



# Механізація, електрифікація

УДК 631.356.4

© 2019

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАЛЬНОГО РУХУ СПІРАЛІ ОЧИСНИКА КАРТОПЛІ ВІД ДОМІШОК

В.В. Адамчук<sup>1</sup>, В.М. Булгаков<sup>2</sup>, І.В. Головач<sup>3</sup>, З.В. Ружило<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>доктори технічних наук, професори, академіки НААН

<sup>3</sup>доктор технічних наук, професор, <sup>4</sup>кандидат технічних наук

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Інститут механізації  
та електрифікації сільського господарства»

вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха Васильківського р-ну Київської обл., 08631, Україна

<sup>2-4</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

e-mail: <sup>1</sup>vvadatchuk@gmail.com, <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua,

<sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>4</sup>ruzhylo@nubip.edu.ua

Надійшла 22.08.2019

**Мета.** Дослідити коливальний процес робочих спіралей очисника картоплі від домішок для інтенсифікації і підвищення якості технологічного процесу. **Методи.** Теоретичні дослідження здійснено за основними методами моделювання, вищої математики, теоретичної механіки та опору матеріалів. Зокрема, використано методи дослідження коливань пружних і деформованих стержнів Бернуллі-Ейлера та застосовано спеціальні функції Крилова, а також методи складання програм і проведення числового моделювання за допомогою ПК. **Результати.** Розроблено нову конструкцію очисника вороху від домішок, який застосовують під час викопування картоплі з ґрунту і складається він з консольно встановлених очисних спіральних пружин. При одночасних обертальному та коливальному рухах пружини дають можливість якісно очищувати і транспортувати бульби. Досягається це також за рахунок здатності спіралей самоочищуватись. Нами проведено теоретичні дослідження коливального руху очисника для визначення оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів. Складено нове диференціальне рівняння у частинних похідних коливань консольної очисної спіралі. Аналітичний розв'язок цього диференціального рівняння дав можливість отримати закон коливального процесу очисної спіралі по її довжині для будь-якого моменту часу та оцінити величину її деформації. **Висновки.** Під час проведення числового моделювання на ПК встановлено, що за кутової швидкості обертання спіралі, яка дорівнює  $\omega = 30 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , густині матеріалу, з якого виготовлена спіраль,  $\rho = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , модулі пружності  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , радіусі прутка очисної спіралі  $r = 8,5 \text{ мм}$  та рівномірно розподіленому навантаженні, інтенсивність

якого дорівнює  $1000 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}$ , повний прогин спіралі по її довжині змінюється у межах від 0 до 0,25 м, що забезпечує якість очищення та транспортування бульб картоплі за мінімальних втрат.

**Ключові слова:** бульба картоплі, викопування, ґрунтові домішки, консольна спіраль, коливання, диференціальне рівняння, числові розрахунки на ПК.

DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201909-08>

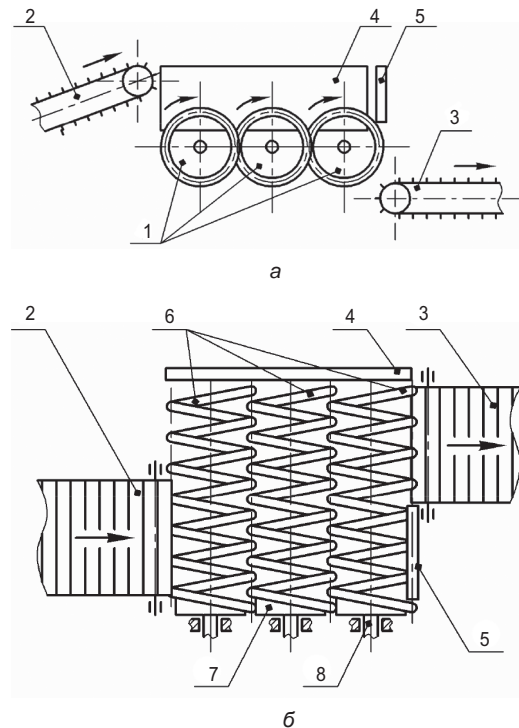
Однією із основних вимог до збирання картоплі є забезпечення якісного очищення картопляного вороху від ґрунтових і рослинних домішок, а також очищення самих бульб від налиплого ґрунту, зменшення їх пошкоджень і втрат. Очисні робочі органи, що застосовуються на сучасних картоплезбиральних машинах, не достатньо відповідають цим вимогам. Оскільки збирання врожаю картоплі часто відбувається у ґрунті підвищеної вологості та пластичності, то в очисних деталях іноді відбувається забивання сепарувальних зазорів липким вологим ґрунтом і рослинними рештками, що значно знижує можливість відводити домішки, а отже, і якість очищення бульб картоплі.

