

УДК 634.1

UDC 634.1

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1 Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ АВТОМОБИЛЯ НА ПОВРЕЖДЕНИЕ ПЛОДОВООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ**

### **INFLUENCE OF VEHICLE VIBRATION PARAMETERS ON DAMAGE TO FRUITS AND VEGETABLES**

Антоненко Максим Владимирович  
аспирант  
РИНЦ SPIN-код: 4032-5080  
[m.antonenko.pgs@yandex.ru](mailto:m.antonenko.pgs@yandex.ru)

Antonenko Maxim Vladimirovich  
graduate student  
RSCI SPIN-code: 4032-5080  
[m.antonenko.pgs@yandex.ru](mailto:m.antonenko.pgs@yandex.ru)

Успенский Иван Алексеевич  
д.т.н., профессор  
РИНЦ SPIN-код: 1831-7116  
*ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», Рязань, Россия*

Uspensky Ivan Alekseevich  
Doctor of Technical Sciences, associate Professor  
RSCI SPIN-code: 1831-7116  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev", Ryazan, Russia*

Сивиркина Анна Сергеевна  
к.т.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код: 7066-0540  
*ФГАОУ ВО Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия*

Sivirkina Anna Sergeevna  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 7066-0540  
*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia,*

Лимаренко Николай Владимирович  
д.т.н., профессор  
РИНЦ SPIN-код: 7266-9678  
*ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Limarenko Nikolay Vladimirovich  
Doctor of Technical Sciences, associate Professor  
RSCI SPIN-code: 7266-9678  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

В данной статье приведены результаты исследований, проведенных на экспериментальной установке, разработанной для имитации колебаний автомобиля при движении с грузом, перевозимого в контейнерах. Проведено исследование зависимости массы повреждения плодоовощной продукции от частоты вращения двигателя, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента. Известно, что скорость колебаний транспортного средства (ТС) зависит от горизонтальных, вертикальных и поперечных колебаний. В процессе эксперимента оценены различные варианты перевозки грузов в контейнерах от места сбора к складским помещениям. С использованием теории планирования эксперимента рассмотрено влияния частоты и амплитуды колебаний транспортного средства на повреждение. С учетом результатов

The article presents the results of studies conducted on an experimental setup designed to simulate the vibrations of a car when driving with cargo transported in containers. A study was carried out of the dependence of the mass of damage to fruits and vegetables on the engine speed, the amplitude of vibrations and the time of the experiment. It is known that the vibration speed of a vehicle (V) depends on horizontal, vertical and transverse vibrations. During the experiment, various options for transporting goods in containers from the collection point to the warehouse were assessed. Using the theory of experimental planning, the influence of the frequency and amplitude of vehicle vibrations on damage is considered. Taking into account the research results, it was determined that the nature of the influence of the above factors is the same, therefore their increase leads to an increase in the damageability of fruits and vegetables

исследований, определено, что характер влияния вышеуказанных факторов одинаков, поэтому их увеличение приводит к повышению повреждаемости плодоовощной продукции

Ключевые слова: ПЛОДООВОЩНАЯ ПРОДУКЦИЯ, ВИБРАЦИЯ, ПЛАВНОСТЬ ХОДА АВТОМОБИЛЯ, АМПЛИТУДА, ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ

Keywords: FRUITS AND VEGETABLES, VIBRATION, VEHICLE SMOOTHNESS, AMPLITUDE, VIBRATION FREQUENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-198-001>

**Введение.** Как известно, при транспортировке в результате статических и динамических нагрузок, воздействия давления, испытываемого нижними слоями груза от верхних, происходит повреждение плодоовощной продукции, проявляемое в виде трещин, проколов и т.п. (рисунок 1) [1, 2].



а - ушибы, вмятины; б - ушиб с побурением более 2,5 см; в – проколы.

Рисунок 1 – Механические повреждения на плодах

Плавность хода автомобиля, определяемая такими параметрами, как амплитуда и частота колебаний, также влияет на уровень повреждения груза. При перемещении в сложных дорожных условиях при повышенном скоростном режиме речь о плавности хода автомобиля не идет, при этом встает вопрос о способах, которые помогут уберечь плодоовощную продукцию от повреждений, а транспортное средство (ТС) от поломок [1,2,3]. Исследованиями установлено, что скорость колебаний транспортного средства (ТС) зависит от горизонтальных, вертикальных и поперечных колебаний.

