

УДК 631.361.022

UDC 631.361.022

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Technical Sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА РЕБРА ВАЛЬЦА ПЛАНЕТАРНОГО МОЛОТИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА О ХЛЕБНУЮ МАССУ****STUDY OF THE SHOCK PULSE IN EDGES OF THE PLANETARY DRUM OF A THRESHING DEVICE OF THE GRAIN MASS**

Богус Азамат Эдуардович  
ст. преподаватель кафедры «Процессы и машины в агробизнесе», SPIN-код 9567-1848,  
email: azamat089@gmail.com

Bogus Azamat Eduardovich  
Senior Lecturer, SPIN code 9567-1848  
email: azamat089@gmail.com

Грачев Евгений Андреевич  
студент  
email: islate1999@mail.ru  
*ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия*

Grachev Evgenij Andreevich  
student  
email: islate1999@mail.ru  
*Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia*

Одним из факторов разрушения связей зерна с колосом при обмолоте хлебной массы ударно-вибрационным молотильным устройством является удар ребра вальца о хлебную массу. Само слово «удар» без уточняющего дополнения может иметь разнообразные смысловые значения, связанные с различными отраслями науки. Смысл его выражает идею о внезапном факте; хотя в различных отраслях знаний он не отождествлен. Нами рассмотрены только некоторые аспекты физического удара, связанные с соударением рабочих органов машин и обрабатываемого материала. В статье представлено исследование ударного импульса вальца молотильного устройства о хлебную массу. Для выявления сущности явлений при ударе рабочего органа по зерну использован графоаналитический метод. Получены зависимости позволяющие определять ударный импульс ребра молотильного вальца о хлебную массу, геометрические и кинематические параметры молотильного устройства, а также могут использоваться для определения энергозатрат

One of the factors of the destruction of the bonds of grain with the hit when threshing the bread mass with a shock-vibrating threshing device is the impact of the roll edge on the bread mass. The very word "blow" without a clarifying supplement can have various meanings associated with various branches of science. Its meaning expresses the idea of a sudden fact; although in different branches of knowledge it is not identified. We have considered only certain aspects of the physical impact associated with the impact of the working organs of machines and the material being processed. The article presents a study of the impact pulse of a threshing device on bread mass. To reveal the essence of phenomena when a working organ is impacted by grain, a graph analytical method is used. Dependences allowing determining the impact pulse of the mill roll edge on the bread mass, geometric and kinematic parameters of the threshing device are obtained, and also can be used to determine the energy costs

Ключевые слова: ЗЕРНО, РАЗРУШЕНИЕ, ДЕФОРМАЦИЯ, ГРАФАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ, КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, РЕБРА ВАЛЬЦА, УДАРНЫЙ ИМПУЛЬС, УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ, ПЛАНЕТАРНЫЙ МОЛОТИЛЬНЫЙ АППАРАТ

Keywords: GRAIN, DESTRUCTION, DEFORMATION, CURRENCY-POLITICAL METHOD, KINETIC ENERGY, REVERSAL ROLL, IMPULSE, CORNER SPEED, PLANETARY THRESHING DEVICE

Doi: 10.21515/1990-4665-135-020

**Введение.** Одним из факторов разрушения связей зерна с колосом при обмолоте хлебной массы ударно-вибрационным молотильным устройством является удар ребра вальца о хлебную массу [2,3]. Знание величины ударного импульса, сообщенного вальцом стеблю с колосом, позволит опреде-

лить некоторые геометрические и кинематические параметры молотильного устройства и сравнить величину этого импульса с допустимым значением, при котором не происходит повреждения зерна.

**Цель исследования.** Получить математические зависимости для определения параметров молотильного устройства. величины ударного импульса ребра молотильного вальца о хлебную массу.

**Графоаналитический метод академика В.П. Горячкина.** Само слово «удар» без уточняющего дополнения может иметь разнообразные смысловые значения, связанные с различными отраслями науки. Смысл его выражает идею о внезапном факте; хотя в различных отраслях знаний он не отождествлен. Мы рассмотрим только некоторые аспекты физического удара, связанные с соударением рабочих органов машин и обрабатываемого материала. Многие случаи взаимодействия частиц физических объектов в статическом состоянии доступны непосредственным замером, однако для прогноза результатов технологического процесса необходима информация о закономерностях изменения физико-механических свойств среды в процессе обработки. В настоящее время непосредственные замеры свойств среды в динамике практически еще недоступны. В таких случаях приходится прибегать к различным способам косвенного определения динамических параметров процесса. Во многих случаях физические удары могут быть связаны со сравнительно кратковременными воздействиями, а в других случаях на первое место могут выходить условия повторяющегося нагружения. И то, и другое имеет место в технологических процессах уборочных и других машин сельскохозяйственного производства.

