

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ БАРАБАННОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОЧИСТКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ

Ю.В. Воробьев, А.Д. Ковергин, Л.Х. Никитина

*Кафедра «Теория механизмов машин и детали машин», ТГТУ*

**Ключевые слова и фразы:** безжидкостная очистка; интенсивность изнашивания; микронеровности трущихся тел; фрикционная усталость.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы проектирования устройств барабанного типа для безжидкостной очистки продуктов. Предложена модель проектирования, учитывающая свойства упругого контакта взаимодействующих тел.

---

Загрязненность корнеклубнеплодов перед подачей в моечные агрегаты составляет 4...12 %. Удаление загрязненности как в сельскохозяйственных, так и в пищевых производствах связано со значительными расходами воды и других материально-технических средств. Например, длина гидротранспортеров, подающих свеклу к мойке на сахарных заводах, измеряется в сотнях метров. Снижение затрат на подготовку сырья к основным технологическим процессам возможно за счет использования безжидкостной очистки в грузочных устройствах. В качестве основы методов проектирования этих устройств целесообразно принять соотношения, полученные для процесса изнашивания поверхностей тел в условиях фрикционного взаимодействия [1].

Кривую фрикционной усталости можно представить в виде

$$N = \left( \frac{\sigma_B}{k\tau} \right)^t, \quad (1)$$

где  $N$  – число взаимодействий, приводящих к отделению частиц грязи с одного корнеклубнеплода;  $\sigma_B$  – предел прочности материала корнеклубнеплода;  $k = \text{const}$ ;  $t$  – показатель степени;  $\tau$  – напряжение сдвига в зоне взаимодействия.

Величину напряжения сдвига в контакте можно определить аналитически в зависимости от принятой гипотезы прочности для плоского или объемного напряженного состояния. Если принять поверхность взаимодействия корнеклубнеплодов и рабочих звеньев мойки гладкими, то величины напряжений в зоне их контакта можно рассчитать по формулам Г. Герца [1]. Следует заметить, что все напряжения в зоне контакта моющихся тел имеют условно мгновенную величину, которая определяется малой продолжительностью их взаимодействия. Динамическую нагрузку ограничивают по условиям сохранения показателей качества обрабатываемых продуктов. Для корнеклубнеплодов ограничение динамической нагрузки можно принять на основе использования максимально допустимой высоты падения на стальную, резиновую или деревянную плоскую поверхность, а также на одноименный продукт. Рекомендуемые значения допустимой высоты сбрасывания применяются при проектировании подъемно-транспортных устройств для корнеклубнеплодов. По высоте складирования определяются допустимые статические нагрузки на единичный продукт [2].

Эти данные позволяют рассчитать допустимые нагрузки и деформации в зоне взаимодействия корнеклубнеплодов в процессе очистки по условию сохранности показателей их качества. При создании машин для безжидкостной очистки пищевых изделий необходимо дополнительно учитывать ограничивающие условия в зависимости от конкретного назначения изделия (ограничение напряжений, деформаций, температуры, шероховатости, физико-механических свойств покрытия и т.д.).

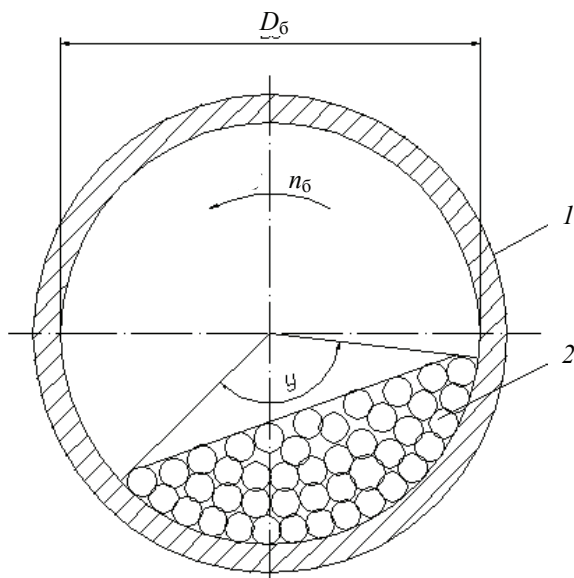
Формула (1) отражает процессы удаления частиц грязевого покрытия с поверхности корнеклубнеплодов при отсутствии моющей жидкости. Эти процессы имеют место только в тех случаях, когда физико-механические свойства корнеклубнеплода превышают по величине соответствующие свойства покрытия. Физико-механические свойства корнеклубнеплодов и покрытий наиболее полно и существенно отражаются показателями твердости ( $HВ_k$  и  $HВ_n$ ) и напряженного состояния (максимальные поверхностные касательные напряжения  $\tau_k$  и  $\tau_n$ ). Если твердость покрытия  $HВ_n$  больше твердости поверхности корнеклубнеплода  $HВ_k$ , то процесс сухой мойки теряет смысл, так как вместо удаления частиц грязевого покрытия будет происходить повреждение поверхностей корнеклубнеплодов. Допускаемые величины максимальных поверхностных касательных напряжений для корнеклубнеплодов  $\tau_{ок}$  и покрытий  $\tau_{оп}$  исполняют ту же самую роль в процессе «сухой» мойки. Влияние  $\tau_{ок}$  и  $\tau_{оп}$  значительно возрастает в случаях контакта между собой корнеклубнеплодов через поверхности трения с одинаковой твердостью. Такие случаи имеют место для корнеклубнеплодов с повышенной загрязненностью поверхности, т.е. в начале процесса очистки.

