

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ТОМАТОВ. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Елена Степанова

Южный филиал Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет»

Адрес: 95492 Симферополь, Аграрное, ЮФ НУБ и П Украины «КАТУ»

e-mail: ABC17101@yandex.ru

Аннотация. Известно, что в современной схеме производства и переработки томатов имеют место значительные потери в процессе уборки и послеуборочной обработке в результате механических повреждений в результате вибраций, деформаций или падений плодов с определенной высоты на поверхности уборочных и транспортных агрегатов, а также при взаимодействии с их рабочими элементами.

Ключевые слова: механические повреждения, транспортные агрегаты, поверхность рабочих органов, рабочие элементы.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время осуществлен ряд исследований по оценке механических свойств и восприимчивости к бою плодов различных видов овощей [1, 2, 3]. В связи с развитием технологий уборки и послеуборочной доработки томатов, актуальность в таких исследованиях не ослабевает.

Физико-механические параметры плодов томатов сильно зависят от внутреннего строения плодов и от геометрической локализации нагрузок.

ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Физико-механические параметры плодов томатов сильно зависят от внутреннего строения плодов и от геометрической локализации нагрузок. На рис. 1 изображена типичная линия «нагружения-разгрузки» в координатах «усилие-расстояние» для плодов томатов.

Линия AB – стадия нагружения, линия BC – стадия разгрузки. Площадь области петли ABC соответствует энергии деформации $E_p = E_s - E_e$ (мДж). E_s – энергия напряжения, связанная с работой сил препятствующих деформации плода томата – площадь под линией нагружения; энергия упругой деформации E_e – высвобождаемая энергия в процессе разгрузки – площадь области под кривой усилий разгрузки. Деформация D_p плода томата, соответствующая точке C – пластическая деформация; D_e – упругая деформация плода.

Таким образом, степень упругости – безразмерная величина:

$$r_c = \frac{D_e}{D_e - D_p} \quad - \quad \text{величина}$$

демпфирующих характеристик плода. Угловой коэффициент линии AB – отношение величины усилий к величине деформации вне зависимости от места приложения. Абсцисса точки B – это деформация D ($D = D_e - D_p$) при соответствующем сжатии, ордината – пик воздействий (максимальное значение величины усилий) F_{\max} (Н), полученных плодом томата.

Для исследования эффектов внутренней структуры на механические свойства и степень механической повреждаемости, были проведены многофакторные эксперименты. Факторы:

1) Два варианта камерности плодов (трехкамерность T и четырехкамерность F). Трехкамерные плоды показывали асимметричную внутреннюю структуру, которая наблюдается у плодов томатов с 3, 5 и 7 камерами; в то время как четырехкамерные – симметричную структуру, соответствующую 4, 6 и 8 камерным плодам.

2) Две позиции (по локализации нагрузки) на поверхности плода (нагрузка вдоль камер L и нагрузка вдоль перегородок CV). Пять типов сжатий (4, 8, 12, 16 и 20% по диаметру). Все сжатия локализуются в экваториальной зоне плода.

Тест «нагружение-разгрузка»

Данные по механическим, физическим параметрам

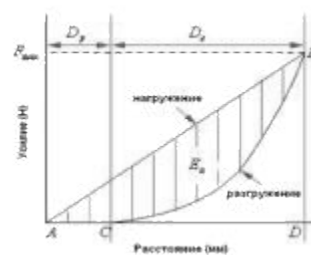


Рис. 1. Кривая нагружения-разгрузки
Fig. 1. Curve-loading/unloading

плодов и сроку хранения приводили к соответствующей оценке степени механической повреждаемости для плодов томатов.

В табл. 1 представлены результаты, полученные в испытаниях типа «нагружение-разгрузка» и результаты измерений физических параметров плодов томатов.

Таблица 1.
Table 1.

