

## Влияние сепарационного эффекта на фракционность и повышение однородности конечного продукта

**В.В. Новиков**, к.т.н., профессор, **О.А. Камышева**, инженер, **И.В. Успенская**, к.с.-х.н., ФГБОУ ВО Самарская ГСХА

В процессе измельчения корнеклубнеплодов на разработанном и предложенном ранее измельчителе возникает сепарация различных по размерам частиц материала: мелкие частицы оседают на вал шнека, а более крупные отбрасываются к периферии цилиндра, и вся масса выходит наружу через выходное отверстие деки, при этом она не в достаточной степени соответствует зоотехническим требованиям по однородности материала (рис. 1) [1–3].

В связи с этим были проведены аналитические исследования технологического процесса измельчителя.

Зная определённую закономерность наличия крупных частиц в зависимости от удалённости от вала, можно обосновать адекватную форму режущего органа, позволяющую максимальный выход крупных фрагментов в зону резания и максимальную работу разрушения. Тогда форма ножа должна быть адекватно выявленной закономерностью, т.е. рабочее пространство ножа должно также увеличиваться по экспоненциальному закону. Согласно поставленной задаче было представлено аналитическое выражение для построения линии передней кромки ножа с требуемой точностью.

**Цель работы** – аналитическое исследование процесса резания корнеклубнеплодов, определение параметров устройства.

### Задачи исследования:

– исследовать процессы резания, распределения частиц по размерам в рабочем пространстве измельчителя;

– получить аналитическое выражение кривой, образующей режущую кромку ножа.

Для завершения измельчающего процесса корнеплодов крайне важно получить однородную степень измельчающего продукта, измеряемого коэффициентом однородности, который характеризует качество измельчения [4, 5]. Поэтому крайне желательно максимально уменьшить выход фрагментов крупной фракции.

Получение искомого результата, т.е. однородной степени измельчения, требует дополнительного рабочего органа в виде режущего инструмента рациональной формы, позволяющего доизмельчать крупную фракцию материала по периферии цилиндра. При этом для повышения эффективности резания (работы разрушения) крупных фрагментов необходимо учитывать относительное содержание частиц крупной фракции в пространстве шнека, особенно в его выходной части. Зная определённую закономерность наличия крупных частиц в зависимости от удалённости от вала, можно обосновать

адекватную форму режущего органа, позволяющую максимальный выход крупных фрагментов в зону резания и максимальную работу разрушения.

С точки зрения физической задачи необходимо найти модель распределения массы материала по радиусу шнека.

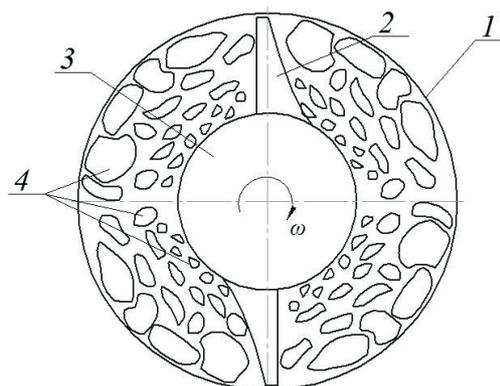


Рис. 1 – Распределение материала перед контактом с ножами:

1 – цилиндр; 2 – ножи; 3 – вал шнека; 4 – частицы разной степени измельчения

**Результаты исследования.** С математической точки зрения следует найти функцию распределения  $m = f(r)$ . Заметим, что в связи со сложностью задачи физическая модель будет достаточно условной и будет указывать только на характер процесса (его качественную сторону). В математической модели расхождение с реальным процессом может быть учтено поправочными эмпирическими коэффициентами.

Из законов физики следует, что в стационарном режиме импульс замкнутой системы есть величина постоянная [6]:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{L}$  – суммарный импульс системы, кг·м·с<sup>-1</sup>;  
 $t$  – время, с.

В развёрнутом виде применительно к шнеку, заполненному материалом, закон сохранения импульса выглядит следующим образом:

$$\frac{d(m\bar{v} + M\bar{v}_{\text{МН}})}{dt} = 0, \quad (2)$$

где  $m$  – масса элементарного поперечного материала, кг ( $b = \sum_{i=1}^n m_i$ );

$\bar{v}$  – абсолютная скорость произвольного фрагмента материала, м/с;

$M$  – масса шнека, кг;

$\bar{v}_{\text{МН}}$  – абсолютная скорость центра массы шнека, м/с.