Сложный процесс преобразований энергии в условиях удара приводит к серьезным трудностям в теории при математическом решении проблем, связанных с ударом. Для теоретического исследования модели соударения, представляющего физическую систему, она должна быть идеализирована, а основные динамические параметры соударяющихся тел должны быть опре-

делены из соответствующих экспериментов. Как следствие этого, полное решение может быть получено только для тел с простой геометрической формой при использовании закона сохранения масс, сохранения количества движения и баланса механической энергии. В данный момент существует много различных подходов к решению этой проблемы, но до сих пор еще не сформулирована общая теория удара. Заметим, что иногда можно получить хорошее описание явления удара, если рассматриваемые граничные условия определяются либо силами, либо скоростями. Расчет, основанный на приведении задачи к эквивалентному статическому нагружению при решении проблемы удара, должен применяться с очень большой осторожностью, так как результат между подобным расчетом и экспериментальными данными зачастую не сопоставимы. Дальнейшие исследования могут привести к пониманию основ процессов, происходящих в сложных условиях удара.

Для выяснения сущности явлений, происходящих при ударе рабочего органа по зерну, можно использовать графоаналитический способ расчета распределения энергии при ударе [1] (по методу академика В. П. Горячкина). С этой целью рассмотрим действие одиночных ударов молотков, когда противодействием является сила инерции зерна в целом или его частей материала.

Допустим, что между куском и молотком возникает совершенно неупругий, прямой, центральный удар. Тогда при ударе по куску (зерну) импульс силы  $i$ , равный изменению количества движения молотка, составит

$$I = M(V_m - V_k) \quad (1)$$

где  $M$  – масса молотка, кг;

$V_m$  и  $V_k$  – скорость молотка до и после удара, м/с.

С другой стороны, если кусок (зерно) имеет начальную скорость  $V_3$ , то импульс силы, равный изменению количества движения зерна, составит

$$I = mV_k \quad (2)$$

где  $m$  – масса куска, кг;

$V_k$  – скорость куска, равная скорости молотка после удара, м/с.

Приравняем правые части этих формул и определим:  $V_k$

$$V_k = \frac{V_m}{1 + \frac{m}{M}} \quad (3)$$

Отсюда видно, что конечная скорость молотка зависит от отношения масс ударяемого и ударяющего тел и изменяется по гиперболической зависимости. Отношение  $m/M$  называют относительной массой.

Из теоретической механики известно, что при неупругом ударе тел часть кинетической энергии затрачивается на движение системы соударяющихся тел, а другая часть на работу деформации –  $A_{\text{деф}}$ . Определим эту работу.

Полная кинетическая энергия молотка до удара

$$A_0 = \frac{MV_m^2}{2}, \quad (4)$$

а после удара она уменьшится и станет равной

$$A_m = \frac{MV_k^2}{2}. \quad (5)$$

Если принять кинетическую энергию куска (зерна) до удара молотком равной нулю, то после удара кусок приобретет скорость  $V_k$  и получит от молотка кинетическую энергию движения

$$A_3 = \frac{mV_k^2}{2} \quad (6)$$

На основании закона о сохранении энергии при ударе можно записать  $A_0 = A_m + A_3 + A_{\text{деф}}$ , откуда  $A_{\text{деф}} = A_0 - (A_m + A_3)$ . Подставляя соответ-

ствующие значения составляющих энергии, получим:

$$A_{\text{деф}} = \frac{MV_m^2}{2} - \left( \frac{MV_k^2}{2} + \frac{mV_k^2}{2} \right) = \frac{MV_m^2 - MV_k^2 - (mV_k)V_k}{2} =$$

$$\frac{MV_m^2 - MV_k^2 - M(V_m - V_k)V_k}{2} = \frac{MV_m(V_m - V_k)}{2} \quad (7)$$

Так как  $M(V_m - V_k) = mV_k$ , то работа деформации

$$A_{\text{деф}} = \frac{mV_m V_k}{2} \quad (8)$$

Из (8) следует, что работа деформации зависит от скорости молотка после удара  $V_k$  и изменяется по линейному закону. Скорость  $V_k$  зависит от относительной массы, поэтому и работа деформации зависит от нее.