При воздействии на контейнер, с находящимся в нем грузом,

<http://ej.kubagro.ru/2024/04/pdf/01.pdf>

вертикальных колебаниях, можно сказать, что плоды, расположенные в нижнем ряду, будут испытывать максимальное давление, а сам контейнер получит максимальное ускорение, направленное вверх. При значительных ускорениях колебаний плодов возможно появление силы инерции, превышающей вес плодов. При этом, если направление сил инерции и силы тяжести не будут совпадать, то через какой-то промежуток времени возможен отрыв плодов с последующим перемещением. В результате происходит столкновение плодов, сжатие, приводящие к потере целостности оболочки плодов.

**Цель исследований.** Исследование воздействий амплитуды, частоты колебаний и скорости движения транспортные средства на повреждение плодов.

**Материалы и методы исследований.** Рассмотрим случайные колебания автомобиля, перевозящего плодоовощную продукцию, во время движения к месту хранения с указанной скоростью, испытывая при этом колебательные движения определенной частоты и амплитуды. При проведении исследований на экспериментальной установке в РГАТУ были получены зависимости массы повреждений плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента. В таблице 1 представлены результаты эксперимента, а на рисунке 1 зависимость массы повреждения плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,0 ГЦ, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента.

Таблица 1 – Зависимость массы повреждения плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,0 ГЦ, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента

Время проведения эксперимента	Амплитуда колебания			
	5мм	15мм	25мм	35мм
1	2	3	4	5
10 мин	0,021	0,015	0,004	0,029
20 мин	0,032	0,025	0,038	0,038
30 мин	0,024	0,001	0,046	0,044
40 мин	0,034	0,032	0,042	0,048
50 мин	0,035	0,035	0,035	0,052

В таблице 2 представлены результаты эксперимента, а на рисунке 2 зависимость массы повреждения плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,4 Гц, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента.

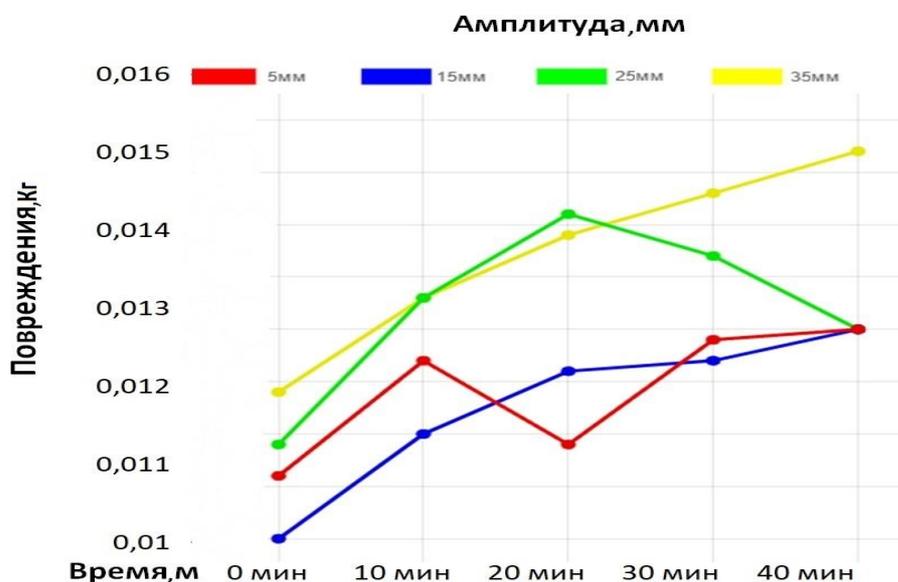


Рисунок 1 - Зависимость массы повреждений плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,0 Гц, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента

Как видно из графической зависимости, представленной на рисунке 1 при частоте вращения двигателя 2,0 Гц, процент повреждения наиболее возрастает при амплитуде 35мм после 10-минутного проведения эксперимента, при амплитуде 25мм - после 20-минутного проведения эксперимента, при амплитуде 5 – 15мм процент повреждений значительно

меньше. Процент повреждения носит линейный характер.