Так как центр массы шнека неподвижен, т.е.  $\bar{v} = 0$ , то закон сохранения импульса для данного случая приобретает следующий вид:

$$\frac{dm}{dt} \bar{v} + m \frac{d\bar{v}}{dt} = 0, \quad (3)$$

где  $\frac{dm}{dt}$  – расход материала, кг/с;

$\frac{d\bar{v}}{dt}$  – ускорение фрагмента материала под действием гребня витка шнека, м/с<sup>2</sup>.

Абсолютная скорость фрагмента материала  $\bar{v} = \bar{v}_{oc} + \bar{v}_{rad} + \bar{v}_{окр}$  (рис. 2) принимается с учётом «проскальзывания» его по контактной поверхности гребня шнека [7, 8].

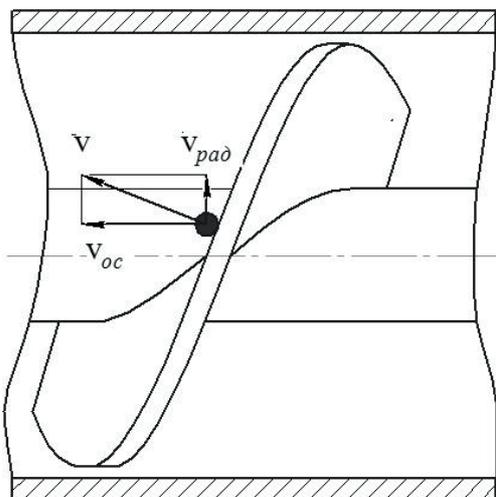


Рис. 2 – Движение фрагмента массы под давлением гребня шнека:

$\bar{v}$  – абсолютная скорость, м/с;  $\bar{v}_{oc}$  – осевая скорость, м/с;  $\bar{v}_{rad}$  – радиальная скорость, м/с;  $\omega$  – частота вращения шнека

При ортогональном разложении вектора абсолютной скорости вектор окружной скорости проецируется в точку и на рисунке не показан.

Второй член уравнения (2), (3) содержит производную по времени вектора абсолютной скорости, которая представляет собой выражение:

$$\frac{d\bar{v}_{oc}}{dt} + \left( \frac{d\bar{v}_{rad}}{dt} \frac{\bar{v}_{rad}}{v_{rad}} + v_{rad} \frac{d}{dt} \frac{\bar{v}_{rad}}{v_{rad}} \right) + \left( \frac{d\bar{v}_{окр}}{dt} \frac{\bar{v}_{окр}}{v_{окр}} + v_{окр} \frac{d}{dt} \frac{\bar{v}_{окр}}{v_{окр}} \right). \quad (4)$$

При анализе выражения (4) существенно следующее обстоятельство:

$$\frac{d\bar{v}_{oc}}{dt} = 0. \quad (5)$$

Вектор  $v_{rad} \frac{d}{dt} \frac{\bar{v}_{rad}}{v_{rad}}$  перпендикулярен вектору  $\bar{v}_{rad}$ ; вектор  $\frac{d\bar{v}_{окр}}{dt} \frac{\bar{v}_{окр}}{v_{окр}}$  (тангенциальное уско-

рение) также перпендикулярен вектору  $\bar{v}_{rad}$ ; вектор  $v_{окр} \frac{d}{dt} \frac{\bar{v}_{окр}}{v_{окр}}$  параллелен вектору  $\bar{v}_{rad}$ , но противоположен по направлению.

При проецировании на направление вектора радиальной скорости все векторы (кроме трёх) обращаются в точки и выражение (3) приобретает следующий вид:

$$\frac{dm}{dt} \bar{v}_{rad} + \left( \frac{d\bar{v}_{rad}}{dt} \frac{\bar{v}_{rad}}{v_{rad}} - v_{окр} \frac{d}{dt} \frac{\bar{v}_{окр}}{v_{окр}} \right) = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение не противоречит исходному, так как отражает частную сторону общего процесса: устанавливает связь массы с её удалённостью от оси вращения.

