

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ КОМКОВ НА ПРОСЕВАЮЩИХ СЕПАРАТОРАХ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНЫХ МАШИН

Камалетдинов Р.Р., Рахимов З.С., Абдрахманов Р.К.

Реферат. В статье рассмотрен процесс разрушения почвенных комков на просеивающих сепараторах картофелеуборочных машин, основанный на теории малоциклового усталостной прочности, исходящей из положения, что разрушение возникает в результате наличия начальных дефектов и заключается в зарождении и развитии имеющихся в теле трещин. Составлена вероятностная модель уменьшения до «проходных» размеров крупных почвенных частиц, рассматривающая не только их разрушающее, но и упрочняющее воздействие циклических нагрузок просеивающих сепараторов, а также влияние зон приложения нагрузки к комку на интенсивность процесса разрушения и чистоту сходового вороха. Получен вывод о возможности повышения эффективности процесса разрушения почвенных частиц при использовании вибрационных воздействий. Предложена конструкция и определены рациональные параметры вибрационного сепаратора с отражателем.

Ключевые слова: уборка картофеля; разрушение почвенных комков, малоцикловая усталостная прочность, вибрационный сепаратор.

Введение. При работе на тяжёлых почвах эффективность работы картофелеуборочных машин определяется преимущественно интенсивностью разрушения комков под воздействием внешних сил до проходных размеров. Для разрушения почвенных комков в основном используются два вида воздействия: динамический удар о сепарирующую поверхность и статическое сжатие комкоразрушающими баллонами [1,2,3,4,5]. При этом значения внешних сил, обеспечивающих разрушение почвенных комков, ограничены условием повреждаемости клубней. Так, средняя прочность клубней при сжатии до появления видимых повреждений, по данным И.М. Полуночева изменяется в пределах 481...750Н. Прочность почвенных комков с увеличением размеров возрастает от 196 Н до 1860 Н, что значительно больше допустимых показателей клубней [6]. Близкие к приведенным данным получены В.С. Митрофановым и М.Е. Мацупуро, исходящие из того, что разрушение комка происходит почти мгновенно, если для данного состояния почвы величина внешнего усилия достигает некоторой критической величины [7,8].

Вместе с тем, начиная с работ А.Ф. Иоффе, А.А. Грифтиса, Е.О. Орована, появилось направление, исходящее из того, что разрушение возникает в результате наличия начальных дефектов и заключается в зарождении и развитии имеющихся в теле трещин [9,10]. Данный подход более характерен при рассмотрении усталостных разрушений, вызванных воздействием циклической нагрузки, что соответствует силовым воздействиям просеивающих сепараторов на картофельный ворох.

Условия, материалы и методы исследований. В принятой нами трактовке усталостное разрушение является следствием наличия

в материале ряда «слабых мест», в частности, для почвенного комка «слабыми местами» являются всевозможные растительные и органические включения, внутренние и поверхностные трещины и т.д. Каждое «слабое место» по мере накопления числа циклов нагружения приводит к образованию местной трещины, которая возникнув, постепенно увеличивается (развивается). Схематически процесс развития трещин можно рассматривать как постепенное накопление единичных «повреждений». Когда их число станет достаточно большим и равным некоторому числу M , настанет разрушение.

Обозначим число циклов, необходимых для накопления k единичных повреждений через $N^{(k)}$. Исходя из того, что необходимое число циклов $N^{(k)}$, приводящих к разрушению почвенного комка, является величиной случайной и обусловлен стохастической природой «слабого места» возникновения и развития отдельной трещины, переход из состояния $N^{(k)}$ в состояние $N^{(k-1)}$ может быть связан соотношением:

$$N^{(k)} = N^{(k-1)} + \varepsilon_k, \quad (1)$$

где ε_k – некоторое дополнительное число циклов, необходимых для перехода от $k - 1$ повреждений к k повреждениям.

Общепринято, что при циклических нагрузках вероятностная плотность $N^{(k)}$ подчинена нормальному закону [11,12]. На наш взгляд, было бы более корректно считать, что величина $N^{(k)}$ распределена по логарифмически нормальному распределению, а в основу данного предположения могут быть заложены следующие пояснения.

Пусть:

$$\varepsilon_k = \delta_k \cdot (N^{(k-1)})^{\alpha}, \quad (2)$$

где δ_k –случайная величина накопления интенсивности повреждений.

