


original article | UDC 631.362.3 | doi: 10.31210/visnyk2021.02.35

**THEORETICAL AND PROBABILITY APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE LEVEL OF GRAIN DAMAGE DURING TRANSPORTATION**

O. M. Ivanov\*

 ORCID  [0000-0002-1761-9913](https://orcid.org/0000-0002-1761-9913)

K. V. Simonov

 ORCID  [0000-0001-8985-5803](https://orcid.org/0000-0001-8985-5803)

Poltava State Agrarian Academy, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

\*Corresponding author

 E-mail: [oleegivanov@yahoo.com](mailto:oleegivanov@yahoo.com)

## How to Cite

 Ivanov, O. M., & Simonov, K. V. (2021). *Theoretical and probability approach to the assessment of the level of grain damage during transportation. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (2), 266–272. doi: 10.31210/visnyk2021.02.35

Grain is a key food resource that shapes the food security of the state and is a valuable raw material for manufacturing a large number of food products. In addition, grain is a profitable commodity for sale in domestic and foreign markets with high economic benefits. Due to the limited area for crops cultivation and the growing demand for grain, there is a need to increase the level of grain yields. The key guarantee of obtaining a significant gross grain harvest is the use of high quality seed material. Leading breeders and scientists have found that 50 % of received high yields depend on seed quality. Seed quality depends not only on the programmed grain genetic potential, but the integrity of the grain structure with no mechanical damage is equally important. Thus, according to practical studies, the use of a single scraper conveyor to move grain can cause almost 10 % in the grain flow. Since the number of elevating machines on one production line can range from one to tens, the amount of damaged grain is quite large. The aim of the work was to provide the method for assessing the level of grain damage by elevating machinery, taking into account the geometric and kinematic parameters of their working bodies. Grain damage occurs as a result of several processes: impact collision of grain with the surfaces of the working bodies, due to friction of grain with each other and with the contact surface of the working bodies. In this case, the quantitative assessment of the level of grain damage for the selected processes can be considered using theory of probability. The essence of this description is to determine the general probability of preserving the integrity of the grain, taking into account the factors of influence. The general probability is determined by the product of the probability of no grain damage  $P_P$  as a result of grain friction on the contact work surface, the probability  $P_V$  of grain preservation due to impact interaction with the elements of the working bodies and the probability  $P_t$  of no damage to the grain. Each separately determined probability is defined as an exponential function with a degree, which is formed through the kinematic and structural working bodies of elevating machinery. On the basis of the formed theoretical and probabilistic dependencies it is possible to outline the probable level of grain damage during transportation and implement various types of constructive modernization and improvement of working bodies' parameters of elevating machinery.

**Key words:** grain, damage, theory of probability, event, elevating machinery, working bodies, speed, impact.

**ТЕОРЕТИЧНО-ІМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ РІВНЯ ТРАВМУВАННЯ ЗЕРНА ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ****О. М. Іванов, К. В. Сімонов**

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

*Зерно є найважливішим продовольчим ресурсом, що формує продовольчу безпеку держави та є цінною сировиною для виробництва великої кількості харчових продуктів. Крім того, зерно є доволі рентабельним товаром для реалізації на внутрішньому та зовнішніх ринках з отриманням високої економічної вигоди. Через обмеженість площ для посівів та зростаючий попит на зерно виникає потреба у збільшенні рівня урожайності зернових. При цьому запорукою отримання значного валового збору зерна є використання високоякісного посівного матеріалу. Провідні селекціонери та науковці з'ясували, що на 50 % отримання високого врожаю залежить від якості насіння. Якість насіння залежить не тільки від запрограмованого генетичного потенціалу зерна, але не менше значення має цілісність структури зерна з відсутністю механічних пошкоджень. Травмування зернової маси відбувається за рахунок механічного впливу на неї сторони робочими органами технологічного обладнання, зокрема підйомно-транспортних засобів, що використовується для післязбиральної обробки та переробки зерна. Так, згідно з практичними дослідженнями використання одного скребкового транспортеру для переміщення зерна може спричиняти до появи у зерновому потоці майже 10 %. Зважаючи на той факт, що кількість підйомно-транспортних засобів в одній технологічній лінії може сягати від одиниць до десятків, то об'єм травмованого зерна є доволі великим. Мета роботи – надати методичку оцінки рівня травмованості зерна підйомно-транспортними засобами з урахуванням геометричних та кінематичних параметрів їх робочих органів. Травмування зерна відбувається за рахунок протікання кількох процесів: ударне зіткнення зерна поверхнями робочих органів, за рахунок тертя зерна між собою та з контактною поверхнею робочих органів. При цьому кількісна оцінка рівня травмованості зерна для виділених процесів може бути розглянута із застосуванням теорії імовірності. Суть цього опису зводиться до визначення загальної імовірності збереженості цілісності зерна з урахуванням факторів впливу. Загальна імовірність визначається через добуток імовірності відсутності травмування зерна  $P_p$  внаслідок тертя зерна о контактну робочу поверхню, імовірності  $P_v$  збереженості зерна внаслідок ударної взаємодії з елементами робочих органів та імовірності  $P_l$  відсутності травмування зерна при його переміщенні на відстань  $l$ . Кожна окремо визначена імовірність визначається як експоненціальна функція зі ступеню, яка формується через кінематичні та конструктивні робочі органи підйомно-транспортних засобів. На підставі сформуованих теоретично-імовірнісних залежностей можна прогнозовано окреслювати можливий рівень травмування зерна при транспортуванні та реалізовувати різноманітні конструктивні модернізації та покращення параметрів робочих органів підйомно-транспортних засобів.*

