

**Бурлака С.А.**д.ф. з галузевого  
машинобудування, старший  
викладач**Анісімов В.Ф.**

д.т.н., професор

**Ковтун О.Л.**

магістр

**Черній В.І.**

магістр

**Вінницький національний  
аграрний університет****Burlaka S.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Anisimov V.**Doctor of technical sciences,  
professor**Kovtun O.**

Master

**Chernii V.**

Master

**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 621.7.044****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-5**

## **ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ ТА ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ**

*Ця стаття представляє глибокий аналіз взаємодії вібраційної обробки із механічними властивостями зварювальних з'єднань та газодинамічних покриттів. Враховуючи значущий імпакт вібрацій на металургійні та технологічні процеси, розглядаються ключові аспекти цієї взаємодії та її можливий вплив на якість та довговічність зварювальних з'єднань та покриттів.*

*Стаття ставить перед собою завдання визначити оптимальні параметри вібраційної обробки, спрямовані на досягнення найвищої міцності та еластичності в зварювальних з'єднаннях. Проводиться систематичний аналіз впливу амплітуди, частоти та тривалості вібрацій на механічні властивості матеріалів. Аналізуючи взаємодію вібрацій з механічними властивостями зварювальних з'єднань, стаття розкриває потенціал використання вібраційної обробки для покращення процесів зварювання та формування міцних та довговічних з'єднань. Особлива увага приділяється дослідженню впливу вібрацій на мікроструктуру матеріалів та їхню здатність витримувати механічні навантаження в різних умовах експлуатації.*

*Додатково, стаття досліджує взаємодію вібраційної обробки із газодинамічними покриттями, оскільки ці покриття відіграють важливу роль у забезпеченні захисту та функціональності поверхонь. Автори вивчають, як вібрації можуть впливати на рівномірність нанесення покриттів, їх стійкість та адгезію до основи.*

*Окремий аспект статті присвячений розгляду можливостей оптимізації газодинамічних покриттів за допомогою вібраційної обробки для досягнення кращої адгезії та стійкості. Дослідження охоплює не тільки металеві покриття, але й полімерні та композитні матеріали.*

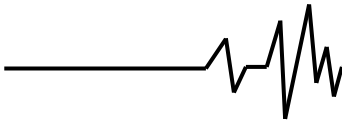
*Висновки статті визначають важливість урахування впливу вібрацій на процеси зварювання та нанесення покриттів, вказуючи на перспективи вдосконалення технологій виробництва для підвищення якості та тривалості з'єднань та покриттів в промислових застосуваннях.*

**Ключові слова:** *напилення, поверхневий шар, частинка, нанесення, характеристики покриття, робоче середовище, швидкість.*

**Вступ.** В сучасному індустріальному ландшафті, де технологічний прогрес стрімко розвивається, постійна необхідність в удосконаленні процесів виробництва стає невід'ємною частиною пошуку ефективних та інноваційних рішень. У цьому контексті, велике

значення приділяється вивченню впливу вібрацій на механічні властивості зварювальних з'єднань та газодинамічних покриттів, яке відображається у даній статті.

Вібрації, як один із важливих аспектів технічних процесів, завжди привертала увагу



вчених та інженерів. Застосування вібраційної обробки у сфері зварювання та нанесення покриттів може відкривати нові горизонти для покращення механічних характеристик виробів та забезпечення їх довговічності. Інтеграція вібрацій у технологічні процеси може відігравати визначальну роль у створенні стійких та високоефективних з'єднань, які витримують екстремальні умови експлуатації.

Спільно з тим, газодинамічні покриття, які забезпечують захист поверхонь від агресивного впливу навколишнього середовища, також заслуговують на особливу увагу. Їхня стійкість та ефективність тісно пов'язані з точністю та рівномірністю нанесення, що може бути покращено за умов впровадження вібраційної технології.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз останніх досліджень у сфері впливу вібрацій на механічні властивості зварювальних з'єднань та газодинамічних покриттів розкриває ряд ключових тенденцій та перспектив, які визначають напрями подальших досліджень та розвитку цієї проблематики.

Однією з актуальних областей досліджень є розуміння взаємодії вібрацій із структурою матеріалів на мікро- та наномасштабах. Недавні високоточні методи дослідження дозволяють більш детально аналізувати вплив вібрацій на кристалічну ґратку матеріалів, їхню деформацію та розподіл дефектів. Це відкриває можливості для точного налаштування вібраційних параметрів для досягнення оптимальних механічних властивостей.