Механические и физические параметры	Сжатие ε (%)					
	0	4	8	12	16	20
E_p , мДж	0	7,21±1,97	42,16±15,41	101,17±35,99	209,09±59,38	368,73±128,9
F_{max} , Н	0	9,44±2,55	25,97±8,16	38,54±10,16	54,88±13,47	63,13±13,5
r_c		0,63±0,09	0,59±0,07	0,55±0,05	0,5±0,05	0,41±0,05
r_k		3,62±0,89	4,85±1,29	4,59±1,02	4,53±1,03	4,5±1,13
L_c , мм		64,40±4,65	65,56±6,47	67,27±5,98	65,83±4,32	67,13±5,91
φ		0,92±0,04	0,92±0,02	0,91±0,02	0,93±0,03	0,92±0,02
D_g , мм		61,30±3,77	62,88±4,98	63,04±5,52	62,47±3,88	63,62±4,79
D_a , мм		61,56±3,82	63,16±5,06	63,43±5,57	62,75±3,90	63,92±4,89

Данные представляют усредненные величины для всех групп томатов по типам сжатия. Были применены пять типов сжатия, записаны в пять столбцов таблицы соответственно по механическим и физическим параметрам, \pm среднее отклонение для всех томатов: $2 \times 2 \times 10$ по типу сжатия. Механические параметры показывают существенную разницу среди эффектов по типам сжатий относительно коэффициента вариации, как показано на рис.2

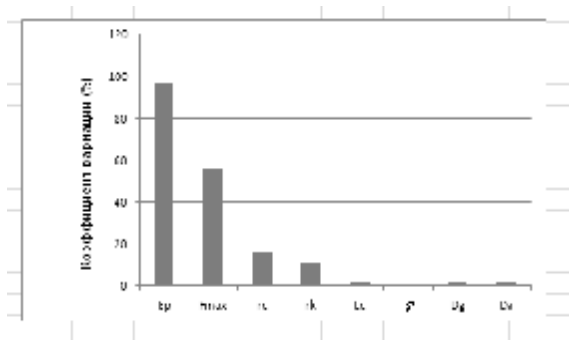


Рис. 2. Коэффициент вариации механических и физических параметров плодов томатов:

Fig. 2. Coefficient of variation of mechanical and physical properties of tomatoes:

$$V_{E_p} = 96,4; \quad V_{F_{max}} = 56,41; \quad V_{r_c} = 15,92; \\ V_{r_k} = 10,57; \quad V_{L_c} = 1,8; \quad V_{\varphi} = 0,77; \quad V_{D_g} = 1,38, \\ V_{D_a} = 1,42$$

Очевидно, энергия пластической деформации E_p , и пиковое усилие F_{max} , увеличиваются с увеличением сжатия, как показано в таблице 1. Это логично согласуется с результатами других исследователей [1, 2]. Однако, степень пластичности (эластичность) r_c снижается с возрастанием примененных сжатий и уклон кривой нагружения достигает наибольшего значения для сжатия 8 % и наименьшего значения при сжатии 4 %. В отличие от механических параметров, ни один из физических параметров не показывает серьезной разницы средних величин при всех типах нагружения (сжатия). Это иллюстрирует то, что плоды группировались достаточно сбалансированно и полученные данные по тесту «нагружение-разгружение» не были необъективными (тенденциозными). Потому отдельные характеристики плодов были ассоциированы с типом сжатия или типом группировки.

Влияние внутренней структуры томата на его механические свойства

Механические параметры (E_p, F_{max}, r_c, r_k) после теста «нагружение-разгружение» вдоль камеры (L) и вдоль перегородки (между камерами) (CW) томатов для пяти типов сжатий показаны на рис. 3.: $T \times CW; T \times L; F \times CW; F \times L$ – диаграммы и графики для трехкамерных томатов под нагрузкой вдоль перегородки, трехкамерный томат под нагрузкой вдоль камеры; четырехкамерный томат под нагрузкой вдоль перегородки и четырехкамерный томат под нагрузкой вдоль камеры, соответственно.