**Ключові слова:** зерно, травмування, теорія імовірності, подія, підйомно-транспортні засоби, робочі органи, швидкість, удар.

**Вступ**

Запорукою державної безпеки країни є організація та підтримання на високому рівні забезпечення населення якісними продуктами харчування та створення сприятливих умов для поліпшення доступу усіх верств населення до них. Основними продуктами харчування на сьогодні є продукція рослинного походження або продукти, створених на їхній основі. При цьому варто відмітити, що в загальному балансі продуктів харчування рослинного походження на продукти, створені на основі зерна злакових культур, припадає значна частка – близько 90 %. Крім того, запаси продовольства в будь-якій країні завжди оцінюються та накопичуються в розрахунок на кількість товарного, продовольчого та фуражного зерна [14]. Також слід зазначити, що, беручи до уваги кількісний склад посівних площ сільськогосподарських земель, на долю посівів озимої пшениці припадає близько 13 млн га, а на жито – 1,8 млн га. Потреба в такій великій площі земель під виробництво зерна злакових культур пояснюється не лише формуванням необхідних державних запасів та великим продовольчим попитом, але й тим, що реалізація зерна на зовнішніх та внутрішніх ринках дає суттєві економічні вигоди виробникам цього виду продукції.

Окрім валового об'єму зерна, що збирають із посівних площ, та його наявності на елеваторних підприємствах варто також приділяти увагу і якості зернової маси, бо низька якість зернової сировини, по-перше, не сприяє отриманню високоякісних продуктів при переробці низьковартісної сировини, а по-друге, постає актуальне питання виокремлення цінного зернового продукту, що буде використане як насіннєвий матеріал. Останній нюанс є безумовно головним, оскільки через обмежену кількість посівних площ, зокрема для України, рівень розораності є досить значним і складає понад 84%, підвищення кількості зібраного врожаю може досягатися лише за рахунок покращення рівня урожайності. Але відомо, що отримання високих урожаїв можливе, передусім, за рахунок використання високоякісного насіннєвого матеріалу. Відомі науковці-дослідники, селекціонери та спеціалісти-агрономи [5, 6, 9] довели та обґрунтували, що високоякісне насіння при умові однаковості усіх інших умов – технології обробки землі, сівба, вчасне та якісне підживлення, дотримання часових періодів виконання агротехнологічних операцій, погодні умови та інше – може формувати понад 50 % майбутнього зібраного врожаю.

Необхідно зауважити, що використання навіть некондиційного насіння через низький рівень схожості не є найважливішою причиною його біологічної та фізіологічної неповноцінності. Як свідчать результати дослідження наукового та практичного спрямування, чільне місце в низьких показниках проростання та вегетаційного розвитку сільськогосподарських культур є високий рівень травмування зерна під час чисельних механічних впливів на нього при реалізації процесів збирання, післязбиральної обробки та сівби. Доволі невисокий рівень технічної та технологічної оснащеності зернопереробних об'єктів засобами механізації виробничих процесів при завантажувально-розвантажувальних роботах, збирання та сівби призводить до порушення цілісності структури зерна, пошкодження мікроорганізмами, що обумовлює формування низького рівня схожості та інших показників якості насіннєвого матеріалу [1, 2, 13–15].