В начальной стадии процесса очистки корнеклубнеплодов и других штучных изделий их поверхности часто полностью закрыты слоями загрязнений с различной твердостью, поэтому вероятность повреждений для конечного продукта значительно снижается. С этих позиций лишний раз подтверждается целесообразность постановки устройств для «сухой» мойки в начало процесса очистки изделий от посторонних примесей.

Показатель степени  $t$  в формуле (1) определяется экспериментально после построения кривых усталости для материала загрязняющего покрытия. При построении кривых усталости величины напряжений  $\sigma_b$  и  $\tau$  задаются после определения скорости соударения изделия со стальным рабочим органом или с одноименным изделием. При отсутствии справочных данных величины напряжений можно определить экспериментально с помощью приборов МИТ-1, МИТ-2, ОТ-1 [3]. В частности, высота сбрасывания корнеклубнеплодов рассчитывается в соответствии с конструкцией экспериментальной моечной установки. Число циклов взаимодействий корнеклубнеплодов определяется с помощью статистических методов. Обозначим число взаимодействий среднестатистического корнеклубнеплода с соответствующей вероятностью за один оборот барабанной мойки  $C_k$ . Тогда для овощей и фруктов, имеющих форму шара (см. рис.) или близкую к нему (яблоки, свекла, картофель, репа и т.д.), число взаимодействий за один оборот барабанной мойки можно оценить по формуле

$$C_k = \frac{c_1 \pi D_b \varphi + c_2 D_b (360^\circ - \varphi)}{360^\circ d_k} = \frac{D_b}{d_k 360^\circ} (c_1 \pi \varphi + c_2 (360^\circ - \varphi)),$$

где  $c_1$  – число воздействий (точек касания) корнеклубнеплодов в периферийном (нижнем) слое ( $c_1 = 2 \dots 4$ ) со стороны соседних корнеклубнеплодов;  $D_b$  – диаметр барабана, мм;  $d_k$  – диаметр корнеклубнеплода, мм;  $c_2$  – число воздействий (точек контакта) на корнеклубнеплод ( $c_2 = 6 \dots 16$ ) со стороны соседних корнеклубнеплодов в верхних слоях моющихся продуктов;  $\varphi$  – угол, охватывающий сегмент круга, в котором располагаются корнеклубнеплоды, °.



**Рис. Поперечное сечение барабанной мойки:**  
1 – барабан; 2 – корнеклубнеплоды

Коэффициент заполнения поперечного сечения барабанной мойки  $\psi = 0,15 \dots 0,3$  связан с углом  $\varphi$  зависимостью

$$\psi = \frac{\varphi}{360^\circ} - \frac{\sin \varphi}{8\pi}.$$

Тогда число взаимодействий  $N$  можно определить по формуле

$$N = C_k n_\delta Z, \quad (2)$$

где  $n_\delta$  – число оборотов в минуту барабана мойки;  $Z$  – время пребывания корнеклубнеплодов в мойке, мин.

Заменим в формуле (1) напряжение сдвига на поверхности контакта (поверхностные касательные напряжения)  $\tau$  выражением

$$\tau = f p_r, \quad (3)$$

где  $p_r$  – среднее нормальное напряжение на контакте покрытий корнеклубнеплодов,  $\text{мм}^2/\text{Н}$ ;  $f$  – коэффициент трения в зоне контакта.