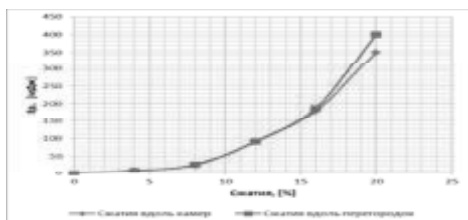


Рис. 3а. Трехкамерный томат, (E_p)
Fig. 3a. Three-chamber tomato

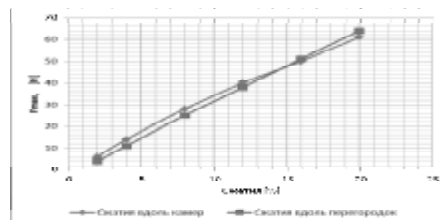


Рис. 3б. Трехкамерный томат (F_{max})
Fig. 3b. Three-chamber tomato

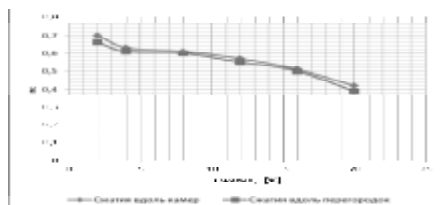


Рис. 3в. Трехкамерный томат, (r_c)
Fig. 3c. Three-chamber tomato

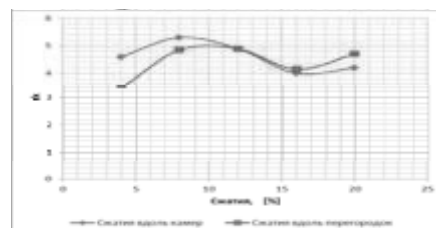


Рис. 3г. Трехкамерный томат, (r_k)
Fig. 3g. Three-chamber tomato

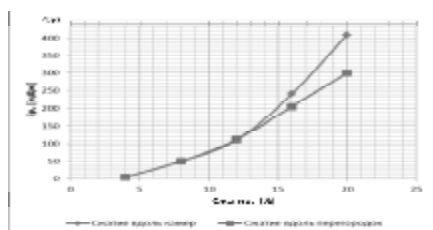


Рис. 3д. Четырехкамерный томат, (E_p)
Fig. 3d. Quad tomato

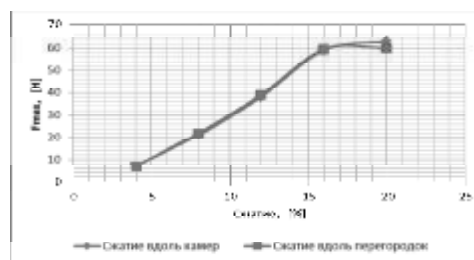


Рис. 3е. Четырехкамерный томат, (F_{max})
Fig. 3e. Quad tomato

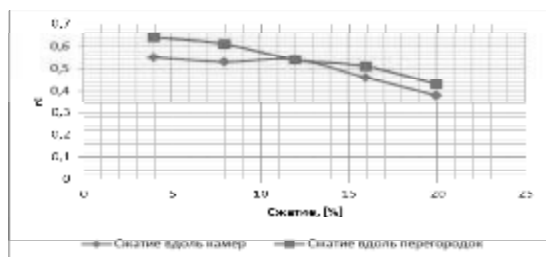


Рис. 3ж. Четырехкамерный томат, (r_c)
Fig. 3g. Quad tomato

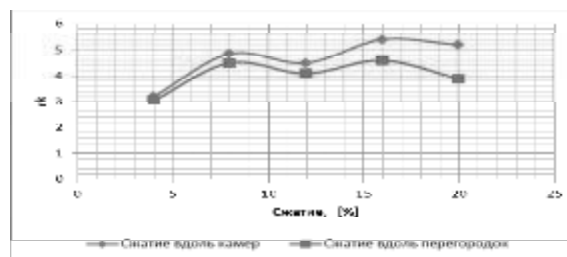


Рис. 3з. Четырехкамерный томат, (r_k)
Fig. 3h. Quad tomato

Трехкамерный томат

Корреляции между различными механическими параметрами трехкамерных томатов для пяти типов сжатия показаны на рис. 3а, 3б, 3в и 3г.

1. Энергия пластической деформации E_p (рис. 3а): когда сжатие меньше 16% место приложения нагрузки не играет существенной роли (не показывает существенных эффектов). Когда сжатие более 16%, изменения величин этих показателей в зависимости от места приложения нагрузки становится более заметным: разница значений показателей растет со степенью сжатия. Когда сжатие достигает 20%, энергия пластической деформации томатов с нагрузкой вдоль перегородки в ~1,15 раза больше, чем при сдавливании вдоль камеры.