Згідно з проведеними дослідженнями при лабораторній схожості насіння пшениці 97% у польових умовах цей показник нижче приблизно на 4,5 %, а при лабораторній схожості 56,5 % – протиставлений показник становить 28 % [4, 5, 8–12]. На кожні 10 % травмованого насіння зменшується урожайність до 4 ц/га, а у разі зростання рівня травматизму збільшується кількість повторних небезпечних травм з неминучим спаданням рівня урожайності [6, 20].

Травмоване насіння в період зберігання та подальших технологічних операцій досить піддатливе до руйнації мікроорганізмами та пліснявою, що впливає також на якість [17–18].

Зважаючи на вищезазначене, з теоретичної та практичної точки зору варто провести дослідження з виявлення та оцінки рівня впливу робочих органів елементів технологічних машин виробничого ланцюга збирання та переробки зерна на рівень травмування зерна злакових культур та поліпшення якості зібраного збіжжя або насіннєвого матеріалу. Особливу увагу при цьому потрібно звернути на процес транспортування зернової маси між технологічними елементами виробничого процесу, оскільки найбільший механічний вплив ударно-циклічного характеру дії здійснюється саме робочими органами підйомно-транспортних засобів.

Згідно з дослідницькими даними, скребкові завантажувачі за один прохід зерна здійснюють травмування на 10 %, звертаючи увагу на те, що сучасні технологічні лінії з переробки зерна містять близько 6–9 приймальних засобів, 3–5 норій, 2–3 шнекові транспортери, то рівень травмування може бути і понад 52 % [8, 11].

Як відомо, на долю транспортних засобів припадає понад 75 % усіх випадків травмування і лише на 20...24 % зерно пошкоджується технологічним обладнанням [11].

У загальному випадку співвідношення рівнів травмування зерна на поточних технологічних лініях є таким: приймальні пристрої – 14,8 %, норії – в межах 13 %, шнеки до 16,7 %, скребкові транспортери – 17 %, гравітаційні транспортери – близько 1 %, пневмотранспортери – 16 % [12].

*Мета* роботи – представити методику оцінки та визначення рівня травмування зернового матеріалу робочими органами підйомно-транспортних засобів з урахуванням їх геометричних та кінематичних параметрів.

Для виконання поставленої мети необхідно проаналізувати конструктивні особливості робочих органів з виділенням геометричних елементів, що безпосередньо взаємодіють із зерном, та сформувати з використанням теорії ймовірності умови вірогідності отримання руйнівного зіткнення робочих органів з зерном.

**Матеріали і методи досліджень**

При переміщенні зерна за допомогою транспортних засобів воно відчуває на собі дію циклічного характеру різних видів навантаження – удар, зрушення, тертя, стиск та інше.

Зерно при взаємодії з робочими органами транспортних засобів реагує не тільки на статичні навантаження, але й на динамічні, особливо в період завантаження, де величина ударної взаємодії є найбільшою та критичною за межу міцності зерна.

При переміщенні зерна від одного технологічного ланцюга виробничого процесу до іншого кількість не пошкодженого зерна зменшується для кожної  $i$ -тої операції. При цьому об'єм цього зерна після виконання певної операції буде визначатися:

$$x_i = x_{i-1} \cdot P_i, \quad (1)$$

де  $x_{i-1}$  – об'єм непошкодженого зерна до виконання певної  $i$ -ої технологічної операції;

$P_i$  – імовірність збереження нетравмованого зерна на  $i$ -му процесі технологічної операції.

Показник імовірності  $P_i$  є узагальненим параметром, що характеризує сукупність імовірностей збереженості цілісності зерна за наявності певної сукупності травмонебезпечних ситуацій. Зокрема, імовірність  $P_i$  включає: імовірність  $P_p$  відсутності травмування зерна внаслідок тертя зерна о контактну робочу поверхню  $P$ , імовірність  $P_v$  збереженості зерна внаслідок ударної взаємодії з елементами робочих органів транспортного засобу та імовірність  $P_\ell$  відсутності травмування зерна при його переміщенні на відстань  $\ell$  по елементах транспортного засобу.