Так как в уравнении (6) все векторы коллинеарны, то можно перейти к скалярной форме записи и преобразовать это уравнение в следующее [9]:

$$\frac{dm}{dr} \frac{dr}{dt} v_{rad} + m \left( \frac{dv_{rad}}{dt} \frac{dr}{dt} - \frac{d}{dr} v_{окр} \frac{dr}{dt} \right) \Rightarrow \Rightarrow \frac{dm}{dr} v_{rad} + m \left( \frac{dv_{rad}}{dt} - \frac{dv_{окр}}{dr} \right) = 0. \quad (7)$$

После преобразований данное уравнение приобретает вид дифференциального уравнения с разделяющимися переменными [9]:

$$\frac{dm}{dr} v_{rad} + m \left( \frac{dv_{окр}}{dt} - \frac{dv_{rad}}{dr} \right) \Rightarrow \Rightarrow \frac{dm}{m} = \frac{dv_{окр} - dv_{rad}}{v_{rad}}. \quad (8)$$

Интегрирование приводит уравнение к следующему результату [9]:

$$\ln m \Big|_{m_0}^m = \int_{r_0}^r \frac{dv_{окр}}{v_{rad}} - \ln v_{rad} \Big|_{v_0}^v, \quad (9)$$

или

$$\ln \frac{mv}{m_0 v_0} = \int_{r_0}^r \frac{\omega dr}{v_{rad}}, \quad (10)$$

где  $m_0$  – масса фрагмента в области вала (в начале движения), кг;

$r_0$  – радиус вала, м;

$r$  – максимальный радиус шнека, м;

$v_0$  – скорость материала в области вала, м/с;

$v$  – периферийная скорость материала, м/с.

Эквивалентное выражение уравнения (10) имеет вид:

$$\frac{mv}{m_0 v_0} = e^{\int_{r_0}^r \frac{\omega dr}{v_{rad}}} \Rightarrow m = m_0 \frac{v}{v_0} e^{\omega \int_{r_0}^r \frac{dr}{v_{rad}}}. \quad (11)$$

Данная формула указывает на явный экспоненциальный характер нарастания массы к периферии, что подтверждает необходимость выбора адекватной формы режущей кромки выходного ножа [10].

Интеграл в правой части уравнения (10) требует дальнейшего исследования. Вопрос о том, что достаточно адекватный закон распределения массы по модулю радиуса, особенно в связи флуктуационностью в зоне резания, не известен. Функция  $m=f(r)$  может приобретать различные зависимости.

Пусть  $v_{pad} = \delta \cdot r$ , где  $\delta$  – поправочно-переводной коэффициент,  $c^{-1}$ .

В этом случае экспонента будет иметь следующий вид:

$$e^{\int_{r_0}^r \frac{dr}{v_{pad}}} = e^{\frac{\omega}{\delta} \ln \frac{r}{r_0}} = \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{\omega}{\delta}}. \quad (12)$$

А формула (11) приобретает следующий вид:

$$m = m_0 \frac{r_0}{r} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{\omega}{\delta}} = m_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{1-\frac{\omega}{\delta}}. \quad (13)$$

В случае квадратичной зависимости  $v_{pad} = \delta \cdot r^2$ , будет получено выражение:

$$m = m_0 \frac{r_0^2 e^{\frac{\omega}{\delta r_0}}}{r^2 e^{\frac{\omega}{\delta r}}}. \quad (14)$$

Так как нарастание массы от вала к стенке цилиндра происходит квазиэкспоненциально, форма ножа должна быть адекватна выявленной закономерности, т.е. рабочее пространство ножа должно также увеличиваться по экспоненциальному закону.

Таким образом, техническое решение сводится к поиску линии режущей кромки, одновременно удовлетворяющее и физическим, и технологическим, и конструктивным условиям [10].

Пусть ось  $Og$  проходит через ось шнека и совпадает с линией отвеса, ось  $Ol$  также проходит через ось шнека и совпадает с линией горизонта (рис. 3). В данной системе координат  $lOg$  уравнение искомой кривой будет иметь следующий вид:

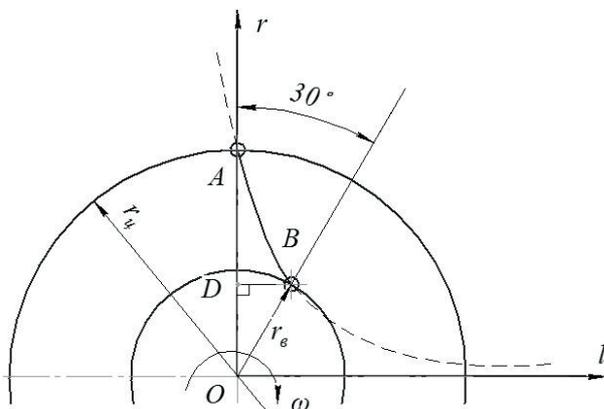


Рис. 3 – Форма режущей кромки ножа:  
 $r_g$  – радиус вала, м;  $r_u$  – радиус цилиндра, м;  
 $AB$  – режущая кромка ножа

$$r = C_1 e^{-C_2 l}, \quad (15)$$

где  $r$  – текущий радиус кривой, м;

$l$  – удалённость произвольной точки от оси  $Og$ , м;

$C_1$  – переводной коэффициент, м;

$C_2$  – переводной коэффициент,  $m^{-1}$ .