Таким образом, полная энергия, сообщаемая куску молотком

$$A = A_{\text{деф}} + A_3 = \frac{mV_m V_k}{2} + \frac{mV_k^2}{2} = \frac{mV_k(V_m + V_k)}{2}. \quad (9)$$

Из (9) вытекает, что полная энергия, сообщаемая куску материала молотком, является функцией конечной скорости и изменяется по параболической зависимости.

Наглядное представление о распределении кинетической энергии удара дает график академика В.П. Горячкина, который представлен в виде номограммы (рисунок 1). В верхнем квадранте по оси координат отложены значения энергии  $A$ , а по оси абсцисс –  $V_k/V_m$  т.е. значения скорости  $V_k$  молотка после удара в долях от скорости молотка до удара  $V_m$ . В нижнем квадранте по оси ординат отложены значения относительной массы  $m/M$  в логарифмическом масштабе, который не обходим для сокращения длины шкалы  $m/M$ . В нижней части графика построена гипербола (9)  $V_k = f(m/M)$  (изменение формы гиперболы вызвано логарифмическим

масштабом).

В верхнем квадранте графика показаны зависимости  $A_{\text{деф}} = f(V_k)$ ,  $A_s = f(V_k)$  т.е. Прямая (8) и парабола (7), которые делят верхний квадрант на три части. Точки ординаты, лежащие ниже прямой, представляют собой энергию  $A_{\text{деф}}$ , идущую на деформацию зерна. Точки ординаты, лежащие между параболой и прямой, дают значение энергии  $A_3$ , движения куска (зерна) после удара; точки ординаты выше параболы показывают значения энергии молотка, оставшейся после удара,  $A_m = A_0 - A$ .

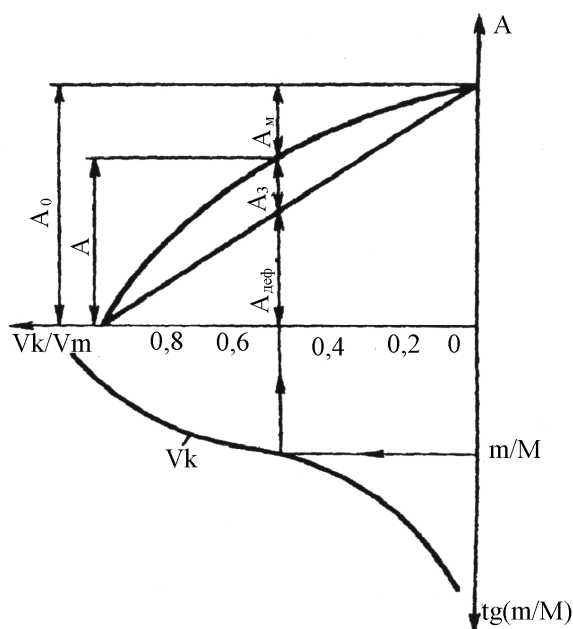


Рисунок 1 - Распределение кинетической энергии удара

Для анализа графика по оси  $m/M$  откладывают конкретное значение относительной массы и проектируют на функцию  $V_k = f(m/M)$ , а затем в верхнюю часть графика, где находят распределение энергии по составляющим. Из графика видно, что при малых значениях  $m/M$  распределение энергии в левой части графика пойдет при  $V_k/V_m = 1$ . Здесь очень мало энергии молотка затрачивается на деформацию, и большая часть остается в

виде свободной энергии молотка. Такие режимы характерны для молотковых дробилок сельскохозяйственного назначения.

В реальном процессе молотковой дробилки зерно после соударения с молотком направляется для удара о неподвижные части дробилки (деку, решето). Профессор С.В. Мельников определяет, что энергия  $A_s$  также будет превращена в энергию деформации при ударе зерна о неподвижные части.

Необходимо также отличать работу деформации  $A_{\text{деф}}$  от работы, необходимой на разрушение материала, которая обусловлена физико-механическими свойствами материала, степенью измельчения и скоростью удара.

Уравнения распределения энергии при ударе получены при допущении, что зерно не обладает упругими свойствами. Фактически же по результатам исследований профессора В.И. Сыроватки, корма обладают упругими свойствами, характеризуемыми коэффициентом восстановления при ударе. Значения коэффициента восстановления зерна средней сухости находятся в пределах 0,3–0,4. При этом энергия на деформацию расходуется лишь на 84–91% ее максимального значения.