Усі наведені компоненти імовірності є виокремленими величинами та не впливають на формування одне одного, тому, загалом, імовірність  $P_i$  буде визначатися як алгебраїчний добуток перелічених складників:

$$P_i = P_p \cdot P_v \cdot P_\ell. \quad (2)$$

Кожний зі складників загальної імовірності  $P_i$  може бути визначений із залученням теорії імовірності та за умови, що поява певної події не пов'язана з іншими.

Імовірність збереженості  $P_p$  зерна при контакті з поверхнею  $p$  тертя:

$$P_p = e^{-\lambda_1 P}, \quad (3)$$

де  $\lambda_1$  – інтенсивність потоку, що є зворотно оберненою величиною до математичного сподівання критерія, що береться до розгляду.

Імовірність збереженості  $P_v$  з урахуванням наявності удару зерна, що рухається з певною швидкістю  $v$ , з конструктивними елементами транспортного засобу:

$$P_p = e^{-\lambda_2 v}. \quad (4)$$

Імовірність збереженості  $P_\ell$  за довжиною контакту  $\ell$ :

$$P_p = e^{-\lambda_3 k \ell}, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що вказує частку зернового матеріалу від усієї наявної маси зерна, що пересувається на величину  $\ell$ .

$$k = \frac{m_{заг} - m_{об}}{m_{заг}} = 1 - G, \quad (6)$$

де  $m_{заг}$ ,  $m_c$  – відповідно маса зерна, що подається на технологічну операцію та повернутого назад у потік зерна;

$G$  – об'єм зерна, що повертається у потік зерна.

Імовірність контакту цілісного зерна з поверхнею тертя  $P$  може бути виражена через імовірність контакту зерна  $P_1$  з елементами конструкції на імовірність вмісту нетравмованого зерна  $P_2$  у потоці:

$$P = P_1 \cdot P_2, \quad (7)$$

Якщо представити, що імовірність вмісту нетравмованого зерна  $P_2$  у потоці зіставна з долею зерна  $x_{i-1}$  у потоці

$$P_2 = x_{i-1}, \quad (8)$$

то вираз (7) може бути представлений у формі

$$P = P_1 \cdot x_{i-1}. \quad (9)$$

З урахуванням виразів (2)-(8) загальна доля зерна після виконання транспортування може бути знайдена

$$x_i = x_{i-1} \cdot e^{-\lambda_1 P_1 x_{i-1} - \lambda_2 v(1 - \sin \alpha) - \lambda_3 k \ell}, \quad (10)$$

де  $\alpha$  – кут між векторним спрямуванням швидкості руху зерна до нормалі поверхні удару.

Доля травмованого зерна в потоці може бути знайдена як обернена величина до вмісту цілісного зерна в потоці, а саме:

$$y_i = (1 - x_i) \cdot 100 \quad (11)$$

або з урахуванням (10)

$$y_i = 1 - x_{i-1} \cdot e^{-\lambda_1 P_1 x_{i-1} - \lambda_2 v(1 - \sin \alpha) - \lambda_3 k \ell} \quad (12)$$

Наведений вираз за своїм змістом є універсальним підходом для оцінки рівня травмування зерна не лише для транспортної операції, але й для довільно вибраної процедури обробки зерна.

Для окремо вибраного засобу транспортування формування імовірності контакту зерна  $P_1$  з елементами конструкції робочих органів цього засобу визначається через відношення об'єму зерна, що контактує безпосередньо з поверхнею тертя, до загального об'єму зерна, що транспортується.

Зокрема, для скребкового транспортеру ця імовірність становить

$$P_1 = \frac{2b_3}{B} + \frac{\ell(B - 2b_3)a_3 \rho v_{mp}}{qt}, \quad (13)$$

де  $B$  – ширина скребка, м;

$\ell$  – протяжність шару зерна, що перебуває в контакті з поверхнею контакту, м;

$\rho$  – густина зернового матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{mp}$  – швидкість стрічки транспортеру, м/с;

$q$  – секундна подача, м<sup>3</sup>/с;

$t$  – крок розташування скребків, м;

$a_3, b_3$  – ширина та довжина зерна, м.

У випадку стрічкового транспортеру шукана імовірність визначається з виразу

$$P_1 = \frac{1}{q} v_{mp} \rho a_3 \left( b_0 - \frac{b - b_o}{\cos \alpha} \right), \quad (14)$$

де  $b$  – ширина контактної шару, м;

$b_o$  – ширина горизонтальної ділянки стрічки, м;

$\alpha$  – кут підйому.