2. Пиковое усилие F_{max} (рис. 3б) **и степень пластичности r_c** (рис. 3в). Очевидно, место приложения нагрузки не имеет существенного эффекта для пиковых усилий и степени пластичности для трехкамерных томатов. Усилие с пиковой нагрузкой при сдавливании вдоль камеры томата незначительно больше, чем при сдавливании вдоль перегородки при сжатиях менее 12%. Когда сжатие превысило 12%, пиковое усилие нагружения на камеру было несущественно меньше, чем на перегородку. Степень пластичности томатов приводит к тому, что сжатие вдоль камеры немного больше, чем сжатие вдоль перегородки по всем типам сжатий.

3. Угол наклона линии нагружения r_k (рис. 3д): Место приложения нагрузки имеет существенный эффект (влияние) по уклону линии нагружения для трехкамерных томатов. Когда сжатие меньше, чем 12%, угловой коэффициент линии нагружения в испытаниях томатов показывает значения при сжатии по камере больше, чем по перегородке. Когда сжатие больше, чем 12%, уклон линии нагружения при сдавливании по камере меньше, чем тот же параметр при сдавливании вдоль перегородки. При сжатии 4% уклон при нагружении по камере в 1,3 раза больше, чем тот же параметр при сдавливании по перегородке. В соответствии с результатами тестов, приведенными выше, место приложения нагрузки не имеет существенного эффекта по механическим параметрам (E_p , F_{max} и r_c) для трехкамерных томатов, когда сжатие не превышает 16%. Это происходит потому, что структура трехкамерных томатов центрально симметрична. Неважно, какое положение перегородок между двумя позициями нагрузок – механические свойства не будут существенно различными до того как внутренняя структура томата разрушится. Как бы ни было, расположение нагрузок имеет существенный эффект по отношению к уклону линии нагружения для

трехкамерных томатов, и причина может быть в соотношениях между данными по диаметрам [5].

Энергия пластического нагружения существенно зависит от места приложения нагрузок, когда сжатие превышало 16%; причина возможно в том, что внутренняя структура томатов начинает разрушаться постепенно.

Результаты статистической обработки после тестов показывают, что вероятность разрушения томата, нагруженного вдоль перегородки и вдоль камеры соответственно равны 0,83 и 0,67, когда сжатие было 16%. Обе вероятности равнялись 1,0 когда сжатие равнялось 20%.

Четырехкамерный томат

Корреляции между разными механическими параметрами четырехкамерного томата и пятью типами сжатий показаны на рис. 3д, 3е, 3ж и 3з.

1. Энергия пластического напряжения E_p (рис. 3д): Когда сжатие было меньше, чем 12%, расположение нагрузки не имело значительных эффектов по отношению к величине энергии пластического нагружения для четырехкамерного томата. Когда сжатие было больше 12%, место приложения нагрузки стало значимостью, и разница величины энергии пластического напряжения томатов для двух локализаций расположения нагрузки растет с ростом степени сжатия. Когда сжатие принимает значения 16% и 20%, соответственно, энергия пластической деформации томатов при нагружении вдоль перегородки соответственно в ~1,2 раза и в ~1,5 раз больше, чем при нагружении вдоль камер.

2. Пиковые усилия F_{max} (рис. 3е): Очевидно, место нагружения не имеет существенного эффекта по пиковым усилиям для четырехкамерных томатов. Пиковые усилия, приложенные к камерам томатов несущественно больше, чем приложенные вдоль перегородок для всех типов нагружения при сжатии менее 16%. Когда сжатие становится более 16% изменения пиковых нагрузок вдоль камер небольшие. Однако, усилия пиковых нагрузок на ткань камер продолжает расти.

3. Степень эластичности r_c (рис. 3ж): Место приложения нагрузок имеет существенный эффект по степени эластичности для четырехкамерных томатов. Степень эластичности томатов нагружаемых вдоль камер больше, чем нагруженных вдоль перегородок по всем типам нагружения. Максимальное отношение степени эластичности для двух позиций (вдоль перегородок и вдоль камер) достигает 1,15 : 1 при 4%. Это показывает, что способность упругого восстановления четырехкамерных томатов при нагрузке вдоль камер выше, чем при нагрузке вдоль перегородок.