Найбільш відповідає високоякісним вимогам очищення бульб картоплі від домішок при їх викопуванні розроблений новий очисник спірального типу, конструктивна схема якого представлена на рис. 1.

Конструктивно цей очисник виконаний так, що процес руйнування викопаного з ґрунту картопляного вороху, його розділення на окремі компоненти і відведення ґрунтових домішок і рослинних решток за зону очистки відбувається на послідовно встановлених трьох очисних спіралях 1. Спіралі 1 одними своїми кінцями консольно закріплені на маточинах 7, встановлених на привідних валах 8, що забезпечують їм обертальні рухи в одному напрямі з певною кутовою швидкістю обертання. Другі (вільні) кінці 6 спіралей 1 під дією змінного навантаження здатні до коливальних рухів у повздовжньо-вертикальній площині. Подача вороху викопаних із ґрунту бульб картоплі здійснюється за допомогою подавального транспортера 2, а відведення очищених бульб картоплі зі спіралей 1 відбувається вивантажувальним транспортером 3. Для запобігання втратам бульб картоплі при виконанні технологічного процесу їх очищення від ґрунтових домішок і рослинних решток навколо спіралей 1 встановлено

торцевий 4 та бічний 5 захисні екрани прямокутної форми. Консольно розташовані очисні спіралі 1 встановлено зі взаємним перекриттям, що забезпечує їх самоочищення від вологого налиплого ґрунту.

Ефективне самоочищення очисних спіралей 1 відбувається за рахунок їх коливальних рухів, унаслідок яких виникає змінна деформація самих спіралей 1, а саме — їх поздовжній розтяг і поперечний згин. У результаті відстань між сусідніми витками спіралей 1,



**Рис. 1.** Спіральний очисник вороху картоплі: а — вигляд збоку; б — вигляд зверху; 1 — очисні спіралі; 2 — подавальний транспортер; 3 — вивантажувальний транспортер; 4 — торцевий захисний екран; 5 — бічний захисний екран; 6 — вільні кінці спіралей; 7 — маточини; 8 — привідні вали

тобто їх крок увесь час змінюється. Це сприяє відриванню (і стисканню) налиплого у міжвитковому просторі ґрунту і просіюванню його вниз за межі очисника. Так, у цьому очиснику картопляного вороху відбувається не тільки самоочищення очисних спіралей 1, а й інтенсивна сепарація ґрунтових домішок і рослинних решток крізь зазори між витками спіралей 1, а також і між самими спіралями 1.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі створення і дослідження сепараторів картопляного вороху присвячено наукові праці [1–8]. Однак, як було зазначено вище, очисні робочі органи, що розглядалися у цих наукових працях, мають істотний недолік — залипання очисних зазорів ґрунтом і рослинними рештками під час роботи на ґрунтах підвищеної вологості, що значно знижує їх сепарувальні можливості. Нами було розроблено спіральний сепаратор [9], здатний не тільки ефективно очищувати бульби картоплі від домішок, а й самоочищуватись від налиплого ґрунту. Ми також провели його випробування та попередні дослідження [10, 11, 15]. Для оптимізації конструктивних і кінематичних параметрів очисника необхідні теоретичні дослідження роботи його робочих органів.

Дослідження зігнутої осі балки можна проводити за допомогою диференціального рівняння для випадку навантаження вільною системою сил і моментом на кінці [16] або на основі рівнянь сумісності деформацій [17]. У спрощеному вигляді такі розрахунки прогину можна також проводити за допомогою рівнянь, які отримав С.П. Тимошенко [18]. Але в цих випадках розглядаються балки (стержні) постійного поперечного перерізу зі сталими властивостями. Для спіралі, момент інерції якої є функцією поздовжньої координати і часу, ці методи не дають нової інформації. Тому для цього дослідження найбільш доцільним є застосування диференціального рівняння поперечних згинальних коливань деформованих стержнів Бернуллі-Ейлера, яке складається із співвідношення кривизни при згині та диференціального рівняння статичного згину Я. Бернуллі і доданого до нього Л. Ейлером динамічного члена, що враховує сили поперечної інерції. Для вільних коливань права частина рівняння дорівнюватиме нулю, а у разі змушуючої зовнішньої дії на стержень права частина

рівняння приймає вигляд цієї функції змушення. При рівномірно розподіленому в часі та по поздовжній координаті навантаженні права частина рівняння приймає вигляд рівномірно розподіленого навантаження.