Величину средних нормальных напряжений определим по формуле [2]

$$p_r = \frac{4}{3\pi\theta} \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – упругая постоянная Кирхгофа для материала покрытия на изделии,  $\text{мм}^2/\text{Н}$ ;  $h$  – глубина внедрения единичной среднестатической неровности, мм;  $r$  – радиус кривизны единичной среднестатической неровности, моделированной в виде сферы, мм.

Величину  $\theta$  рассчитаем по формуле

$$\theta = \frac{1 - \mu^2}{E}, \quad (5)$$

здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости для материалов покрытия, МПа.

После подстановки (3) и (4) в формулу (1) получим

$$N = \left( \frac{3\pi\sigma_0\theta}{4kf} \sqrt{\frac{h}{r}} \right)^t, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  – амплитуда напряжений на графике кривых усталости при  $N = 1$ , величину которой для инженерных расчетов можно принять равной  $\sigma_B$ , МПа.

Формулу (6) можно использовать для определения числа циклов до разрушения при стационарном режиме нагружения. Однако амплитудные значения напряжений меняются с течением времени, так как изменяются площади срезаемых микроповерхностей при сближении изделий в процессе удаления покрытий. Контактующие микронеровности расположены на различной высоте, поэтому площадки касания могут располагаться как на их вершине, так и на основании.

Для перехода к условиям нестационарного нагружения введем некоторую меру удаления загрязнения, которая представляет собой неубывающую функцию времени, равную нулю для начального состояния покрытия и единице при полном его разрушении. Тогда, в соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений покрытия на изделиях, можно записать условие полного удаления загрязнений

$$\int_0^{N_3} \frac{dN_i}{N(\sigma_i)} = 1, \quad (7)$$

где  $N(\sigma_i)$  – число воздействий до разрушения покрытия при стационарном режиме нагружения с амплитудой напряжений  $\sigma_i$ ;  $N_3$  – число воздействий до разрушения покрытия при нестационарном нагружении.

Функцию распределения напряжений при нестационарном режиме нагружения выберем в виде

$$\Phi(\sigma_i) = P\{\sigma_X < \sigma_i\} = \frac{N_i}{N_3}, \quad (8)$$

где  $N_i$  – число воздействий в данной точке изделия с напряжением, меньшим  $\sigma_i$ .

Тогда число воздействий с напряжением в пределах  $\sigma_i$  и  $\sigma_i + d\sigma_i$

$$dN_i = N_3 \Phi'(\sigma_i) d\sigma_i. \quad (9)$$

В связи с этим условие разрушения (7) примет вид

$$N_3 \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{\Phi'(\sigma_i) d\sigma_i}{\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_i}\right)^t} = 1. \quad (10)$$

Распределение амплитуд напряжений такое же как и распределение вершин неровностей, поэтому можно записать

$$\Phi'(\sigma_i) d\sigma_i = \frac{\nu-1}{\varepsilon^{\nu-1}} x^{\nu-2} dx, \quad (11)$$

где  $\nu$  – параметр степенной аппроксимации опорной кривой профиля для микронеровностей, мм;  $x$  – расстояние от линии выступов микронеровностей до сечения профиля, отнесенное к максимальной высоте микронеровностей  $R_{\max}$ , мм;  $\varepsilon$  – от-

носительное сближение, выраженное в долях наибольшей высоты микронеровностей  $R_{\max}$ , мм.

Выражение (10) с учетом (11) запишем в виде

$$N_3 = N_\varepsilon K_{IV}, \quad (12)$$

здесь  $K_{IV}$  – коэффициент;  $N_\varepsilon$  – число воздействий до разрушения покрытия при стационарном режиме нагружения, которое можно представить [1] выражением

$$N_\varepsilon = \frac{3\pi\theta\sigma_0}{4kf} \sqrt{\frac{r}{R_{\max}\varepsilon}}; \quad (13)$$

коэффициент  $K_{IV}$  можно выразить

$$K_{IV} = \frac{\Gamma\left(\nu + \frac{t}{2}\right)}{\Gamma(\nu)\Gamma\left(1 + \frac{t}{2}\right)}. \quad (14)$$

Коэффициент  $K_{IV}$  в формуле (14) учитывает распределение показателей  $t$  и  $\nu$  в форме гамма-функции  $\Gamma$ . Этот коэффициент  $K_{IV} \geq 1$  [1], поэтому общее число воздействий, приводящих к разрушению  $N_3 \geq N_\varepsilon$ .