Таблица 2 – Зависимость массы повреждения плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,4 ГЦ, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента

Время проведения эксперимента	Амплитуда колебания			
	5мм	15мм	25мм	35мм
1	2	3	4	5
10 мин	0,016	0,032	0,025	0,021
20 мин	0,027	0,047	0,022	0,032
30 мин	0,018	0,046	0,038	0,024
40 мин	0,026	0,053	0,031	0,034
50 мин	0,035	0,045	0,027	0,035

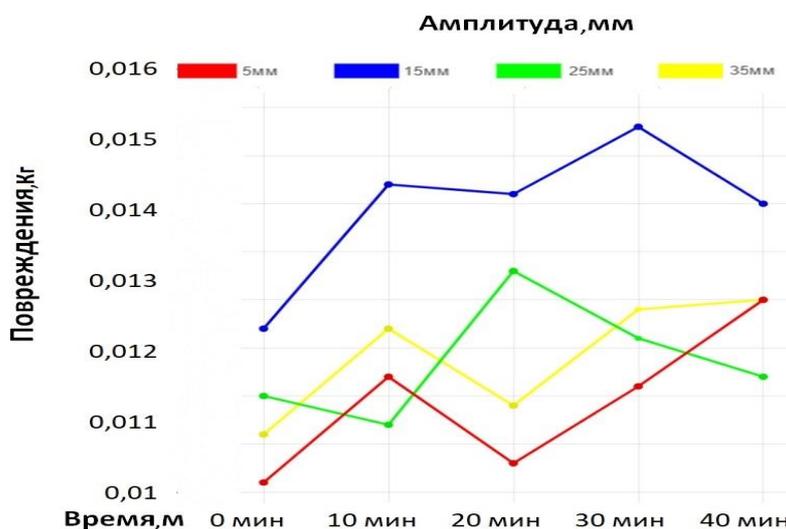


Рисунок 2 - Зависимость массы повреждений плодоовощной продукции (г) от частоты вращения двигателя 2,4 ГЦ, амплитуды колебаний и времени проведения эксперимента

Как видно из графической зависимости, представленной на рисунке 2 при частоте вращения двигателя 2,4 Гц, процент повреждения наиболее возрастает при амплитуде 15мм после 20 минутного проведения эксперимента, при амплитуде 25 – 35мм процент повреждений меньше. Процент повреждения носит, в основном, линейный характер.

Определим воздействие вышеперечисленных факторов на повреждение груза (на примере яблок) с использованием теории планирования эксперимента.

При проведении исследования будем использовать математическую модель, связывающую параметр оптимизации с факторами:

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_k), \tag{2}$$

где  $f(x_i)$  - функция отклика.

Аналитическую функцию в окрестности любой точки можно представить как степенной ряд. Поэтому, когда это возможно, мы будем искать модель в виде полиномов:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots \tag{3}$$

Учитывая то, что в эксперименте нелинейность наблюдается незначительно, в качестве регрессионного принимаем уравнение:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1 x_2 x_3, \tag{4}$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  и  $b_7$  – неизвестные коэффициенты регрессионного уравнения;

$x_1, x_2$  и  $x_3$  – факторы варьирования;

$x_1$  – скорость, км/ч;  $x_2$  – частота колебаний, Гц;  $x_3$  – амплитуда, мм;

$y_{ср}$  – повреждение сельскохозяйственной продукции (на примере яблок).

В таблице 3 представлены факторы матрицы планирования эксперимента и отклики  $y_1, y_2$  и  $y_{ср}$ .

