

Boiko Evgenii, PhD student Department of equipment and engineering of processing and food production, State Biotechnological University, oiрхv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4340-165X>

Прийнято 18.11.2025 р. Опубліковано 01.12.2025р.

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.31359/2312-3990X-2025-38-2-156>

ДО ПИТАННЯ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ БЕЗ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ПРОЦЕС СЕПАРАЦІЇ

**О.В. Богомолов, В.М. Михайлов, О.О. Богомолов, Є.В. Бойко,
В.О. Панов, І.О. Бочарніков**

Розглянуті питання очищення зернових сумішей від насіння бур'янистих рослин та домішок, які при збиранні врожаю потрапляють у купу з насінням основної культури. Проаналізовано вибір ознак подільності зернової суміші, способів та технічних засобів з урахуванням вхідних параметрів, які відносяться до сировини, що обробляється, а також конструктивних та режимних параметрів роботи зерноочисних машин. Показано, що найбільш ефективними сепараторами є гравітаційні сепаратори, в яких на процес сепарації енергія не витрачається. Запропоновано спосіб гравітаційної сепарації зернових сумішей за силою тертя під дією сили тяжіння при русі частинок по циліндричній криволінійній поверхні. Розглянуто рух матеріальної частинки по циліндричній поверхні гравітаційного сепаратора. Приведена розрахункова схема руху частинки, та для різноманітних значень коефіцієнта тертя отримані залежності кутової координати точки відриву частинки від поверхні сепаратора та з урахуванням цього порядку відповідного розташування приймачів продуктів розподілу. Побудовані графіки залежності кутів α та β від коефіцієнта тертя частинки суміші по циліндричній фрикційній поверхні. Запропонована принципова схема гравітаційного сепаратора з циліндричною фрикційною поверхнею, що сепарує.

Ключові слова: сепарація, зерно, суміш, гравітаційний сепаратор, домішки.

ON THE ISSUE OF SEPARATION OF GRAIN MIXTURES WITHOUT ENERGY EXPENDITURES FOR THE SEPARATION PROCESS

**O.V. Bogomolov, V.M. Mykhaylov, O.O. Bogomolov, E.V. Boyko,
V.O. Panov, I.O. Bocharnikov**

The issues of cleaning grain mixtures from weed seeds and impurities that fall into a heap with the seeds of the main crop during harvesting are considered. The selection of features of grain mixture divisibility, methods and technical means is analyzed, taking into account the input parameters related to the raw materials being processed, as well as the design and operating parameters of grain cleaning machines. It is shown that the most effective separators are gravity separators, in which energy is not spent on the separation process. A method of gravitational separation of grain mixtures by friction under the action of gravity during the movement of particles along a cylindrical curvilinear surface is proposed. The movement of a material particle along the cylindrical surface of a gravity separator is considered. A calculation scheme of particle motion is given, and for various values of the friction coefficient, the dependences of the angular coordinate of the point of separation of the particle from the separator surface and, taking into account this order, the corresponding location of the distribution product receivers are obtained. Graphs of the dependence of the angles α and β on the friction coefficient of the mixture particles along the cylindrical friction surface are constructed. A schematic diagram of a gravity separator with a separating cylindrical friction surface is proposed.

Keywords: separation, grain, mixture, gravity separator, impurities.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останні роки в Україні в зв'язку зі зниженням культури землеробства виникла кілька проблем, пов'язаних з тим, що посіви сільськогосподарських культур засмічуються великою кількістю бур'янів, насіння яких при збиранні потрапляє у купу з насінням основної культури. Для сепарації зернових сумішей застосовуються багато видів сепараторів [1, 2, 10].

При цьому вибір технічних засобів очищення зернової суміші є завжди складною задачею. Це пояснюється тим, що для нинішнього вирішення цієї задачі надто багато вхідних параметрів, які відносять до сировини що обробляється: вид зерна, наявність органічних та мінеральних домішок, їх фізико-механічні властивості, вологість тощо, а також конструктивних та режимних параметрів роботи зерноочисних машин.