Поскольку:

$$\delta_k = \frac{N^{(k)} - N^{(k-1)}}{N^{(k-1)}}, \quad (3)$$

То

$$\sum_{k=1}^m \delta_k = \sum_{k=1}^m \frac{N^{(k)} - N^{(k-1)}}{N^{(k-1)}}. \quad (4)$$

Считая, что прирост числа циклов для перехода от k повреждений к $k+1$ повреждениям мал, заменим суммирование интегрированием.

Тогда:

$$\sum_{k=1}^m \delta_k = \sum_{k=1}^m \frac{N^{(k)} - N^{(k-1)}}{N^{(k-1)}} \approx \int_{N^{(0)}}^{N^{(m)}} \frac{dN}{N} = \ln N^{(m)}. \quad (5)$$

Предполагая, что $\sum \delta_k = z$ и является суммой независимых случайных величин и соответственно имеет нормальное распределение, можно записать плотность вероятности случайной величины z :

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b}} \cdot e^{-\frac{(z-a)^2}{2b^2}}. \quad (6)$$

С учётом выше изложенного и, подставив (5) в формулу (6) плотность вероятности можно представить как логарифмически нормальное распределение:

$$f(N(m)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b}} \cdot e^{-\frac{(\ln N^{(m)} - a)^2}{2b^2}}. \quad (7)$$

Полученное распределение показывает, что с определённого числа циклов интенсивность возникновения повреждений уменьшается. В данной трактовке циклические внешние воздействия просеивающих органов картофелеуборочных машин можно рассматривать как наложение двух процессов: разрушения – вследствие развития трещин и упрочнения – вызванного уплотнением почвенных комков.

Приведённые расчёты позволяют предположить, что упрочнение почвенных частиц вызвано их уплотнением. При этом на характер развития трещин влияют не только скорость соударения и предел прочности, но место приложения внешних сил. Экспериментальные исследования по разрушаемости почвенных комков в зависимости от числа циклов и зоны приложения сил подтвердили достоверность теоретических предположений. Исходным материалом для проведения опытов служили почвенные комки, полученные на уплотнителе. Оценка проводилась с использованием устройства, состоящего из решетчатого основания и штатива с мерной шкалой. По штативу перемещается груз со сменным нако-

пунком. Устройство позволяет определить необходимое число ударных импульсов разной величины силы для разрушения почвенного комка при приложении сил в одну или в случайные точки.

Анализ и обсуждение результатов. На рисунках 1а и 1б приведены гистограммы разрушаемости почвенных комков с влажностью почвы $w = 25\%$ и плотностью $p = 1600 \dots 1700 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от числа воздействий постоянного импульса, приложенного в ограниченную и в случайные зоны соответственно. Учитывая, что расчётный критерий χ^2 при 90% доверительной вероятности превышает табличное значение, гипотеза о подчинении разрушения почвенных комков в зависимости от числа циклов логарифмически нормальному закону принимается. Для выше приведённого случая при воздействии внешних сил в случайные зоны, значение коэффициентов $a = 2.2$ и $b = 0.28$, в ограниченную – $a = 1.72$ и $b = 0.36$. Коэффициент a определяет положение медианы распределения, т.е. среднее количество циклов необходимое для разрушения почвенного комка, а величина b определяет разброс числа циклов около среднего значения, т.е. коэффициент вариации.

В табл. 1 приведены коэффициенты a и b плотности распределения логарифмически нормального закона разрушения почвенных комков.

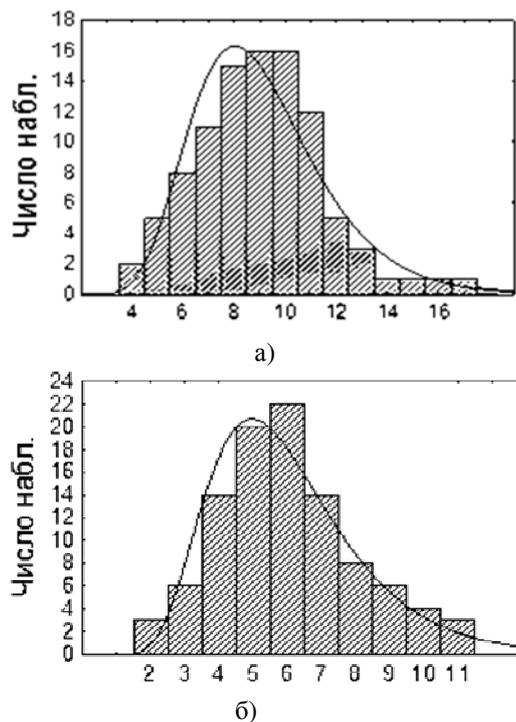


Рисунок 1 – Гистограммы разрушаемости почвенных комков плотностью $p=1600..1700 \text{ кг/м}^3$ и влажностью $w= 25\%$ при воздействии сил: а) в случайную, б) ограниченную зоны