Для расчета изменения толщины покрытия при упругом контакте воспользуемся формулой, определяющей интенсивность изнашивания тела, которое контактирует с жестким (недеформируемым) телом [1]

$$J_h = C \left( \frac{p_a \theta}{K'_\nu} \right)^{1+\beta t} \Delta^{\frac{t}{2}(1-\beta)} \left( \frac{K_f^y}{\sigma_0 \theta} \right)^t \eta_{c,a}^{-\beta t}, \quad (15)$$

где  $\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}$ ;  $C = \frac{\nu^{1/2} F(\nu) \Gamma\left(1 + \frac{t}{2}\right)}{4(\nu+1) \Gamma\left(\nu + \frac{t}{2}\right)}$ ;

$$K'_\nu = \frac{K_\nu}{2\sqrt{\pi}}; \quad \beta = \frac{1}{2\nu+1}; \quad K_f^y = \frac{4kf}{3\pi}; \quad \eta_{c,a} = \frac{A_c}{A_a};$$

$p_a = \frac{F_n}{A_a}$  – номинальное давление в контакте, МПа;  $F_n$  – нормальная нагрузка, Н.

Величина  $b$  является параметром аппроксимизации для опорной кривой микронеровностей. Для определения параметра  $b$  разработана методика обработки профилограмм [1]. Коэффициент  $K_\nu$  учитывает распределение параметра  $\nu$  в форме гамма-функций и определяется по формуле

$$K_\nu = \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma\left(\nu + \frac{3}{2}\right)}.$$

Для  $\nu = 2$ ,  $K_\nu = 0,6$ ; для  $\nu = 3$ ,  $K_\nu = 0,52$ .

Величину коэффициента  $K_\nu$  можно найти в литературе [1, с. 256].

Кроме того, в формуле (15) используется контурная площадь контакта  $A_c$  и номинальная площадь контакта  $A_a$ , расчет которых подробно изложен в работе [1, с. 92 – 102).

Если контактируют два упругих тела, то расчет изменения толщины покрытия  $J'_h$  осуществляется по формуле

$$J'_h = J_h \alpha, \quad (16)$$

где  $\alpha = (1+c)^{-\frac{t}{2}(1+\beta)}$ ,  $c = \theta_2/\theta_1$ ,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – упругие постоянные Кирхгофа взаимодействующих тел. В частности для корнеклубнеплода принимается  $\theta_1$ , а для стали –  $\theta_2$  применительно к процессу очищения в машинах барабанного и кулачкового типа. В этих машинах процесс очищения осуществляется не только за счет взаимодействия изделий, но и за счет контакта изделий с металлическими поверхностями в рабочих объемах современных моечных агрегатов. Если упругие свойства обоих тел близки, то  $\alpha < 1$ . Значит интенсивность очистки за счет взаимодействия корнеклубнеплодов меньше, чем в случае взаимодействия их с металлическими звеньями машины.

Учет шероховатости поверхностей изделий осуществляется приведением задачи о контакте двух шероховатых тел к задаче о контакте шероховатой поверхности с гладкой. Для этого вычисляют эквивалентные характеристики шероховатой поверхности:

$$b = K_{v_{1,2}} b_1 b_2 \frac{(R_{\max 1} + R_{\max 2})^{v_1+v_2}}{R_{\max 1}^{v_1} R_{\max 2}^{v_2}}; \quad v = v_1 + v_2, \quad (17)$$

где  $K_{v_{1,2}} = \frac{v_1 v_2}{v_1 + v_2} \frac{\Gamma(v_1) \Gamma(v_2)}{\Gamma(v_1 + v_2)}$  – коэффициент, величину которого можно рассчитать или найти в [1, с. стр. 92]. В формуле (17) индексы 1 и 2 при параметрах шероховатости обозначают принадлежность параметров к одному или другому контактирующему телу.

В начале процесса очищения изделий происходит приработка поверхностей, которые покрывают изделия. Особенно интенсивно приработка проходит при очистке корнеклубнеплодов после уборки с поля машинным способом. Интенсивность приработки поверхностей значительно снижается при подаче корнеклубнеплодов из хранилища или с поля после ручной уборки. В процессе загрузки изделий и в начале их очистки на поверхностях пленок образуется так называемая равновесная шероховатость. Подставим в формулу (15) значение  $\Delta$ , которое соответствует равновесной шероховатости при  $v = 2$

$$\Delta = 16 \left( \frac{\tau_0}{\alpha_r} \right)^{5/4} \theta^{3/4} p_c^{-\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

здесь  $\alpha_r = 2,2\alpha$  – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении;  $\alpha$  – коэффициент гистерезисных потерь, определяемый опытным путем по одноосному растяжению-сжатию;  $p_c = F_n/A_c$  – контурное давление в контакте, МПа.