Вихідними ж параметрами були, як правило два, це продуктивність та якість сепарації незважаючи іноді на високі

енерговитрати. Але в останній час, в зв'язку зі стрімким подорожчанням електроенергії, а в деяких випадках її відсутності все гостріше постає питання розробки сепараторів, у яких на процес сепарації енергія зовсім не витрачається, так званих гравітаційних сепараторів

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принципи розділення зернових сумішей у всіх сепараторів засновані на відмінності фізико-механічних властивостей зерна основної культури, бур'янів та домішок. [1 - 4, 11, 12]. Основні фізико-механічні властивості зерна та домішок, за якими здійснюють розділення це: довжина, ширина, товщина, форма, пружність, шорсткість, коефіцієнти тертя, щільність, колір, аеродинамічні властивості. Під час вибору ознаки подільності та способу сепарації суміші, в першу чергу враховують ті ознаки подільності, за якими забезпечується найбільш повне розділення суміші на фракції з заданими показниками якості, по-друге враховують енерговитрати на процес сепарації та допоміжні процеси (транспортування, активне вентилявання, сушіння тощо). Переважна більшість зерноочисних машин здійснюють сепарацію за відмінністю розмірів частинок суміші та їх аеродинамічних властивостей. В пневмосортувальних столах, які застосовуються значно рідше для спеціальної очистки, сепарація здійснюється за щільністю. В останні роки з'явилися сепаратори для сепарації зернових сумішей за кольором. Ціна їх найбільша серед усіх, енерговитрати одні з найбільших, обслуговування складне. Для сепарації зернових сумішей за пружністю, формою, коефіцієнтами тертя, шорсткістю та електрофізичними властивостями промисловою обладнання практично не випускається за виключенням електромагнітних сепараторів для розділення за шорсткістю, при цьому при роботі з магнітним порошком виникають певні проблеми. Для сепарації за електрофізичними властивостями наразі не розроблено навіть рекомендацій, до того ж під сумнівом є заходи безпеки при роботі на обладнанні, в якому застосовується електростатичне поле, поле коронного розряду чи інше.

А от для сепарації зернових сумішей за пружністю, формою та коефіцієнтами тертя, а саме за цими фізико - механічними характеристиками, як правило вдається виділити з важкороздільних сумішей насіння важковідокремлюваних бур'янів певні рекомендації розроблені, створені і деякі види обладнання, наприклад, віброфрікційні сепаратори, ударні сепаратори, фрикційні сепаратори. [4-7, 11, 13]. При цьому два останні види названих сепараторів розроблені, як гравітаційні, прості за конструкцією, що працюють без втрат енергії на процес сепарації. Однак ударні сепаратори розроблені

тільки в останні роки, на них отримано всього декілька патентів, науково-дослідні роботи в їх удосконаленні продовжуються. А щодо фрикційних сепараторів, то їх розроблено усього два види, це похилі скатні поверхні та гвинтові сепаратори «Змійка». Тому розробка нових видів фрикційних сепараторів є безперечно актуальною важливою задачею.

Метою статті є обґрунтування та розробка фрикційного гравітаційного сепаратора зернових сумішей.

Матеріали та методи. В матеріалах статті застосовані теоретичні та розрахункові методи на базі положень вищої математики та теоретичної механіки з проведенням графоаналітичного аналізу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Серед більшості сепараторів насіння в тій чи іншій мірі для сепарації використовується сила тяжіння, як один з параметрів, що визначає той чи інший вид руху частинки (або групи частинок). Однак, практично у всіх випадках цей параметр присутній у поєднанні з іншими (за виключенням ударних сепараторів). Наприклад, в вібраційних використовуються такі параметри, як частота коливаль, сила тертя, кут нахилу деки та інші. Часто це призводить до складнощів в аналізі результатів роботи сепаратора. В цій роботі пропонується простий сепаратор для розділення насіння за силою тертя під дією сили тяжіння при русі частинки по криволінійній поверхні. Найбільш простими за конфігурацією є шарова та циліндрична поверхні, як найбільш освоєні в промисловості. Кінематики руху по таким поверхням аналогічні, тому зупинимось на циліндричній, як найбільш технологічній. Крім того, ця поверхня дозволяє забезпечувати необхідну продуктивність шляхом вибору її довжини по утворюючій. Радіус її має значення у виборі роздільної здатності сепаратора. Розглянемо рух матеріальної частинки (насінини) по циліндричній поверхні (половина циліндра в розрізі, або суцільного, або трубочастого). Розрахункова схема наведена на рис. 1.

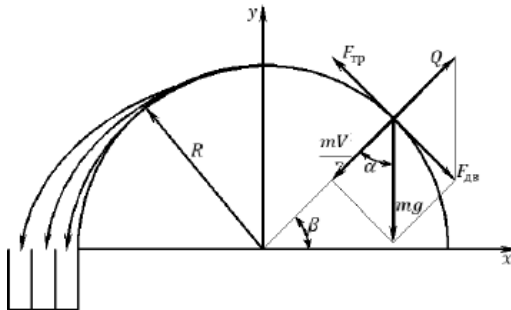


Рис. 1. Розрахункова схема

Частинка зісковзує з верхньої точки циліндра радіуса R під дією сили тяжіння mg , реакція циліндра Q та сила тертя $F_{тр}$. Спроєкуємо сили на радіальний напрямок, тобто на напрям доцентрової сили:

$$\frac{mV^2}{R} = mg \cos \alpha - Q,$$

де: V – швидкість частинки, м/с:

g – прискорення сили тяжіння, м/с².