4. Уклон кривой нагружения r_k (рис. 3з): Место нагружения имеет существенный эффект по уклону

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

кривой нагружения для четырехкамерных томатов. Уклон кривой нагружения в тесте томатов, нагруженных вдоль камер меньше, чем в тесте томатов нагруженных вдоль перегородок для всех типов сжатий. Максимальное отношение уклона кривой нагружения в двух позициях (вдоль камер и вдоль перегородок) достигает 1,35 : 1 при 20% сжатия. Это иллюстрирует, что если томат имеет ту же самую деформацию, усилие зажима плодов томатов вдоль перегородок должно быть больше чем вдоль камер.

В соответствии с приведенными выше результатами тестов, сжатие в 12% ключевая точка изменений для механических параметров четырехкамерных томатов. Причина в том, что четырехкамерные томаты начинают разрушаться, когда сжатие больше чем 12%. Рис. 3з показывает, что степень эластичности томатов внезапно падает, когда сжатие больше 12%; пластические деформации значительно усиливаются и пластическая энергия разрушения также растет с ростом сжатия. Статистическая обработка показывает, что вероятность того, что томат лопнет для сжатий вдоль перегородок и вдоль камер равна 0,33 и 0,17, соответственно, когда сжатие равно 12%; 0,50 и 0,33 соответственно, для сжатий 16%; 1,00 и 0,83 соответственно, для сжатий 20%. Таким образом, дальнейшие результаты показали правильность выше сформулированных предположений.

В экспериментах получены основные размеры плодов томатов, такие как продольная высота H , диаметр L_c (расстояние между верхней точкой контакта и нижней точкой контакта в несжатом состоянии), максимальный поперечный диаметр L_{max} , минимальный поперечный диаметр L_{min} . Затем, по формулам вычислены: средний геометрический диаметр $D_g = (HL_{max}L_{min})^{\frac{1}{3}}$, шарообразность (сферичность) $\varphi = \frac{(HL_{max}L_{min})^{\frac{1}{3}}}{H}$ и средний арифметический диаметр $D_a = \frac{H + L_{max} + L_{min}}{3}$.

Для оценки механической повреждаемости, деформированные после опытов плоды томатов, были классифицированы по двум группам: сильно деформированные с треснутой кожурой и с незначительной деформацией без повреждения

кожуры. Степень деформации определена по формуле: $\varepsilon = \frac{L_c - L}{L_c} \times 100\%$, где L – функция

диаметра плода в течение процесса сжатия. Деформации фиксировались в стадиях 0, 4, 8, 12, 16 и 20%. Степень механических повреждений η

определяется по формуле: $\eta = \frac{t - t_1}{t} \times 100\%$, где t_1

– время сохраняемости плода томата при деформации ε .

Степень механических повреждений плодов томатов находится под влиянием нескольких факторов, которые могут быть описаны как качественные переменные: число камер, локализация нагрузки; и количественными переменными: деформация и физические параметры плода. В качестве метода анализа принят ковариационный анализ (ANCOVA), который является составляющей дисперсионного анализа (ANOVA) и регрессией непрерывных переменных [4].

Неуправляемые количественные переменные рассматриваются как независимые переменные, а влияние качественных переменных на зависимую переменную анализируется, когда воздействие независимых переменных исключено. Соотношение:

$$Z_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^m \beta_{1k} x_{ik} + \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^m \beta_{1kp} x_{ik} x_{ip} + \sum_{j=1}^n \beta_{2j} y_{ij} + e_i$$

– это ANCOVA-модель. Здесь Z_i – зависимая переменная, определяющая степень механических повреждений плодов в i – ой группе; группы были определены по количеству камер, типу опыта и месту приложения усилий; независимые переменные x_{ik} и y_{ij} являются качественными и количественными переменными соответственно; m и n – число факторов и независимых переменных, соответственно; β_0 – свободный член ANCOVA-модели; β_{1k} и β_{2j} – относятся к k – му фактору и j – ой независимой переменной, соответственно; β_{1kp} – аналогичным образом относится к взаимодействию между k – м и p – м факторами; e – случайная ошибка.

