = \frac{0{,}2}{0{,}667} = 0{,}04;$$

$$\alpha = \frac{0{,}04}{0{,}5} = 0{,}08\cdot$$

$G_т$ = 0,833 кг/с; $G_{н.в}$ = 0,2 кг/с; $G_р$ = 1,667 кг/с. Удельный объем инжектируемого твердого тела $v_т$ = 0,002 м^3/кг.

По выражениям (26) рассчитаем коэффициенты, которые будут использованы для последующего определения параметров эжектора:

$$a = (1+0{,}08)\left[(2-0{,}81^2)\left(1\cdot0{,}08+\frac{0{,}002}{0{,}001}\right)-\left(2\cdot0{,}875-\frac{1}{0{,}83^2}\right)\left(1\cdot0{,}08+\frac{0{,}002}{0{,}001}\right)1{,}26\right] = 2{,}174297;$$

$$b = (2-0{,}81^2)\left[\frac{0{,}001}{0{,}001}(1+2\cdot0{,}08)+\frac{0{,}002}{0{,}001}\right] = 4{,}246724;$$

$$c = -\left[\frac{0{,}35\cdot10^6}{0{,}05\cdot10^6}0{,}95^2\cdot0{,}875^2(2-0{,}875)-\left(2-0{,}81^2\frac{0{,}001}{0{,}001}\right)\right] = -4{,}097540.$$

Коэффициент инжекции по твердому телу ($u_т$) с учетом известных коэффициентов будем определять по зависимости (27):

$$u_т = \frac{-4{,}246724+\sqrt{4{,}246724^2-4\cdot2{,}174297\cdot(-4{,}097540)}}{2\cdot2{,}174297} = 0{,}708.$$

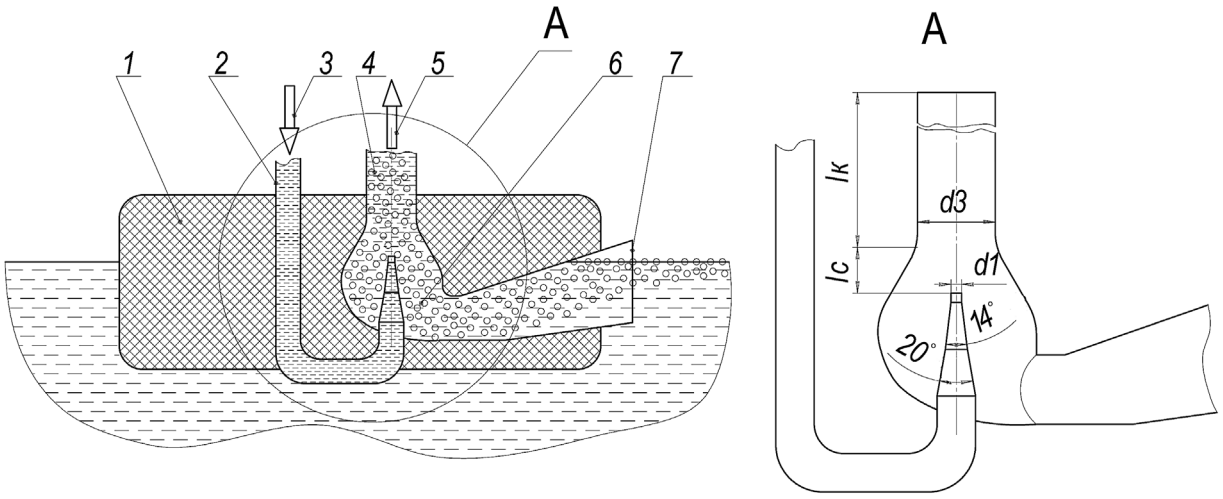

Рис. 1. Устройство для гидротранспортирования: *1* – понтон; *2* – трубопровод высокого давления; *3* – вода от насоса; *4* – камера смешения; *5* – рабочая смесь; *6* – приемная камера; *7* – подборщик

Основные сечения аппарата рассчитаем следующим образом..