В момент відриву $Q=0$.

Тоді:

$$\frac{mV^2}{R} = mg \cos \alpha. \quad (1)$$

За законом збереження енергії потенційна енергія частинки в верхній точці циліндра дорівнює сумі потенційної та кінетичній енергій в точці розриву:

$$mgR = mgR \cos \alpha + \frac{mV^2}{2}. \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) матимемо:

$$mgR = mgR \cos \alpha + \frac{mV^2}{2}, \quad mgR = R \frac{mV^2}{R} + \frac{mV^2}{2}.$$

Після скорочення на m отримаємо

$$gR = V^2 + \frac{V^2}{2}. \quad (3)$$

З (3) отримаємо:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{2}{3}g. \quad (4)$$

Звідси з урахуванням (1) отримаємо:

$$\cos \alpha = \frac{2}{3}. \quad (5)$$

Отже, без урахування тертя точка відриву на поверхні циліндру в кутовому вимірюванні постійна і обчислюється відповідно (5).

Враховуючи, що $\left(\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha\right)$, $\left(\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta\right)$,

тоді:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \sin \beta. \quad (6)$$

З (6) будемо мати:

$$\beta = \arcsin \frac{2}{3} = 41,8^\circ.$$

При цьому куті відбувається відрив частинки від поверхні циліндра. До цього значення кута частинка ковзає по поверхні без відриву, а округлі частинки скочуються, потрапляючи у відповідний приймач.

Проектуючи сили на вісь x , будемо мати:

$$F_{\text{дв}} \cos \alpha + Q \sin \alpha - \frac{mV^2}{R} \sin \alpha - F_{\text{тр}} \cos \alpha = 0. \quad (7)$$

Маючи на увазі, що $Q = 0$, $F_{\text{тр}} = f \frac{mV^2}{R} \sin \alpha$,

$$F_{\text{дв}} = mg \sin \alpha, \text{ отримаємо:}$$

$$mg \sin \alpha \cos \alpha - \frac{mV^2}{R} \sin \alpha - f \frac{mV^2}{R} \sin \alpha \cos \alpha = 0,$$

де f – коефіцієнт тертя.

Після відповідних перетворень матимемо:

$$g \cos \alpha - \frac{V^2}{R} - f \frac{V^2}{R} \cos \alpha = 0, \left(y - f \frac{V^2}{R}\right) \cos \alpha = \frac{V^2}{R}.$$

З (4) $\frac{V^2}{R} = \frac{2}{3}g$, тобто

$$\cos \alpha = \frac{2}{3}g \frac{1}{g - f \frac{2}{3}g} = \frac{2g}{3g - 2fg} = \frac{2}{3 - 2f} \quad (8)$$

З (8) випливає:

$$\alpha = \arccos \frac{2}{3 - 2f}. \quad (9)$$

Враховуючи (6) будемо мати:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{2}{3 - 2f}. \quad (10)$$

Таким чином, відповідно (10), матимемо кутову координату точки відриву частинки від поверхні циліндра. Зокрема при $f=0$ отримаємо:

$$\alpha = \arccos \frac{2}{3} = 41,8, \text{ що дає}$$

$$\beta = 90^\circ - 41,8 = 48,2^\circ$$

Для різноманітних значень коефіцієнта тертя на рис. 2 показана залежність кутової координати точки відриву, що дає можливість розташувати положення відповідних приймачів, α - висхідна крива, β -низхідна крива.

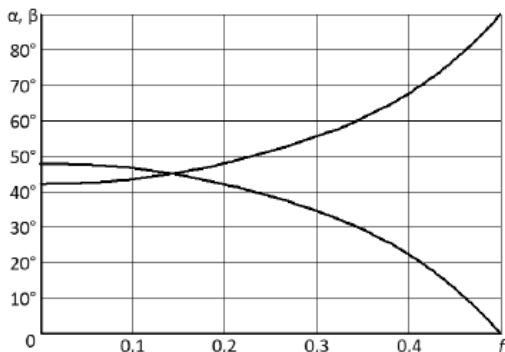
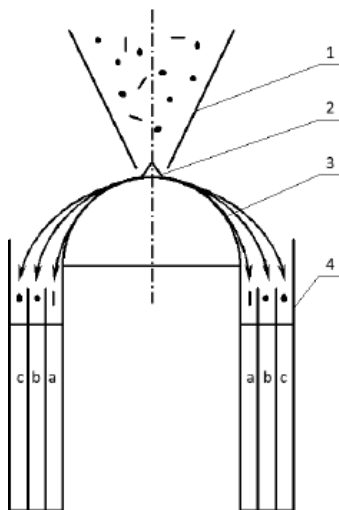


Рис. 2. Залежність кутової координати точки відриву від коефіцієнта тертя

Деякі траєкторії руху частинок показані на рис. 2. Відповідно цим вищеописаним міркуванням пропонується схема сепаратора показана на рис. 3.