Дослідження також акцентують на розробці інноваційних методів вібраційного зварювання та нанесення покриттів. Застосування новітніх технологій управління вібраціями та автоматизації дозволяє оптимізувати процеси, забезпечуючи не лише високу якість, але й зниження витрат енергії та матеріалів. Це особливо важливо в контексті сучасних вимог до стійкості та стандартів екологічності.

Дослідження впливу вібрацій на газодинамічні покриття виявили важливі аспекти їхньої стійкості та робочої ефективності. Врахування впливу вібрацій на рівномірність нанесення покриття, адгезію до основи та стійкість підвищує можливості їхнього використання в різних умовах експлуатації.

Важливим відкриттям є зростаючий інтерес до енергоефективних методів вібраційного оброблення. Використання розумних систем контролю та оптимізації може допомогти не тільки у підвищенні продуктивності, але й у скороченні споживання енергії та покращенні сталості процесів.

**Метою досліджень** полягає в ретельному вивченні та систематизації впливу вібрацій на механічні властивості зварювальних з'єднань та газодинамічних покриттів з метою розкриття можливостей вдосконалення цих технологій у сучасних виробничих процесах.

**Матеріали і методи.** Основний метод для покращення якості зварних з'єднань - використання різних видів термічної обробки. Серед загальних недоліків цього типу операцій можна виділити значну енергоефективність та трудомісткість, неможливість застосування при зварюванні важкодоступних вузлів та деталей.

Існують інші способи підвищення якості зварних з'єднань [1], проте у більшості випадків вони не знаходять застосування в виробництві.

Вібраційна обробка зварних з'єднань є порівняно новим методом. За агрегатним станом об'єкта обробки (зварний шов) методи вібраційної обробки можна розділити на два типи: обробка розплавленого та кристалізуючого металу; обробка затверділого металу.

Деякі наукові дослідження з вібраційного впливу відносяться до обробки затверділого металу. Якщо розглядати вібраційну обробку зварної конструкції, яку проводять після кристалізації зварного шва та його охолодження до температури оточуючого середовища, то її основне призначення - зменшення залишкових напруг і деформацій. Дослідження в цьому напрямку описані в [2, 3].

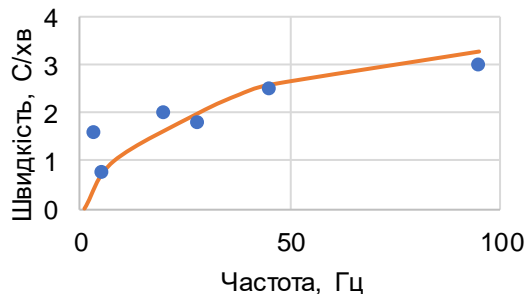
Більш ефективним і економічно вигідним, на нашу думку, є метод спільної вібраційної обробки з'єднань під час зварювання. У цьому випадку вібраційний вплив здійснюється не лише на затверділий метал зварного з'єднання, але і на розплавлений та кристалізуючий метал зварювальної ванни. Це не лише дозволяє отримати більший спектр позитивних ефектів від обробки, але і надає можливість використання локального введення пружних коливань безпосередньо в зону зварювання, що значно зменшує потрібну потужність вібраційних пристроїв і підвищує універсальність методу.

У зв'язку з складністю та недостатньою вивченістю процесу кристалізації ефекти від впливу пружних коливань на розплавлений та кристалізуючий метал дослідниками розглядаються окремо одне від одного. Проте, на нашу думку, такі особливості зварювальної ванни, як порівняно малий об'єм розплавленого металу та висока швидкість охолодження, дозволяють отримати ефект від впливу пружних коливань на розплавлений та кристалізуючий метал зварювальної ванни. Встановлено, що для великих заготовок ці умови забезпечуються при частоті вібрації 50-60 Гц з амплітудою 10 мм. Однак для розплавлених об'ємів меншого розміру, таких як зварювальна ванна, оптимальна частота для



обробки у розплавленому стані за різними даними знаходиться в діапазоні 50-300 Гц [8, 9].

Багато досліджень формування кристалічних структур показали, що вібрація затвердіючих відливок і злитків супроводжується утворенням на межі затвердіння великої кількості відламків гілок дендритів та появою у розплаві численних центрів кристалізації.



**Рис. 1. Залежність швидкості охолодження металу від частоти пружних коливань (для сталі з амплітудою 1 мм)**

По суті, технологія вібраційної обробки сталі та сплавів - це ніщо інше, як утворення надлишкової енергії. Яка рівна:

$$dF_{\text{виб}} = 0,5 \omega a^2 \rho dV, \quad (1)$$

де  $r = dm/dV$  – щільність середовища;  $m$  – маса частинки в об'ємі  $dV$ ;  $\omega$ ,  $A$  – частота і амплітуда упругих хвиль відповідно.