Полученные данные свидетельствуют, что при воздействии внешних сил в случайные зоны, необходимо значительно большее количество ударов, чем при воздействии в ограниченную зону. А это подтверждает предположение о том, что разрушение происходит вследствие наличия «слабых мест» и развития имевшихся в теле комка трещин. Удары в ограниченную зону обеспечивают целенаправленное развитие трещин и более быстрое разрушение комков, а удары в случайные точки, помимо развития трещин, могут также вызывать их «схлопывание», уплотнение и повышение прочностных свойств комков. На основании полученных данных в качестве возможного решения была предложена гипотеза о целесообразности многократного воздействия в ограниченную зону почвенных частиц, например, вибрационного воздействия.

На рисунке 2 показаны усреднённые границы разрушаемости почвенных комков различной плотности и влажности при воздействии статического сжатия, динамического удара и вибрации, величины которых ограничены условием повреждаемости клубней.

Воздействие вибрации обеспечивает, при одинаковой влажности, разрушение более плотных почвенных комков. Например, при влажности 22...24% под действием вибрации

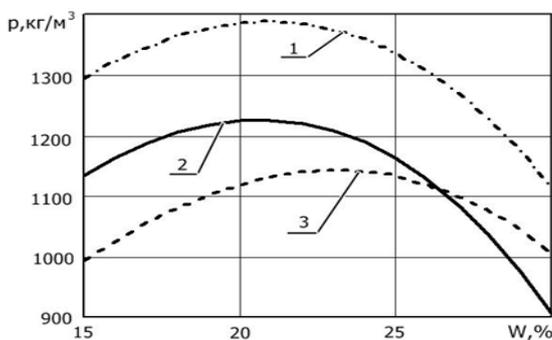
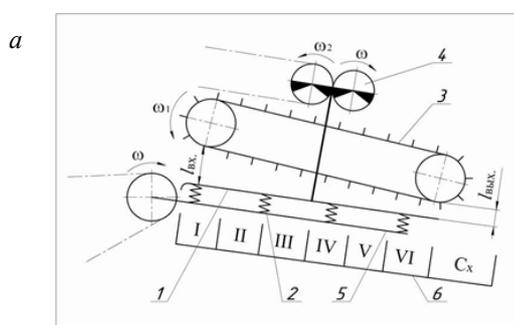


Рисунок 2 – Границы разрушаемости почвенных комков в зависимости от плотности и влажности при действии вибрации (1), динамического удара (2), статического сжатия (3).

разрушаются почвенные комки плотностью 1600...1700 кг/м³, при динамическом ударе – 1400...1500 кг/м³, а при статическом сжатии – 1300...1400 кг/м³. Это, на наш взгляд, объясняется тем, что вибрация обеспечивает более целенаправленное развитие трещин за счёт постоянства воздействия внешних сил в определённую (ограниченную) зону комка и более эффективное удаление почвенных комков и соответственно к повышению чистоты сходового вороха. На основании полученных данных была предложена конструкция сепаратора, представленная на рисунке 3, состоящего из вибрирующей решета с установленным над ним вращающимся отражающим транспортом.



1 – грохот; 2 – пружины; 3 – отражающий транспортер; 4 – вибратор; 5 – рама; 6 – секционный ящик
Рисунок 3 – Вибрационный сепаратор картофельного вороха: а) принципиальная схема; б) экспериментальная картофелеуборочная машина

Таблица 1 – Значения коэффициентов *a* и *b* функции распределения вероятности разрушения комков

Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Значение коэффициентов при ударе			
		в ограниченную зону		в случайную зону	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1470	20	0,58	0,47	1,36	0,25
1660	20	1,36	0,25	2,27	0,12
1820	20	2,40	0,09	3,20	0,17
1650	25	1,78	0,17	2,20	0,11
1860	25	2,40	0,09	3,21	0,10
1910	25	3,23	0,17	3,70	0,08
1850	30	2,20	0,11	3,04	0,10
1950	30	2,96	0,25	3,57	0,06
1960	30	3,55	0,10	4,13	0,11

Таблица 2 – Показатели качества работы экспериментального и серийного копателей

Показатели	Поле-1		Поле-2		Поле-3	
	КТН-2Б	Эксп.	КТН-2Б	Эксп.	КТН-2Б	Эксп.
Извлечено клубней на поверхность, %	96,1	98,0	81,7	93,4	75,6	94,0
Содержание почвы в сходовом ворохе, %	76,8	45,6	90,5	82,3	84,2	45,7
Повреждено клубней, %	3,1	3,6	2,0	2,3	2,5	3,4

Количество повреждённых клубней картофеля и потери оценивалась по методике, изложенной в ОСТ 70.8.5.74 «Испытания картофелеуборочных машин». Часть из полученных результатов представлены в табл. 2.