Таблица 3 - Матрица планирования эксперимента

№ п/п	Матрица планирования	Отклики
-------	----------------------	---------

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_{cp}$
1	-1	-1	-1	3,9	5,5	4,7
2	+1	-1	-1	7,5	9,9	8,7
3	-1	+1	-1	11,2	9,4	10,3
4	+1	+1	-1	2,8	4,6	3,7
5	-1	-1	+1	9,8	11,4	10,6
6	+1	-1	+1	10,2	9,8	10
7	-1	+1	+1	12,3	11,8	12,05
8	+1	+1	+1	14,8	13,2	14

При выполнении дальнейших вычислений, проверим однородность результатов экспериментов по критерию «Кохрена» с использованием формулы:

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_j^u - y_{jcp})^2, \quad (5)$$

где  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $m = 2$ ,  $u = 1, 2$ .

Подставив данные в формулу (5) вычислим дисперсии для первого эксперимента:

$$S_1^2 = (y_1^1 - y_{1cp})^2 + (y_1^2 - y_{1cp})^2 = (3,9 - 4,7)^2 + (5,5 - 4,7)^2 = 1,28.$$

Аналогично, проверим однородность всех последующих экспериментов с использованием формулы (5).

В дальнейшем, определим сумму дисперсии  $\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 10,165$  и вычислим значение критерия Кохрена по формуле:

$$G_{\text{эксп}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{j=1}^8 S_j^2} = \frac{2,88}{10,165} = 0,28. \quad (6)$$

Для продолжения вычислений определим степени и для полученного по таблице уровня значимости  $q=0,05$  определяем:  $G_{\text{кр}} = 0,68$ .

Так как условие  $G_{\text{эксп}} = 0,24 < G_{\text{кр}} = 0,680$ , выполняется, следовательно, гипотеза об однородности дисперсии не отвергается. В таблицу 4 занесем данные по факторам матрицы планирования, векторам взаимодействия и откликам

Таблица 4 - Матрица планирования эксперимента

№ п/п	Матрица планирования			Векторы взаимодействия				Отклик
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_{cp}$
1	-1	-1	-1	+	+	+	-	4,7
2	+1	-1	-1	-	-	+	+	8,7
3	-1	+1	-1	-	+	-	+	10,3
4	+1	+1	-1	+	-	-	-	3,7
5	-1	-1	+1	+	-	-	+	10,6
6	+1	-1	+1	-	+	-	-	10
7	-1	+1	+1	-	-	+	-	12,05
8	+1	+1	+1	+	+	+	+	14

Вычислим коэффициенты уравнения регрессии для всех опытов. Выполнив необходимые вычисления, получим коэффициенты:

$$b_0 = 9,26; b_1 = -0,16; b_2 = 0,76; b_3 = 2,41; b_{12} = -1,01; b_{13} = 0,49; b_{23} = 0,61; b_{123} = 0,64.$$

Для проверки значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии вычислим дисперсию воспроизводимости по формуле:

$$S_{\text{ВОСПР}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^8 S_j^2 = \frac{1}{8} \cdot 10,165 = 1,27. \quad (7)$$

Далее, определим по формуле дисперсию ошибки коэффициентов регрессии:

$$S_{bi}^2 = \frac{1}{N \cdot m} \cdot S_{\text{ВОСПР}}^2 = \frac{1}{8 \cdot 2} \cdot 1,27 = 0,079. \quad (8)$$

$$S_{bi} = \sqrt{0,079} = 0,28.$$

Выполняем определенные вычисления и подсчитываем доверительный интервал:  $\Delta t_i = \pm t_{кр} \cdot S_{bi} = \pm 2,31 \cdot 0,28 = \pm 0,65$

Согласно теории, коэффициент уравнения регрессии считается значимым, если его абсолютное значение превышает доверительный интервал. При рассмотрении полученных результатов, можно увидеть, что среди вычисленных коэффициентов, только коэффициенты  $b_1$ ,  $b_{12}$  и  $b_{13}$  не удовлетворяет этому условию. Значит, число значимых коэффициентов регрессии,  $l$ , равно 5.

Таким образом, получим уравнение регрессии:

$$y = 9,26 + 0,76x_2 + 2,41x_3 + 1,01x_2x_3 + 1,64x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Для проверки адекватности модели (уравнения регрессии) вычислим значение отклика для каждого эксперимента:

$$y_1 = 9,26 + 0,76(-) + 2,41(-) + 1,01(+) + 1,64(-) = 3,44.$$

Аналогично, вычислим значения и откликов остальных опытов. Полученные значения занесем в таблицу 5.