Таким образом, метод В.П. Горячкина является приближенным и не дает точного определения критической скорости удара. С другой стороны, критическая скорость, определяемая этим способом, является скоростью гарантированного разрушения зерна. Для большинства рабочих органов сельскохозяйственных машин необходима критическая скорость, при которой нет не только разрушения, но и повреждения продуктов переработки, т.к. большинство из них становится не пригодными к длительному хранению.

**Исследования ударного импульса ребра вальца о хлебную массу.**  
Окружная, скорость подающих вальцов молотильного аппарата в 12–20 раз

меньше окружной скорости ребра многогранного вальца (рисунок 2). Такой перепад окружных скоростей и большая степень сжатия соломы между обмолачивающими вальцами позволяет натягивать хлебную массу между подающими и обмолачивающими вальцами в процессе обмолота. Поэтому допустимо рассматривать обмолачиваемую массу в этом промежутке как однородный стержень, воспринимающий ударный импульс.

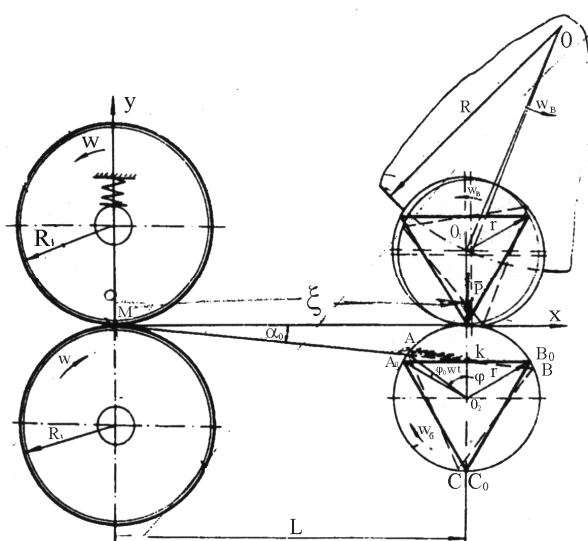


Рисунок 2 - Схема к определению ударного импульса ребра вальца о хлебную массу

Допустим, что удар ребра вальца о солоmistую массу происходит тогда, когда грань вальца занимает положение АВ, переходя в это положение из  $A_0B_0$  на угол  $\varphi = \omega t$ . Рассмотрим действие ударного импульса на часть хлебной массы, заключенной между подающими и рабочими вальцами.

Для определения ударного импульса ребра молотильного вальца воспользуемся теоремой об изменении момента количества движения системы при ударе относительно оси  $M_0$ . Применительно к нашей схеме мы имеем

$$J_M = (\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_0) = M_M(S), \quad (10)$$



где  $J_M$  – момент инерции стеблевого, потока относительно оси М:

$$J_M = \frac{1}{3}ml_1^2, \quad (11)$$

где  $m$  – масса слоя стеблей (на длине  $l_1 = mk$ ), м;

$M_M(S)$  – момент относительно оси М ударного импульса о стебли,

$\dot{\alpha}_0 = 0$  – начальная угловая скорость стебля,  $c^{-1}$ ;

$\dot{\alpha}$  – угловая скорость стебля после удара,  $c^{-1}$ .

Для определения угловой скорости стеблей после удара найдем угол  $\alpha_0$ , полагая, что  $\dot{\alpha}_0 = \varphi$ . Начальные значения угла  $\alpha$ , при котором  $\alpha_0 = 0$ , определяются положением  $A_0B_0C_0$  вальца подбарабанья. Тогда

$$tg \alpha_0 = \frac{R_1 - R_1 \cos \frac{\pi}{i}}{L}, \quad (12)$$

где  $R_1$  – радиус описанной окружности вальца, м;

$i$  – число граней молотильного вальца;

$L$  – межцентровое расстояние, м.

Отсюда

$$\alpha_0 = arctg \frac{R_1 - R_1 \cos \frac{\pi}{i}}{L}. \quad (13)$$

Угол наклона стеблей хлебной массы к оси Х после начала контакта ребра А со стеблями определится по формуле:

$$tg \alpha = \frac{R_1 - R_1 \cos \left( \frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t \right)}{L - R_1 \sin \left( \frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t \right)}, \quad (14)$$

где  $t$  – время поворота вальца, исчисляемое после начала контакта ребра А с соломой, с;

$\omega_1$  – угловая скорость молотильного вальца,  $c^{-1}$ .