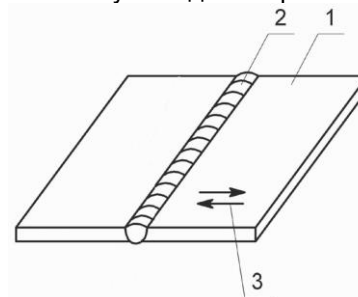
З наведеної залежності випливає, що збільшенню вібраційної енергії сприяє збільшення частоти і амплітуди вібрації, а також щільності середовища. Величина вільної енергії системи, яка піддається вібрації, складе [4]:

$$\Delta F = F + F_{\text{виб}} - S(t_1 - t_2) - \sigma\alpha\sigma, \quad (2)$$

де  $\Delta F$  – вільна енергія системи;  $F$  – внутрішня енергія системи;  $S$  – ентропія системи;  $t_1$ ,  $t_2$  – температури рідкого і твердого станів системи;  $s$  – поверхнева енергія на межі фаз "кристал-рідина";  $\sigma\alpha\sigma$  – сумарна площа поверхонь всіх кристалів (гілок дендритів тощо). З формули (2) видно, що зі збільшенням потужності введених пружних коливань відбувається збільшення вільної енергії. Значення вібраційної енергії при формуванні кристалічних структур свідчить про те, що вона витрачається на обламування гілок дендритів та створення в системі додаткових центрів кристалізації. Виділення при цьому обсягів переохолодженого металу навколо кожного з них і подальший їхній ріст відбувається за рахунок внутрішньої енергії системи. Тут також важливо відзначити, що значуще збільшення вільної енергії системи може негативно вплинути на властивості кристалізуючого металу та призвести до різноманітних дефектів.

Вібрації можуть призводити до подрібнення кристалічного зерна з двох причин. Перша - це формування вібраційних потоків рідини, що в свою чергу викликає змивання кристалічних зародків від фронту кристалізації та розкид їх по всьому об'єму. У цьому випадку майже одночасно кристалізується весь об'єм, що містить численні зародкові кристали з одночасним вирівнюванням температури в об'ємі рідини. Друга - кавітаційне руйнування кристалічного фронту при великих енергіях коливань. Кавітація відбувається на газових бульбашках, які виділяються на кристалічному фронті через те, що розчинність у твердій фазі нижча, ніж в рідкій.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Наші проведені дослідження прямо чи опосередковано підтверджують вищезазначені гіпотези та факти впливу пружних коливань на розплавлений та кристалізуючий метал [11, 12]. Для досягнення цього ми провели серію експериментів для оцінки впливу параметрів супутнього вібраційного впливу на зварний шов під час зварювання. Матеріали для дослідження вибиралися серед найбільш поширених в нафтогазовому та нафтохімічному машинобудуванні видів сталі. Схема застосування пружних коливань та режими вібраційного впливу наведені на рис. 2 і в табл. 1.

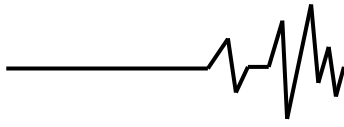


**Рис. 2. Схема зварювання зразків: 1 – пластины, що зварюються; 2 – зварювальний шов; 3 – напрямок пружних коливань**

Таблиця 1. Режими вібраційного впливу

Номер досліду	Частота вібрацій, Гц	Амплітуда, мм	Віброшвидкість, мм/с
1	0	0	0
2	50	0,8-1	3,1-4,1
3	100	0,8-1	6,2-8,3
4	150	0,8-1	12,5-16,7
5	200	0,8-1	17,1-20,9

Аналіз рентгенівських знімків показав, що загальна площа проєкцій пор на ділянці завдовжки 50 мм і ширині 10 мм є мінімальною при частоті супутнього вібраційного впливу 100 Гц (рис. 3). Отже, супутня вібраційна обробка



позитивно впливає на дисперсність неметалевих включень, їх кількість і характер розташування в шві.

Збільшення швидкості охолодження кристалізуючого металу зварного шва при застосуванні до нього енергії пружних коливань косвенно підтверджується порівнянням даних мікроструктурного аналізу зварних з'єднань, виконаних із використанням вібраційної обробки та без неї, яке було проведене в роботі [12]. Як показано вище, введення у ванну для зварювання пружних коливань призводить до збільшення вільної енергії системи. Це призводить до зменшення мінімального розміру зародка при одночасному збільшенні кількості центрів кристалізації, що, в свою чергу, призводить до зменшення середнього розміру.