Анализ результатов показывает, что экспериментальный копатель имеет неоспоримое преимущества по сравнению с серийными, что подтверждает достоверность полученных в предыдущих разделах результатов. Повышенное содержание травмированных клубней экспериментального копателя объясняется потемнением поверхности клубней вследствие многократных воздействий в ограниченную зону.

Выводы. Разрушение почвенных частиц на просеивающих сепараторах картофелеуборочных машин подчинено закону малоцикловой усталостной прочности, заключающемуся в зарождении и развитии трещин в теле комка и описываемому логарифмически нормальным законом распределения. Этот случайный процесс вызывает как разрушение, так и

упрочнение комков. На интенсивность разрушения оказывает влияние не только величина, но и зона приложения внешних сил. Воздействия в ограниченную зону разрушают почвенный комок при меньшем числе циклов, чем при ударах в случайные точки.

На основе полученных выводов разработан и изготовлен вибрационный сепаратор с отражателем, обеспечивающим эффективное разрушение и удаление почвенных комков из картофельного вороха. Оптимальная работа сепаратора обеспечивается на частоте 40...42 Гц, амплитуде 2...2,5 мм, направленности колебаний 40...45° и угле наклона решета назад на 20...25°, при расстоянии от отражающего транспортёра до сепарирующей поверхности на входе 0,175 м и на выходе 0,125 м. Предложенная конструкция может быть использована в виде дополнительного сепарирующего устройства к традиционным прутковым элеваторам.

Литература

1. Бойко А.И. Перспективы совершенствования комкоразрушающих устройств картофелеуборочных машин / А.И. Бойко, С.Н. Борычев // Вестник Московского ГАУ. – 2006. - № 5(20). - С. 87. - 88.
2. Борычев С. Н. Новый способ определения повреждения клубней // Картофель и овощи. – 2004. – № 5. – С. 7-8.
3. Борычев, С.Н. Анализ комкоразрушающего устройства с активной поверхностью // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – № 9. – С. 35-37
4. Камалетдинов Р.Р. Использование теории информации при имитационном моделировании процесса сепарации картофельного вороха / Р.Р. Камалетдинов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006 – №11. – С. 8-10.
5. Камалетдинов, Р.Р. Рекомендации по совершенствованию рабочих органов картофелеуборочных машин. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – 44 с.
6. Полуночев И.М. Изучение физико-механических свойств ботвы и клубней картофеля / И.М. Полуночев // Труды ВИСХОМ. – 1951. – С. 17-19.
7. Митрофанов В.С. Изучение физико-механических свойств картофеля // Сб. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений как основание для проектирования сельскохозяйственных машин. - М.: ВИСХОМ, 1939. – С. 174-196.
8. Мацепуро В.М. Метод исследования повреждаемости клубней картофеля при механическом воздействии / В.М. Мацепуро, В.Н. Кирсанова // Тр. ВИМ. -1975. – Т. 69. - С. 174-185.
9. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. Пособие / В.Ф. Терентьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
10. Горицкий В.М. Структура и усталостное разрушение / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев — М.: Металлургия, 1980. — 280 с.
11. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика – М.: Высш.шк., 2003.– 479 с.
12. Аликин В. Н., Литвин И. Е., Сесюнин С. Г., Соколовский М. И., Ушин Н. В. Критерии прочности и надежность конструкций. М: Недра, 2005. – 164 с.

Сведения об авторах:

Камалетдинов Рим Рашитович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин, E-mail: ktr53@mail.ru
Рахимов Зиннур Саатович – доктор технических наук, профессор кафедры строительно-дорожных, комму-

нальных и сельскохозяйственных машин, mail: zinnurr@mail.ru.
 ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет, г.Уфа, Россия.
 Абдрахманов Ринат Кадирович – доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

**PECULIARITIES OF DESTRUCTION OF SOIL CLUMPS ON SURVEYING SEPARATORS
 OF POTATO CARRIER MACHINES**

Kamaletdinov R.R., Rakhimov Z.S., Abdrahmanov R.K.