Таблица 5 - Расчет дисперсии адекватности

	$y_{cp}$	$y^*$	$y_{cp} - y^*$	$(y_{cp} - y^*)^2$
1	4,7	3,44	1,25625	1,5782
2	8,7	8,74	-0,04375	0,0019
3	10,3	10,26	0,04375	0,0019
4	3,7	,96	-1,25625	1,5782
5	10,6	11,54	-0,94375	0,8907
6	10	10,2	-0,26875	0,0722
7	12,05	11,78	0,26875	0,0722
8	14	13,06	0,94375	0,8907
			сумма	5,0859

Так как число значимых коэффициентов регрессии  $l=5$ , то, получим:

$$S_{АД}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{j=1}^N (y_{cp} - y^*)^2 = \frac{2}{8-5} \cdot 5,859 = 3,39.$$

В результате вычислений, получим дисперсионное отношение:

$$F = \frac{S_{АД}^2}{S_{ВОСПР}^2} = \frac{3,39}{1,27} = 2,67, \text{ а также, определив необходимые показатели,}$$

получим  $F_{KP} = 4,1$ .

Так как полученное условие  $F < F_{KP}$  ( $2,67 < 4,1$ ) выполняется, то можно подтвердить, что модель адекватна, следовательно, уравнение регрессии составлено верно.

**Результаты исследований.** В полученном уравнении регрессии:

$$y = 9,26 + 0,76x_2 + 2,41x_3 - 1,01x_1x_2 + 1,64x_1x_2x_3$$

характер влияния основных параметров одинаков, так как факторы входят в уравнение со знаком «+», поэтому увеличение значения факторов приводит

к росту результирующего значения функции  $y$ , то есть при увеличении частоты колебаний – фактор  $x_2$ , и амплитуды – фактор  $x_3$ , увеличивается и повреждаемость.

Для получения графического представления наших данных построим поверхность линейной части нашего уравнения  $y = 9,26 + 0,76x_2 + 2,41x_3$  (таблица 6)

Таблица 6 – Представление линейной поверхности

$x_2, x_3$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	11,865	12,565	13,265	13,965	14,665	15,365	16,065	16,765	17,465
1	13,07	13,77	14,47	15,17	15,87	16,57	17,27	17,97	18,67
1,5	14,275	14,975	15,675	16,375	17,075	17,775	18,475	19,175	19,875
2	15,48	16,18	16,88	17,58	18,28	18,98	19,68	20,38	21,08
2,5	16,685	17,385	18,085	18,785	19,485	20,185	20,885	21,585	22,285
3	17,89	18,59	19,29	19,99	20,69	21,39	22,09	22,79	23,49
3,5	19,095	19,795	20,495	21,195	21,895	22,595	23,295	23,995	24,695

На графике, представленном на рисунке 2, рассмотрена зависимость повреждения плодовоощной продукции ( $y$ ) от частоты колебаний, Гц, (фактор  $x_2$ ) и от амплитуды колебаний (фактор  $x_3$ ), мм.

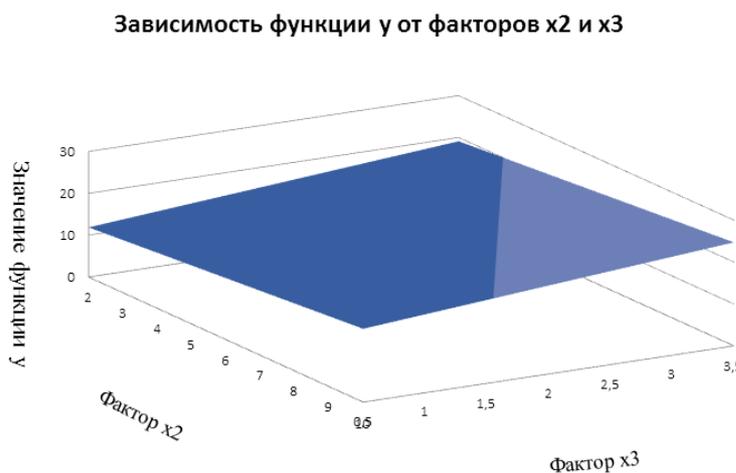


Рисунок 2 – Зависимость повреждения плодовоощной продукции от частоты колебаний, (фактор  $X_2$ ) и от амплитуде колебаний (фактор  $X_3$ )