Для інших типів підйомно-транспортних засобів окреслена імовірність може бути визначена аналогічним чином з урахуванням його конструктивних та режимних параметрів їх роботи.

Представлені вирази дають змогу повною мірою визначити імовірність зіткнення зерна з елементами робочих органів підйомно-транспортних засобів.

### Результати досліджень та їх обговорення

Згідно з отриманими залежностями характер зміни кількості травмованого зерна під час транспортування в окремо взятій ситуації (імовірність ударного зіткнення, імовірність травмування по переміщенню та імовірність травмування за наявності тертя з елементами робочих органів транспортерів) та у загальному вигляді підпорядкований експоненціальному закону зміни. При цьому інтенсивність зменшення імовірності отримання пошкоджень зерна є доволі різноманітною і може бути розподілена на дві стадії.

На першій стадії, що формується при зростанні ступеню експоненти до 4...5, відбувається кратне збільшення імовірності отримання пошкодженого зерна. Так, з виникненням обставин, коли добуток сукупності факторів впливу на отримання травмованого буде прирівняне до двох, то імовірність травмування зростає майже до 86 %. У випадку збігу факторів, коли їх добуток буде прирівняний до п'яти, рівень травмування зерна буде майже стовідсотковим.

Друга стадія характеризується монотонним зростанням імовірності появи травмованого зерна в незначних межах, асимптотично наближаючись до 100 % імовірності пошкодження зерна при реалізації технологічного процесу транспортування підйомно-транспортними засобами.

Оскільки загальна імовірність збереженості зерна є узагальненим критерієм і є лише результатом добутку трьох складників, то його величина буде формуватися з урахуванням особливостей зміни абсолютних параметрів того чи того аспекту взаємодії зерна з елементами підйомно-транспортних засобів. До таких можна, насамперед, віднести швидкість руху зерна в момент зіткнення з поверхнею робочих органів та величиною лінійного переміщення зерна по поверхні контакту, отримуючи ушкодження не лише від тертьового контакту з поверхнею робочих органів, але й за рахунок взаємодії із сусідніми зернами.

Особливу увагу варто звернути на визначення імовірності контакту зерна  $P_1$  з елементами конструкції робочих органів транспортних засобів. Вона формується не лише за геометричними параметрами зерна як окремо виділеного геометричного тіла певної форми, але й більшою мірою залежить від конструктивних особливостей та геометрії робочих органів транспортних засобів. Це обумовлено більш значною зовнішньою площею поверхні робочих органів порівняно з поверхнею зерна. Тому для зменшення цієї імовірності слід приділити особливу увагу конструктивному виконанню та правильному вибору матеріалів для побудови або модернізації робочих органів підйомно-транспортних засобів.

### Висновки

На основі розгляду процесу транспортування з точки зору його реалізації було виділено три основні моменти виникнення та розвитку травмонебезпечних ситуацій, кожний із яких є відокремленим та непов'язаний з іншими. Це дало змогу з погляду теорії імовірності представити їх як імовірності виникнення певної події з урахуванням конструктивних та режимних параметрів. Це дає змогу з високим ступенем вірогідності надавати оцінку про рівень травмування та визначати вміст пошкодженого зерна в загальній зерновій масі до та після виконання певної транспортної операції, а також, враховуючи багатоетапність переміщення зерна по виробничому ланцюгу, прогнозовано мати дані про загальні втрати зерна при його післязбиральній обробці та переробці.

*Перспективи подальших досліджень.* Подальші дослідження будуть направлені на пошук конструктивно-просторових рішень щодо оптимізації будови та конструктивних матеріалів робочих органів підйомно-транспортних засобів для досягнення мінімізації рівня травмування зерна.