После подстановки получим

$$J_h^{\text{пр}} = C_1 \alpha_r p_c \tau_0^2 \theta^{1-\frac{t}{2}} \left( \frac{kf}{\sigma_0} \right)^t, \quad (19)$$

здесь  $C_1 = 0,12 \frac{16^{\frac{2t}{5}}}{2,6^{\frac{t-5}{4}}}$ ;  $J_h^{\text{пр}}$  – интенсивность изменения толщины покрытия в

процессе приработки изделий в начале их очищения.

Суммарное расчетное число циклов воздействий для разрушения пленки  $N_p$  можно представить для случая упругого контакта соотношением

$$N_p = N_{\text{пр}} + N_{\text{в}} + N'_{\text{в}}, \quad (20)$$

где  $N_{\text{пр}}$  – число циклов воздействий в период приработки;  $N_{\text{в}}$  – число циклов воздействий между очищаемыми изделиями;  $N'_{\text{в}}$  – число циклов воздействий между очищаемыми изделиями и рабочими поверхностями звеньев в машине.

Для определения составляющих в формуле (20) можно воспользоваться следующим выражением

$$N_i = \frac{\aleph_i}{J_{hi}} \sqrt{\frac{h_i}{r_i}} \eta_{i,r,a}, \quad (21)$$

где  $\aleph_i = \frac{1}{2(\nu_i + 1)} \sqrt{\frac{\nu_i}{2\alpha'_i}}$ . Здесь индекс  $i$  указывает на принадлежность к одному из

3-х этапов очищения изделий от покрытий;  $\eta_{r,a} = A_r/A_a$  – отношение фактической площади контакта  $A_r$  к номинальной площади контакта  $A_a$ ;  $\alpha'$  – коэффициент, учитывающий отличие площади сечения выступов на уровне  $x$  от величины фактической площади контакта для того же уровня сближения;  $\alpha' = 0,5$  – для сферической модели неровностей при упругом контакте;  $\alpha' = 1$  – при пластическом контакте.

Анализируя полученные зависимости с точки зрения использования их при проектировании безжидкостных очистных устройств, можно сделать следующие выводы:

1) при определении условных мгновенных механических характеристик для корнеклубнеплодов целесообразно использовать справочные данные по высоте их сбрасывания или складирования;

2) процессы первоначального взаимодействия загрязненных поверхностей следует проводить в устройствах, отдельных от основного очищающего агрегата и снабженных механизмами для отбора большого объема продуктов очистки;

3) взаимодействие корнеклубнеплодов с более жесткими телами ускоряет процессы их очистки и увеличивает вероятность их повреждения;

4) интенсивность очистки корнеклубнеплодов при взаимодействии с более жесткими телами можно повысить за счет придания более жестким телам формы, близкой к форме корнеклубнеплодов;

5) по формуле (16) можно определить интенсивность износа рабочих звеньев в устройствах для безжидкостной очистки, что позволит рассчитать сроки их отказов, технических обслуживаний и ремонтов.

### *Список литературы*

1. Крагельский Н.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.
  2. Красников В.В., Дубинин В.Ф., Акимов В.Ф. и др. Подъемно-транспортные машины. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.
  3. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 584 с.
- 

## **Designing of Drum Type Devices for Preliminary Cleaning of Root Tuber-Bearing Plant**

**Yu.V. Vorobyov, A.D. Kovergin, L.Kh. Nikitina**

*Department "Theory of Machine Mechanisms and Machine Parts", TSTU*

**Key words and phrases:** distribution of indexes for micro-unevenness for friction bodies; designing of devices for cleaning goods; intensity of deterioration; friction fatigue; non-liquid cleaning of products and goods.

**Abstract:** Matters of designing devices of drum type for non-liquid cleaning of products are considered. The model of designing taking into account qualities of elastic contact of interacting bodies is offered.

---

## **Projektierung der Anlagen des Trommeltypus für die Primärreinigung von Wurzelknollenfrüchten**

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen der Projektierung der Anlagen des Trommeltypus für die flüssiglosen Produktenreinigung beobachtet. Es ist das die Eigenschaften des elastischen Kontaktes der zusammenwirkenden Körper berücksichtigende Projektierungsmodell vorgeschlagen.

---

## **Conception des appareils du type tambour pour le nettoyage primaire des plantes-racines**

**Résumé:** Sont examinés les problèmes de la conception des appareils du type tambour pour le nettoyage sans liquide des produits. Est proposé le modèle de conception compte tenu des propriétés du contact élastique des corps qui se trouvent en action réciproque.

---