Факторы, оказывающие влияние на степень механической повреждаемости томатов, включают параметры внутренней структуры, такие как: камерность и место приложения усилий сжатия; механические параметры, такие как: ε , E_p , F_{max} и r_c , и физические параметры, такие как L_c , D_g , φ , D_a .

Таблица 2. Коэффициенты модели степени повреждаемости томатов
Table 2. Model coefficients extent of damage to tomatoes

Объясняющие (X)	Оценка коэффициентов (β)	Стандартная ошибка	t – статистика
1	2	3	4
Свободный член модели	-0,1087	0,0515	-2,11
Сжимаемость ϵ	3,6375	0,3125	11,64
Положение CW	0,213	0,05	4,26
Положение L	0		
Структура \times Положение T \times CW	-0,1634	0,05	-3,27
Структура \times Положение F \times CW	0		
Структура \times Положение T \times L	0,0488	0,05	0,98
Структура \times Положение F \times L	0		

В этой модели коэффициент: $R^2 = 0,91$ (91% данных, гарантировано, объясняется моделью). Диаграмма рассеивания остатков (рис. 4), показывает, что распределение остатков не является регулярным и гипотеза гомоскедастичности ошибок e верна.

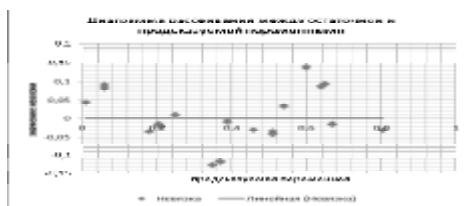


Рис. 4. Тестирование гипотез
Fig. 4. Hypothesis testing

Все статистические результаты получены с применением системы статистического анализа

(SAS) программного обеспечения Version 9.1.3 (SAS Inc., Cary, NC, USA).

ВЫВОДЫ

Получена эмпирическая модель, описывающая процессы деформации плодов томатов, в результате ударно-пластического взаимодействия с поверхностями различной конфигурации. Модельное уравнение предусматривает учет качественных признаков.

ЛИТЕРАТУРА

- Berardinelli A.; Donati V., Giunchi A., Guarnieri A., Ragni L., 2005. Damage to pears caused by simulated transport. J. Food Engin. – № 66, 219 - 226.
- Olorunda A.O., Tung M.A., 1985. Simulated transit studies on tomatoes: Effects of compressive load, container vibration and maturity on mechanical damage. J. Food Tech. – № 20, 669-678.
- Singh A., Singh Y., 1992. Effect of vibration during transportation on the quality of tomatoes. J. Agric. Mech. Asia, Africa and Latin America. – № 23, 70-72.
- Брандт З., 2003. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров [Текст]: Пер. с англ. – М.: Мир. – 686.
- Lu R., Srivastava A.K., Beaudry R.M., 2005. A new bioyield tester for measuring apple fruit firmness. Appl. Eng. Agric. V. 21(5), 893 - 900.
- Saliev E., Nikolenko I., 2012. The feasibility report on maintainability of the water and sewage system// MOTROL – Vol.14, №5, 119 – 124.
- Шебанин В. С., Богза В.Г., Богданов С.И., 2012. Расчет вероятности отказов конструктивного элемента сборно-разборных легких металлических конструкций // MOTROL. - Vol. 14, №2, 164 - 167.
- Куликов Г., Казьмина А., Кондратьева Н., 2012. Задачи, определяющие характер реконструкции жилища // MOTROL. – Vol 14-№1, 137-139.

RESEARCH OF PHYSICAL PARAMETERS AND MECHANICAL CHRASHING OF TOMATOES. STATISTICAL MODEL

Summary. It is known that in the modern chart of production and processing of tomatoes considerable losses take place in the process of cleaning up and to послеуборочной treatment as a result of mechanical damages as a result of vibrations, deformations or falling of garden-stuffs from a certain height to the surfaces of harvest and transport aggregates, and also at co-operating with their working elements.

Key words: mechanical damages, conveyer aggregates, surface of working organs, working elements.