### References

1. Aniskin, V. I. (1992). Povrezhdenie semyan zernovykh kultur pri mashinnoy obrabotke. *Vestnik Selkohozyajstvennoy Nauki*, 1, 99–105. [In Russian].
2. Aristov, S. A. (1991). Puti snizheniya travmirovaniya zerna pri posleuborochnoy obrabotke. *Tekhnika v Selskom Hozyajstve*, 6, 55–56. [In Russian].
3. Hrabar, I. H. (2010). Vylyv kilkisno-yakisnoho obliku na vtraty zerna ta yoho yakisni pokaznyky pry peremishchenni i zberihanni. *Zbirnyk Naukovykh Prats Vinnytskoho Natsionalnoho Ahrarnoho Universytetu*, 4, 34–36. [In Ukrainian].
4. Eremyn, N. V. (1994). K voprosu snyzheniya travmyrovaniya semyan. *Traktory i Selhozmashiny*, 4, 30–34. [In Russian].
5. Kalenska, C. M. (2011). *Nasinnestnavstvo ta metody vyznachennia yakosti nasinnia silskohospodarskykh kultur*. Vinnytsia: Dalynyuk. [In Ukrainian].
6. Kovalyshyna, H. M. (2004). Shcho vplyvaye na skhozhist nasynnya. *Karantyn i Zakhyst Roslyn*, 8, 1–3. [In Ukrainian].
7. Kravchuk, V. I. (2011). Fundamentalni aspekty stvorennia analitychnykh modeley vzayemodiyi robochoho elementa mashyny ta obyektu syrovyny. *Tekhnika i Tekhnolohiyi APK*, 1, 4–8. [In Ukrainian].
8. Kotov, B. I. (2017). *Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh obyektakh pislyazbyralnoyi obrobky i zberihannya zerna (separatsiya, sushynnya, aktyvne ventilyuvannya, okholodzhennya)*. Nizhyn: PP Lisenko. [In Ukrainian].
9. Moroz, N. A. (1974). Vliyanie travmirovaniya semyan na ih posevnye kachestva. *Biologiya i Tehnologiya Semyan*, 1, 139–143. [In Russian].
10. Pakhomov, V. Y., Brahynets, S. V., Benova, E. V., Bakhchevnykov, O. N., & Podlesnyy, D. S. (2020). Travmirovanie zerna pri nizkoskorostnom soudarenii s poverhnostyami rabochih organov podemno-transportnykh mashin. *Selskohozyajstvennye Mashiny i Tehnologii*, 14 (2), 53–58. doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-53-58 [In Russian].

11. Piskarkova, I. O. (2019). Travmuvannia zerna pshenytsi zernoochysnoiu mashynoiu OVU-25 ta shliakhy yoho znyzhennia. *Tsentrálnourkainskyi Naukovyi Visnyk*, 3, 11–16. doi: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).11-16 [In Ukrainian].
12. Strona, I. G., & Pugachev, A. N. (1972). *Travmirovaniya semyan i ego povrezhdenie*. Moskva: Kolos [In Russian].
13. Tarasenko, A. P. (2003). *Snizhenie travmirovaniya semyan pri uborke i posleuborochnoj obrabotke*. Voronezh [In Russian].
14. Trisvinskij, L. A. (1985). *Hranenie zerna*. Moskva: Agropromizdat [In Russian].
15. Tsarenko, O. M. (2003). *Mekhaniko-tekhnolohichni vlastyvosti silskohospodarskykh materialiv*. Kyiv: Meta. [In Ukrainian].
16. Hourston, J. E., Ignatz, M., Reith, M., Leubner-Metzger, G., & Steinbrecher, T. (2017). Biomechanical properties of wheat grains: the implications on milling. *Journal of The Royal Society Interface*, 14 (126), 511–515. 20160828. doi: 10.1098/rsif.2016.0828
17. Mabile, F., Gril, J., & Abecassis, J. (2001). Mechanical properties of wheat seed coats. *Cereal Chemistry Journal*, 78 (3), 231–235. doi: 10.1094/cchem.2001.78.3.231
18. Moya, M., Aguado, P. J., & Ayuga, F. (2013). Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *International Agrophysics*, 27 (2), 181–193. doi: 10.2478/v10247-012-0084-9
19. Negi, S. C., Lu, Z., & Jofriet, J. C. (1997). A Numerical model for flow of granular materials in silos. Part 2: model validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68 (3), 231–236. doi: 10.1006/jaer.1997.0197
20. Pasha, I., Anjum, F. M., & Morris, C. F. (2010). Grain hardness: a major determinant of wheat quality. *Food Science and Technology International*, 16 (6), 511–522. doi: 10.1177/1082013210379691

Стаття надійшла до редакції: 18.04.2021 р.

**Бібліографічний опис для цитування:**

Іванов О. М., Сімонов К. В. Теоретично-імовірнісний підхід до оцінки рівня травмування зерна при транспортуванні. *Вісник ПДАА*. 2021. № 2. С. 266–272.

Іванов Олег Миколайович, Сімонов Кирило Вікторович, 2021