Выходное сечение рабочего сопла определим по выражению (30):

$$f_{p1} = \frac{1,667}{0,95}\sqrt{\frac{0,001}{2 \cdot 0,35 \cdot 10^6}} = 6,63 \cdot 10 - 5 \text{ м}^2 = 66,3 \text{ мм}^2.$$

Следовательно, диаметр выходного сечения рабочего сопла d_1 = 9,2 мм; диаметр камеры смешения d_3 = 44,5 мм.

Далее рассчитываем длину рабочей струи (l_{c1}) и диаметр свободной струи (d_4) на расстоянии l_{c1} от выходного сечения сопла по формулам (31), (32):

$$l_{c1} = \frac{0,37 + 0,62}{4,4 \cdot 0,07} \cdot 9,2 = 29,6 \text{ мм};$$

$$d_4 = 1,5 \cdot 9,2 \cdot (1 + 0,62) = 23,1 \text{ мм}.$$

Длину цилиндрической камеры смешения, в соответствии с формулой (33), выбираем в пределах 6…10 ее диаметров:

$$l_к = (6...10) \cdot 44,5 = 267 ... 445 \text{ мм}.$$

Результаты проведенных исследований позволили предложить вариант конструкции устройства для гидротранспортирования (рис. 1).

Один из вариантов предполагаемой технологической схемы реализации опытного образца оборудования для гидротранспортирования приведен на рис. 2.

Предложенная схема реализации оборудования для гидротранспортирования плодово-ягодного сырья позволит обеспечить высокую производительность и минимальную повреждаемость транспортируемого материала вследствие отсутствия движущихся механических частей в основном элементе системы – эжекторном устройстве.