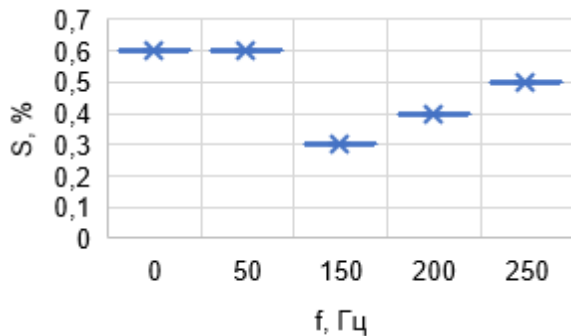


Рис. 3. Діаграма залежності площі проєкцій пор від частоти вібрації

Візуальний аналіз мікроструктури металу зварного з'єднання проводили за допомогою знімків, отриманих на оптичному мікроскопі ЕС МЕТАМ РВ-21 зі збільшенням 300 згідно з схемою, наведеною на рис. 4.

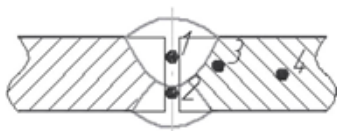


Рис. 4. Схема розташування точок для аналізу мікроструктури різних ділянок зварного з'єднання: 1 - метал лицьового валика; 2 – метал зворотного валика; 3 – ділянка зони термічного впливу; 4 - ділянка основного металу

Мікроструктура металу зварених з'єднань, отриманих за різних режимів вібрації, представлена на рис. 5. З рисунків видно, що вібраційні коливання під час зварювання найбільше впливають на мікроструктуру металу лицьового валика та зони термічного

впливу. При цьому для лицьового валика зі збільшенням частоти вібрації спостерігається зменшення напрямленості мікроструктури металу за рахунок подрібнення дендритних гілок, а в зоні термічного впливу спостерігається зменшення середньої площі розміру зерна.

Описаний у роботі [10] ефект зі збільшення інтенсивності та вирівнювання ступеня переохолодження розплаву по об'єму при застосуванні вібраційних коливань особливо актуальний для зварювальної ванни через невеликий об'єм розплавленого металу і високу швидкість його охолодження. Таким чином, як було вказано вище, вібраційна обробка під час зварювання сприяє одночасній об'ємній кристалізації зварного шва, що позитивно впливає на рівень залишкових напруг від зварювання.

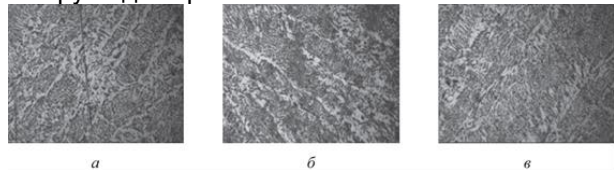


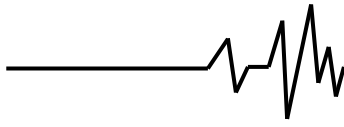
Рис. 5. Мікроструктура металу лицьового валика у точці 1 (рис. 4): а – без віброобробки; б - віброобробка при частоті 50 Гц; в – при частоті 150 Гц. \*300

Проведені нами дослідження дозволяють зробити висновок про ефективність супутньої вібраційної обробки зварного шва і прямим або непрямим чином підтвердити гіпотези про механізми впливу пружних коливань на розплавлений метал зварювальної ванни, що кристалізується.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Загальна оцінка результатів досліджень свідчить про значний вплив вібрацій на мікроструктуру та механічні властивості зварних з'єднань. Використання вібраційних коливань під час процесу зварювання призвело до подрібнення дендритних відгалужень та зменшення розмірів кристалічних зерен у металі лицьового валика та зони термічного впливу.

Дослідження вказують на те, що впровадження вібраційної обробки сприяє одночасній об'ємній кристалізації зварного шва. Цей ефект може бути ключовим для покращення механічних властивостей з'єднань, оскільки обробка сприяє вирівнюванню структури та зменшенню розмірів кристалічних зерен.

Таким чином, наші дослідження підтверджують потенційну ефективність використання вібраційного впливу під час зварювання для покращення мікроструктури та механічних характеристик зварних з'єднань. Дані отримані в ході експериментів слугують



базою для подальших досліджень та можуть бути використані для оптимізації процесів зварювання з метою підвищення якості та надійності отриманих з'єднань.

#### Список використаних джерел

1. Калетнік Г., Адамчук В., Булгаков В., Кравчук В. Про концепцію сучасного розвитку вітчизняної сільськогосподарської техніки. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2014. Вип. 18. С. 19–28.

2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs. *Aspects of Applied Biology*. 2012. Vol. 115. P. 75–80.