**Рис. 3. Принципова схема гравітаційного сепаратора насіння:
1 – завантажувальний бункер; 2 – розсіювач; 3 – циліндр що сепарує;
4 – приймачі**

Працює сепаратор наступним чином. Зернова суміш з бункера 1 через розсікач 2, який запобігає затору насіння в зоні висипки, поступає на циліндричну поверхню, що сепарує. Насіння переміщуються до місця з кутом $\beta=48,2^\circ$ без відриву, а округлі скочуються і потрапляють в відповідні приймачі *c*. Після проходження місця з кутом $\beta=48,2^\circ$ відбувається розділення по тертю, причому частинки з меншим коефіцієнтом тертя потрапляють в приймачі *v*, а з більшим – в приймачі *a*.

Висновки. Таким чином проведений аналіз методів та способів очищення зернових сумішей від насіння важковідокремлюваних бур'янів показав можливість їх очищення за фрикційними властивостями. Запропонована та теоретично обґрунтована конструкція гравітаційного фрикційного сепаратора зернових сумішей. Отримана залежність кутової точки відриву частинки, що рухається по циліндричній поверхні сепаратора для різноманітних значень коефіцієнтів тертя, що дає можливість певного розташування відповідних приймачів.

Список джерел інформації / References

1. Бредихін В.В., Богомолов О.В., Сліпченко М.В. та ін. Наукові основи ошадної підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом. Монографія. Харків, Діса+: 2023. 408 с.

Bredykhin V.V., Bohomolov O.V., Slipchenko M.V. та ін. Naukovi osnovy oshhadnoyi pidhotovky nasynnya z polipshenym biolohichnym potentsialom. Monohrafiya. Kharkiv, Disa+: 2023. 408 s.

2. Богомолов А.В. Сепарація труднорозделимых сыпучих смесей. Монография: Х.: ХНТУСХ им. П. Василенко. 2013. 308 с.

Bohomolov A.V. Separatsiya trudnorazdelimyykh sypuchykh smesey. Monohrafiya: – КН.: КННТУСХ ім. П. Василенко. 2013. 308 с.

3. Кобец А.С., Чурсинов Ю.О., Черных С.А. та ін. Машины та обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна. Дніпропетровськ.: ДДАЕУ, 2014. 614 с.

Kobets A.S., Chursynov YU.O., Chernykh S.A. та ін. Mashyny ta obladnannya dlya zberihannya ta kompleksnoyi obrobky zerna. Dnipropetrovs'k.: DDAEU, 2014. 614 s.

4. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. М. Колос, 1978. 278 с.

Zayka P.M., Maznev H.E. Separatsyya semyan po kompleksu fyzyko-mekhanicheskyykh svoystv. М. – Kolos, 1978. – 278 s.

5. Патент на корисну модель. 62244. Україна МПК (2011.01) B07 V13/00. Багатоарусний ударний сепаратор / Богомолов О.В., Богомолова В.П., № 201014867; заяв 13.12.2010. опубл. 25.08.11, Бюл. №16.

Patent na korysnu model'. 62244. Ukrayina MPK (2011.01) V07 V13/00. Bahatoyarusnyu udarnyy separator / Bohomolov O.V., Bohomolova V.P., №

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2025. Вип. 2 (38). ISSN: 2312-3990X (Print) 2519-2922 (Online)

201014867; zayav 13.12.2010. opubl. 25.08.11, Byul. №16.

6. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О. Визначення раціональних параметрів сепарації насіння проса на гравітаційному ударному сепараторі. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Вип. 2. 2024 р.

6. Bohomolov O.V., Mykhaylov V.M., Bohomolov O.O. Vyznachennya ratsional'nykh parametrov separatsiyi nasinnya prosa na hravitatsiyonomu udarnomu separatori. Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho hospodarstva ta torhivli. Vyp. 2. 2024 r.

7. Богомолов О.О. Сепарація насіння проса за дільністю відскоку після удару об похилу відбивну поверхню. / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. 2024 р. Вип. 1 (35).