Режущей кромке ножа соответствует участок кривой между точками  $A$  и  $B$ . Точка  $A$  является точкой пересечения оси  $Og$  с цилиндром; точка  $B$  будет точкой сопряжения кривой с валом. Для построения конкретной кривой  $AB$  необходимо знать положение точки  $B$ .

Пусть угол сектора между отрезками  $OA$  и  $OB$  будет равен  $3^\circ$  (при угле меньше  $3^\circ$  уменьшается длина режущей кромки, а при большем угле – уменьшается экспоненциальная зависимость). Этот выбор сделан на том основании, что он обеспечивает достаточную вогнутость режущей кромки и в то же время удобен для расчёта [10].

Таким образом, зная положение точек  $A$  и  $B$ , можно определить коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ :

$$r_u = C_1 e^{-C_2 \cdot 0} = C_1 \Rightarrow r = r_u e^{-C_2 l}. \quad (16)$$

Коэффициент определяется положением точки  $B$ :

$$r_g \cos 30 = C_1 r_u e^{-C_2 r_g \sin 30} \Rightarrow \Rightarrow r_g \frac{\sqrt{3}}{2} = r_u e^{-C_2 \frac{r_g}{2}} \Rightarrow \frac{1}{2} \ln \frac{3}{4} + \ln \frac{r_g}{r_u} = -C_2 \frac{r_g}{2}, \quad (17)$$

$$C_2 = -\frac{\ln \frac{3}{4} \frac{r_g^2}{r_u^2}}{r_g}. \quad (18)$$

Таким образом, уравнение (15) для построения кривой  $AB$  принимает следующий вид:

$$r = r_u e^{\frac{\ln \frac{3}{4} \frac{r_g^2}{r_u^2} l}{r_g}} = r_u \left( \frac{3}{4} \frac{r_g^2}{r_u^2} \right)^{\frac{l}{r_g}}. \quad (19)$$

**Выводы.** Представленное выражение (19) позволяет построить линию передней кромки ножа с требуемой точностью, так как зависит только от удалённости произвольной точки режущей кромки от начальной линии (линии отвеса). Все остальные параметры обусловлены конструкцией измельчителя.

Таким образом, данное исследование приводит к созданию такой формы ножа (режущей кромки), которая обеспечивает:

- свободный выход крупных фрагментов материала в зону резания;
- максимальную работу разрушения путём удлинения режущей кромки;
- прочность и жёсткость рабочего органа;
- получение однородной степени измельчённого продукта.

## Литература

1. Камышева О.А. Разработка устройства для измельчения корнеплодов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 1 (51). С. 72–74.
2. Пат. № 118835. РФ, МПК7 АО/Ф 29/00. Универсальный шнеково-ножевой измельчитель кормов / В.В. Новиков, В.С. Зотеев, И.В. Успенская и др. Заявитель и патентообладатель Самарская ГСХА. № 2012109184/156; Заявл. 11.03.2012; опубл. 10.08.2012.
3. Сборник требований на машины и оборудование для механизации и электрификации животноводства. М.: АгроНИИТЭНИТО, 1989. 237 с.
4. Лемаева М.Н. Разработка измельчителя корнеплодов и обоснование его оптимальных конструктивных параметров и режимов работы: дисс. ... канд. техн. наук. Саранск, 2007. 218 с.
5. Аюгин Н.П. Снижение энергоёмкости измельчения корнеплодов с разработкой измельчителя и обоснованием его конструктивно-режимных параметров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010. 22 с.
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К.. Справочник по физике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981. 720 с.
7. Определение подачи цилиндрического шнекового пресса / В.В. Коновалов, В.В. Новиков, Д.В. Беляев, Л.В. Иноземцева // Нива Поволжья. 2010. № 2. С. 51–56.
8. Новиков В.В., Успенский В.В. Влияние сил трения на вязкости экструдата на процесс экструзии // Сборник материалов науч.-практич. конф. молодых учёных. Пенза: РИО ПГСХА, 2007. 88 с.
9. Пат. № 142728. РФ, МПК7 А01F29/00. Универсальный шнековый измельчитель кормов / В.В. Новиков, А.Л. Мишанин, И.В. Успенская, В.А. Никитин, О.А. Камышева; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Самарская ГСХА». № 2014100759/13; заявл. 09.01.2014; опубл. 27.06.2014.
10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и студентов втузов. М.: Наука, 1981. 720 с.