3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 (3). P. 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082

4. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55 (11). P. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010

5. Бурлака С. А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1 (305). С. 140–145.

6. Бурлака С. А., Явдик В. В., Єленіч А. П. Методи досліджень та способи оцінки впливу палив з відновлюваних ресурсів на роботу дизельного двигуна. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 2 (271). С. 212–220

7. Гулько І. В., Бурлака С. А. Математичне моделювання роботи системи живлення дизельного двигуна працюючого на біопаливі з дросельним регулювання складу паливної суміші. *The scientific heritage*. 2020. № 50. С. 34–39

#### References

1. Kaletnik G., Adamchuk V., Bulgakov V., Kravchuk V. About the concept of daily development of agricultural technology. Technical and technological aspects of the development and

testing of new equipment and technologies for the agricultural state of Ukraine. 2014. VIP. 18. pp. 19–28.

2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs. *Aspects of Applied Biology*. 2012. Vol. 115. P. 75–80.

3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 (3). P. 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082

4. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55 (11). P. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010

5. Burlaka S. A. Algorithm for the functioning of a machine-tractor unit with a different system of life and fire. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2022. No. 1 (305). pp. 140–145.

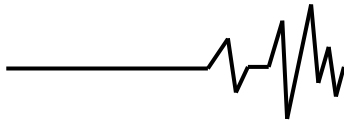
6. Burlaka S. A., Yavdik V. V., Elenich A. P. Research methods and methods for assessing the flow of fuel from renewable resources into the operation of a diesel engine. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2019. No. 2 (271). pp. 212–220

7. Gunko I. V., Burlaka S. A. Mathematical modeling of the robotic life system of a diesel engine running on fuel with throttle control of the fuel storage tank. *The scientific heritage*. 2020. No. 50. pp. 34–39

#### THE INFLUENCE OF VIBRATIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS AND GAS DYNAMIC COATINGS

*This article presents an in-depth analysis of the interaction of vibration processing with the mechanical properties of welded joints and gas dynamic coatings. Considering the significant impact of vibrations on metallurgical and technological processes, the key aspects of this interaction and its possible influence on the quality and durability of welded joints and coatings are considered.*

*The article sets itself the task of determining the optimal parameters of vibration processing aimed at achieving the highest strength and elasticity in welding joints. A systematic analysis of the influence of the amplitude, frequency and duration of vibrations on the mechanical properties of materials is carried out. Analyzing the interaction of vibrations with the mechanical properties of welded joints, the article*



reveals the potential of using vibration processing to improve welding processes and form strong and durable joints. Special attention is paid to the study of the influence of vibrations on the microstructure of materials and their ability to withstand mechanical loads in various operating conditions.

Additionally, the paper explores the interaction of vibration treatment with gas-dynamic coatings, as these coatings play an important role in providing surface protection and functionality. The authors study how vibrations can affect the uniformity of coating application, their stability and adhesion to the base.

A separate aspect of the article is devoted to considering the possibilities of optimizing gas

dynamic coatings using vibration processing to achieve better adhesion and stability. The study covers not only metal coatings, but also polymer and composite materials.

The conclusions of the article determine the importance of taking into account the influence of vibrations on welding and coating processes, indicating the prospects for improving production technologies to increase the quality and durability of joints and coatings in industrial applications.

**Keywords:** spraying, surface layer, particle, application, coating characteristics, working environment, speed.

#### **Відомості про авторів**

**Бурлака Сергій Андрійович** – доктор філософії з галузевого машинобудування, старший викладач кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>)

**Анісімов Віктор Федорович** – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380972830537, [anisimov@vsau.vin.ua](mailto:anisimov@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3349-1630>).

**Ковтун Олександр Леонідович** – магістр інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [serhiydron@gmail.com](mailto:serhiydron@gmail.com))

**Черній Владислав Ігорович** – магістр інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [serhiydron@gmail.com](mailto:serhiydron@gmail.com))

**Burlaka Serhii** - Doctor of Philosophy in Industrial Mechanical Engineering, Senior Lecturer at the Department of Technological Processes and Equipment of Processing and Food Industries of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>)

**Anisimov Viktor** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering and Technical Service of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Street, 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380972830537, [anisimov@vsau.vin.ua](mailto:anisimov@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3349-1630>).

**Kovtun Oleksandr** – Master of Engineering and Technology Faculty of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Street, 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [serhiydron@gmail.com](mailto:serhiydron@gmail.com)).

**Chernii Vladyslav** - Master of Engineering and Technology Faculty of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Street, 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [serhiydron@gmail.com](mailto:serhiydron@gmail.com)).