Итак, характер влияния всех параметров одинаков, так как все факторы

входят в уравнение со знаком «+», поэтому увеличение значения факторов приводит к росту результирующего значения функции  $y$ , то есть при увеличении частоты колебаний, Гц, (фактор  $X_2$ ) и от амплитуды колебаний (фактор  $X_3$ ), мм, увеличивается и повреждаемость продукции.

**Выводы.** С учетом результатов исследований, определено, что характер влияния основных параметров одинаков, так как факторы входят в уравнение со знаком «+», поэтому увеличение их значения приводит к росту результирующего значения функции  $y$ , то есть при увеличении частоты колебаний (фактор  $X_2$ ), и амплитуды (фактор  $X_3$ ), особенно, увеличивается и повреждаемость плодоовощной продукции.

### Библиографический список

1. Белю Л.П., Сохранность плодов на внутривозвездных перевозках / Симдянкин А.А., И.А. Успенский, Л.П. Белю, И.А. Юхин, О.В. Филюшин // Известия Нижневолжского агро-университетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. - 2020. - №2 С.346 – 356
2. Успенский, И.А. Исследование алгоритма динамического расчета для уменьшения факторов, усиливающих колебательные движения автомобилей, приводящие к порче перевозимой плодоовощной продукции / И.А. Успенский, М.В. Антоненко, Н.В. Лимаренко и др.] // Известия НВ АУК. 2022. № 3(67). С. 487-497.
3. Успенский, И.А. Перспективы исследования колебательных движений автомобиля, влияющих на сохранность плодоовощной продукции, перевозимой в контейнерах / И.А. Успенский, М.В. Антоненко, Н.В. Лимаренко и др.] // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2023. – № 3. – С. 154-163. DOI: 10.36508/RSATU.2023.20.11.002
4. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебник и практикум для вузов / Н. И. Сидняев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023.

### Bibliography

1. Belyu L.P., Sokhrannost' plodov na vnutrikhozyaystvennykh perevozkakh / Simdyankin A.A., I.A. Uspenskiy, L.P. Belyu, I.A. Yukhin, O.V. Filyushin // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agro-universitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye. - 2020. - №2 S.346 – 356
2. Uspenskiy, I.A. Issledovaniye algoritma dinamicheskogo rascheta dlya umen'sheniya faktorov, usilivayushchikh kolebatel'nyye dvizheniya avtomobiley, privodyashchiye k porche perevozimoy plodoovoshchnoy produktsii / I.A. Uspenskiy, M.V. Antonenko, N.V. Limarenko i dr.] // Izvestiya NV AUK. 2022. № 3(67). S. 487-497
3. Uspenskiy, I.A. Perspektivy issledovaniya kolebatel'nykh dvizheniy avtomobilya, vliyayushchikh na sokhrannost' plodoovoshchnoy produktsii, perevozimoy v konteynerakh / I.A. Uspenskiy, M.V. Antonenko, N.V. Limarenko i dr.] // Vestnik Ryazanskogo

agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – Ryazan'. – 2023. – № 3. – S. 154-163.DOI: 10.36508/RSATU.2023.20.11.002

4. Sidnyayev, N. I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh : uchebnik i praktikum dlya vuzov / N. I. Sidnyayev. — 2-ye izd., pererab. i dop. — Moskva : Izdatel'stvo Yurayt, 2024. — 495 s. — (Vyssheye obrazovaniye). — ISBN 978-5-534-05070-7. — Tekst : elektronnyy // Obrazovatel'naya platforma Yurayt [sayt]. — URL: <https://urait.ru/bcode/535457> (data obrashcheniya: 06.03.2024)