Bohomolov O.O. Separatsiya nasinnya prosa za dil'nistyuu vidskoku pislya udaru ob pokhylyu vidbyvnu poverkhnuyu. / Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho hospodarstva ta torhivli. V. 1 (35). 2024 r.

8. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І. та ін. Шляхи зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей. / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Вип. 1 (35). 2024р.

Bohomolov O.V., Mykhaylov V.M., Zavorodniy O.I. ta in. Shlyakhy znyzhennya enerhoymnosti protsesiv separatsiyi zernovykh sumishey. / Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho hospodarstva ta torhivli. Vyp. 1 (35). 2024 r.

9. Васильковский М.И., Васильковский А.М., Косинов М.М. и др. К созданию зерноочистительных машин нового поколения. Вісник ХДТУСГ «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». Вип. 22. Харків: 2003. с. 29-33.

Vasyl'kovskyy M.Y., Vasyl'kovskyy A.M., Kosynov M.M. y dr. K sozdanyuu zernoochystitel'nykh mashyn novoho pokolenyua. Visnyk KHDTUS-H «Suchasni napryamky tekhnolohiyi ta mekhanizatsiyi protsesiv pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv». Vyp. 22. Kharkiv: 2003. s. 29-33.

10. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Том 3, розділ 7. Очистка і сортування насіння / П.М. Заїка. Х: Око, 2006. 408 с.

Zayika P.M. Teoriya sil'skohospodars'kykh mashyn. Tom 3, rozdil 7. Ochystka i sortuvannya nasinnya / P.M. Zayika. KH: Oko, 2006. 408 s.

11. Гладков Н.Г. Сепарирование семян сельскохозяйственных культур по свойствам их поверхности: Автореф. дис. докт. наук. Волгоград 1964. 44 с.

Hladkov N.H. Separyrovanye semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur po svoystvam ykh poverkhnosti: Avtoref. dys. dokt. nauk. Volhohrad 1964. 44 s.

12. Гапонюк Н.Г. Пути снижения энергоёмкости зерноперерабатывающих производств. // Хранение и переработка зерна. 2002. №2. с. 59-60.

Harponyuk N.H. Puty snyzhenyua énerhoemkosti zernopererabatyvayushchykh proyzvodstv. // Khranenyu y pererabotka zerna. 2002. №2. s. 59-60.

13. Деклараційний патент №57958 Україна, МКВ В07 В13/00 Богомолів О.В., Токолов Ю.І., Зінченко М.О., Пристрій для розподілу зернових матеріалів за пружними властивостями. Заявл. 7.03.2002, Опубл. 15.07.2003 Бюл. №7.

Deklaratsiynyyu patent №57958 Ukrayina, MKV V07 V13/00 Bohomolov O.V., Tokolov YU.I., Zinchenko M.O., Prystryi dlya rozpodilu zernovykh materialiv za pruzhnymy vlastyvostyamy. Zayavl. 7.03.2002, Opubl. 15.07.2003 Byul. №7.

Богомолів Олексій Васильович, д. т. н., професор кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, bogomolov.ph@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7030>

Bogomolov Oleksiy, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Equipment and Engineering of Processing and Food Production State Biotechnological University, bogomolov.ph@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7030>

Михайлов Валерій Михайлович, доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, професор кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, e-mail: vami2209@gmail.com. ORCID 0000-0003-4335-1751

Mykhailov Valeriy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Scientific Work, Professor Department of Equipment and Engineering of Processing and Food Production, State Biotechnological University, e-mail: vami2209@gmail.com. ORCID 0000-0003-4335-1751

Богомолів Олександр Олексійович, аспірант кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, bogomolov25@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4137-0181>

Bogomolov Oleksandr, PhD student Department of equipment and engineering of processing and food production, State Biotechnological University, bogomolov25@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4137-0181>

Бойко Євгеній Володимирович, аспірант кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, oipxv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4340-165X>

Boiko Evgenii, PhD student Department of equipment and engineering of processing and food production, State Biotechnological University, oipxv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4340-165X>

Панов Віталій Олександрович, аспірант кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, oipxv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3574-8723>

Panov Vitaliy Oleksandrovich, PhD student Department of equipment and engineering of processing and food production, State Biotechnological University,

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2025. Вип. 2 (38). ISSN: 2312-3990X (Print) 2519-2922 (Online)

oipxv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3574-8723>

Бочарніков Ігор Олександрович, аспірант кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, bogomolov25@gmail.com

Bocharnikov Igor, PhD student Department of equipment and engineering of processing and food production, State Biotechnological University, bogomolov25@gmail.com

Прийнято 18.11.2025 р. Опубліковано 01.12.2025р.