Abstract. The article describes the process of destruction of soil lumps on sifting separators of potato harvesters, based on the theory of low-cycle fatigue strength, based on the position that the destruction occurs as a result of the presence of initial defects and consists in the nucleation and development of cracks present in the body. A probabilistic model of reducing to “pass-through” sizes of large soil particles is considered, considering not only their destructive, but also hardening effect of cyclic loads of sifting separators, as well as the effect of areas of load application to the lump on the intensity of the destruction process and the purity of the heap. The conclusion was obtained that it is possible to increase the efficiency of the process of destruction of soil particles when using vibration effects. A design is proposed and the optimal parameters of a vibration separator with a reflector are determined.

Key words: harvesting potatoes; destruction of soil clumps, low-cycle fatigue strength, vibration separator

References

1. Boyko A.I. Prospects for the improvement of potato commerce destructive devices. [Perspektivy sovershenstvovaniya komkorazrushayuschikh ustroystv kartofeleuborochnykh mashin]. / A.I. Boyko, S.N. Borychev // *Vestnik Moskovskogo GAU. – The Herald of Moscow State Agrarian University*. 2006. - №5(20). - P. 87. - 88.
2. Borychev S. N. A new method for determining damage to tubers. [Novyy sposob opredeleniya povrezhdeniya klubney]. // *Kartofel i ovoschi. - Potatoes and vegetables. - 2004. - №5. - P. 7-8.*
3. Borychev S.N. Analysis of the active surface lump device. [Analiz komkorazrushayuschego ustroystva s aktivnoy poverkhnostyu]. // *Traktory i selkhoz mashiny. - Tractors and agricultural machines*, 2006, -№9. – P. 35-37.
4. Kamaletdinov R.R. The use of information theory in the simulation of the separation process of potato heap. [Ispolzovanie teorii informatsii pri imitatsionnom modelirovani protsessa separatsii kartofelnogo vorokha]. / R.R. Kamaletdinov // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva. - Mechanization and electrification of agriculture. – 2006. – №11. – P. 8-10.*
5. Kamaletdinov R.R. *Rekomendatsii po sovershenstvovaniyu rabochikh organov kartofeleuborochnykh mashin*. [Recommendations for the improvement of the working units of potato harvesting machines]. – Ufa: Bashkirskiy GAU, 2014. – P. 44. 2th edition.
6. Polunochev I.M. Study of physical and mechanical properties of tops and tubers of potatoes. (Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv botvy i klubney kartofelya). / I.M. Polunochev // *Trudy VISKhOM. Proceedings of VISKhOM. – 1951. – P. 17-19*
7. Mitrofanov V.S. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv kartofelya // Sb. Fiziko-mekhanicheskie svoystva selskokhozyaystvennykh rasteniy kak osnovanie dlya proektirovaniya selskokhozyaystvennykh mashin.* (The study of physico-mechanical properties of potatoes. // Proceedings of Physical and mechanical properties of agricultural plants as the basis for the design of agricultural machinery). - M.: VISKhOM, 1939. – P. 174-196.
8. Matsepuro V.M. The method for studying the damage of potato tubers under mechanical action. [Metod issledovaniya povrezhdayemosti klubney kartofelya pri mekhanicheskom vozdeystvii]. / V.M. Matsepuro, V.N. Kirsanova // *Tr. VIM. – Proceedings of VIM. - 1975. Vol. 69. - P. 174-185.*
9. Terentev V.F. *Tsiklicheskaya prochnost metallicheskikh materialov: Ucheb. Posobie.* [Cyclic strength of metallic materials: Manual]. / V.F. Terentev. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2001. – P. 61.
10. Goritskiy V.M. *Struktura i ustalostnoe razrushenie.* [Structure and fatigue damage]. / V.M. Goritskiy, V.F. Terentev — M.: Metallurgiya, 1980. – P. 280.
11. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika.* [Probability theory and mathematical statistics]. - M., Vyssh.shk., 2003. – P. 479.
12. Alikin V. N., Litvin I. E., Sesyunin S. G., Sokolovskiy M. I., Ushin N. V. *Kriterii prochnosti i nadezhnost konstruktivnyy.* [Criteria of strength and reliability of structures]. M: Nedra, 2005. P. 164.

Authors:

Kamaletdinov Rim Rashitovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Road-Construction, communal and Agricultural machines, e-mail: krr53@mail.ru
 Rakhimov Zinnur Saetovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Road-Construction, communal and Agricultural machines, e-mail: zinnurr@mail.ru
 Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.
 Abdrahmanov Rinat Kadyrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor
 Kazan State Agrarian University, Kazan