Ввиду малого значения угла  $\alpha_0$  (не более  $11^\circ$ ) при  $L = 2,5 R_1$  принимаем  $tg \cong \alpha$ . Угловая скорость вращения стеблей относительно оси М равна

$$\dot{\alpha} = \frac{\omega_1 R_1 \left[ R_1 - R_1 \cos\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) - L \sin\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) \right]}{\left[ L - R_1 \sin\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) \right]^2}. \quad (15)$$

Учитывая, что вращательное движение соломистой массы обеспечивается ударным импульсом, перпендикулярным  $mk$ , запишем уравнение (10) в виде

$$J_M (\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_0) = S \cdot h_1, \quad (16)$$

где  $h_1$  – расстояние от точки М до места удара, м:

$$h_1 = \frac{L - R_1 \sin\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right)}{\cos \alpha_0}. \quad (17)$$

Подставив значения (11), (15), (17) в уравнение (16), получим выражение ударного импульса в виде

$$S = \frac{(ml_1^2 \{ \omega_1 R_1 \left[ R_1 - R_1 \cos\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) - L \sin\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) \right] \} \cos \alpha_0)}{\left( 3 \left[ L - R_1 \sin\left(\frac{\pi}{i} - \alpha_0 - \omega_1 t\right) \right]^3 \right)}. \quad (18)$$

Для выражения ударного импульса при следующих начальных условиях  $R_1 = 0,06$  м,  $L = 2,5 R_1$ ,  $\alpha_0 = 6^\circ$ ,  $l_1 = \frac{L}{\cos \alpha_0}$ ,  $t = 0,005$  с в

диапазонах изменения угловой скорости  $180 < \omega_1 < 220 c^{-1}$  и числе гра-

ней обмолачивающих валцов  $3 \leq i \leq 8$  получена следующая поверхность откликов (рисунок 3).

Анализ формулы (18) показывает, что ударный импульс зависит от угловой скорости и радиуса молотильного вальца, остальные параметры имеют постоянное значение для данного молотильного аппарата. Абсолютная угловая скорость вальца барабана больше угловой скорости вальца подбарабанья, поэтому определение ударного импульса вальца барабана также необходимо для дальнейших расчетов, как и ударный импульс вальца подбарабанья.

При определении ударного импульса вальца барабана можно воспользоваться формулой (18), полагая вместо  $\omega_1$ , абсолютную угловую скорость валцов барабана, которая равна сумме угловых скоростей барабана и вальца [2].

### **Выводы**

1. Полученная формула позволяет определить величину ударного импульса ребра молотильного вальца о хлебную массу.
2. Пользуясь формулой (18) и учитывая другие факторы, способствующие выделению зерна из метелки (очес, вибрацию, инерционные силы), можно определить некоторые геометрические и кинематические параметры молотильного устройства, оптимизирующие процесс обмолота.
3. Выражение (18) может быть применено при определении энергозатрат молотильного аппарата ударно-вибрационного воздействия.

### **Библиографический список**

1. Богус Ш.Н. Определение ударного импульса вальца о хлебную массу в рабочей щели молотильного устройства. [Текст] / Ковалева Л.П., Ш.Н. Богус, // Конструкция и расчет уборочных машин: Труды КубСХИ. – Вып. 206(234). – Краснодар, 1981.
2. Папуша С.К. Теоретическое исследование процесса отделения листа табака от стебля. [Текст] / Виневский Е.И., Коновалов В.И., Коновалов С.И., Стерлигов

О.А., Папуша С.К // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 126. С. 289-303.

3. Papusha S.K. Theoretical studies of the tobacco stalk interaction with the leaf-separating unit. [Текст] / Belousov S.V., Bogus A.E., Konovalov V.I., Papusha S.K. //International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 8. С. 5610-5613.

### References

1. Bogus Sh.N. Opredelenie udarnogo impul'sa val'ca o hlebnuju massu v rabochej shheli molotil'nogo ustrojstva. [Текст] / Kovaleva L.P., Sh.N. Bogus, // Konstrukcija i raschet uborochnyh mashin: Trudy KubSHI. – Vyp. 206(234). – Krasnodar, 1981.

2. Papusha S.K. Teoreticheskoe issledovanie processa otdelenija lista ta-baka ot steblja. [Текст] / Vinevskij E.I., Konovalov V.I., Konovalov S.I., Sterligov O.A., Papusha S.K // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kuban-skogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 126. S. 289-303.

3. Papusha S.K. Theoretical studies of the tobacco stalk interaction with the leaf-separating unit. [Текст] / Belousov S.V., Bogus A.E., Konovalov V.I., Papusha S.K. //International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 8. С. 5610-5613.