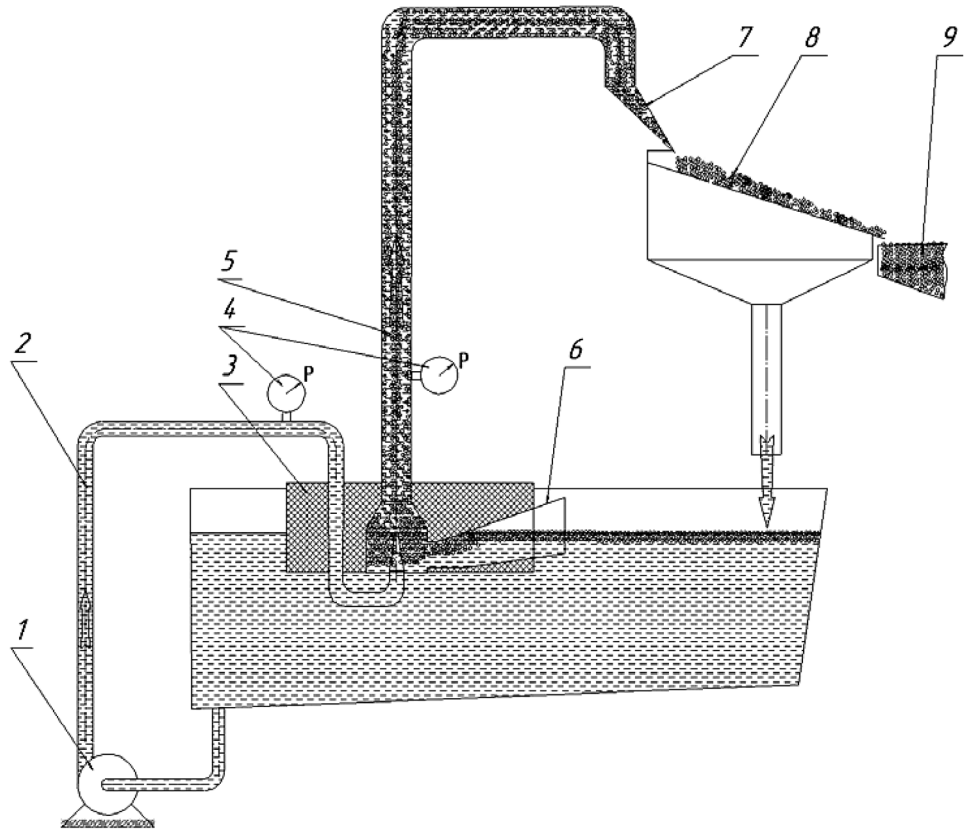

Рис. 2. Опытный образец оборудования для гидротранспортирования: *1* – насос; *2* – трубопровод высокого давления; *3* – понтон; *4* – манометры; *5* – трубопровод подачи рабочей смеси; *6* – подборщик; *7* – распределитель потока; *8* – разделительное устройство; *9* – емкость накопительная

Разработанная методика математического обоснования конструктивных параметров гидротранспортных устройств может быть использована с учетом показателя флотационных свойств для любого вида плодово-ягодного сырья.

Литература

1. Сохранение и повышение продуктивности мелиорируемых земель Центра Нечерноземной зоны России и Беларуси / под общ. ред. Ю. А. Можайского, А. П. Лихацевича. – Рязань: Рязанская гос. с.-х. акад. им. П. А. Костычева, 2005. – 582 с.

2. Л и х а ц е в и ч, А. П. Мелиорация земель в Беларуси / А. П. Лихацевич, А. С. Мееровский, Н. К. Вахонин. – Минск, 2001. – 308 с.

3. Г е д ы х, В. Б. Дикорастущие брусничные в условиях Беларуси / В. Б. Гедых. – Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2002. – 412 с.

4. М и с у н, Л. В. Научные и технологические основы производства крупноплодной клюквы / Л. В. Мисун. – Минск, 1995. – 135 с.

5. Ч у г а е в, Р. Р. Гидравлика: учебник для вузов / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергия, 1975. – 600 с.

6. Ц а р е в с к и й, А. М. Гидромеханизация мелиоративных работ / А. М. Царевский. – Л.: Машиностроение, 1963. – 400 с.

7. Ш к у н д и н, Б. М. Землесосные снаряды: учеб. пособие для вузов / Б. М. Шкундин. – М.: Энергия, 1968. – 376 с.

8. Р о щ у п к и н, Д. В. Разработка грунтов землесосными снарядами / Д. В. Рощупкин. – М.: Транспорт, 1969. – 136 с.

9. У п о р о в, Н. Г. Землесосные снаряды и перекачивающие установки: учебник / Н. Г. Упоров. – М.: Высш. школа, 1970. – 336 с.

10. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – Изд. 4-е переработ. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

11. Л я м а е в, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, ЛО, 1988. – 256 с.

12. С о к о л о в, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

13. М а т в е е н к о, П. С. Струйные аппараты в пищевой промышленности / П. С. Матвеенко, В. Н. Стабников. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 224 с.

14. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников [и др.] – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 664 с.

15. К о н д р а т ь е в, В. Н. Разработка технологий и средств механизации для биологических закреплений откосов: дис. … д-ра техн. наук / В. Н. Кондратьев. – Минск, 1994. – 651 л.

16. В е н т ц е л ь, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

17. Г р и щ у к, В. М. Повышение эффективности уборки клюквы крупноплодной на воде обоснованием рациональных параметров машины: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.20.01. / В. М. Грущук. – Минск, 2006. – 18 с.

18. Технология промышленного выращивания клюквы крупноплодной на получение ягодной продукции / Е. А. Сидорович [и др.]. – Минск: БелНИИТИ, 1992. – 120 с.

GRISHCHOUK, V. M.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE EQUIPMENT FOR HYDROTRANSPORTATION OF FRUIT BERRY RAW MATERIALS

Summary

On the basis of the conducted analysis the methodology of mathematical substantiation of the parameters of the equipment for hydrotransportation of fruit-berry raw materials in closed pipelines is developed, calculation for the device to carry out this process is made, and a design scheme is proposed.