**Мета досліджень** — дослідити коливальний процес робочих спіралей очисника картоплі від домішок для інтенсифікації і підвищення якості технологічного процесу.

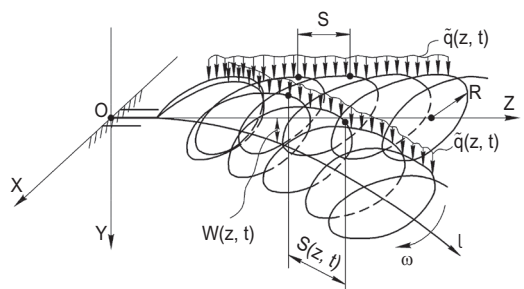
**Матеріали та методи.** Теоретичні дослідження здійснено шляхом використання основних методів моделювання, вищої математики, теоретичної механіки та опору матеріалів, зокрема методів дослідження коливань пружних і деформованих стержнів Бернуллі-Ейлера та застосування спеціальних функцій Крилова, а також методів складання програм і проведення числового моделювання за допомогою ПК.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Оскільки важливу роль у технологічному процесі очищення бульб картоплі від ґрунту і рослинних домішок відіграє коливальний рух консольних очисних спіралей, то виникає необхідність перш за все аналітично дослідити цей коливальний процес.

Для цього необхідно, насамперед, побудувати математичну модель коливального процесу спіралей під дією змінного навантаження.

Побудуємо еквівалентну схему коливань консольно закріпленої на привідному валу спіралі, яка обертається та перебуває під дією зовнішнього навантаження, зумовленого картопляним ворохом, що на ній знаходиться (рис. 2).

На еквівалентній схемі (рис. 2) показано очисну спіраль у двох положеннях:



**Рис. 2.** Еквівалентна схема коливань спіральних пружин сепаратора картопляного вороху

у недеформованому стані, коли її поздовжня вісь співпадає із віссю OZ, і в zdeформованому стані, коли її поздовжня вісь зазнала прогину під дією змінного розподіленого навантаження, що позначене  $\tilde{q}(z, t)$ . Це навантаження виникає унаслідок неперервного поступання картопляного вороху із завантажувального транспортера на поверхню очисних спіралей. На схемі показано крок S недеформованої спіралі, який по всій довжині спіралі має постійне значення, а також крок  $S(z, t)$  спіралі, що зазнала деформування під дією зовнішнього навантаження. Цей крок zdeформованої спіралі змінний по довжині самої спіралі і залежить від часу внаслідок коливального руху спіралі. Прогин поздовжньої осі спіралі, позначений  $W(z, t)$ , також є змінним по довжині її осі (координата  $z$ ) і залежить від часу (параметр  $t$ ) в результаті коливального руху спіралі.  $R$  — радіус спіралі,  $\omega$  — кутова швидкість обертального руху спіралі навколо своєї поздовжньої осі (напрямок обертання показаний стрілкою).

Дослідження поперечних коливань консольної очисної спіралі здійснюватимемо в абсолютній системі координат OXYZ, де вісь OZ спрямована по поздовжній осі недеформованої спіралі, вісь OY напрямлена вниз, а вісь OX — перпендикулярно площині OYZ. Поздовжню вісь зігнутої спіралі позначимо через Ol.

Отже, є всі підстави для теоретичного розгляду процесу колювання спіралі очисника картопляного вороху як пружного стержня, що виконаний у вигляді циліндричної пружини радіусом  $R$  із кроком навивки  $S$  і кутом  $\gamma$  підйому гвинтової лінії по осі спіралі.

Відразу зазначимо, що в експлуатаційних умовах, при змінному навантаженні по довжині спіралі та згідно зі змінними властивостями самої спіралі до піддатливості деформаціям згину і кручення, параметр кроку спіралі  $S$  стає змінним по довжині й ця зміна не відповідає закону плоских перерізів.

Для спрощення розгляду в цьому випадку і, враховуючи жорсткість спіралі, замінимо криволінійний стержень консоллю із приведеними параметрами.

А тому в нашому випадку згинальні коливання спіралі (умовно — стержня) є можливістю описати таким рівнянням [19]:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( E \cdot I_R \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \rho \cdot F \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \tilde{q}(z, t), \quad (1)$$

де  $W$  — прогин повздовжньої осі спіралі;  $\tilde{q}(z, t)$  — розподілене і змінне в часі навантаження очисної спіралі картопляним ворохом;  $\rho$  — густина матеріалу, з якого виготовлена спіраль;  $F$  — площа поперечного перерізу прутка очисної спіралі;  $E$  — модуль Юнга;  $I_R$  — приведений осьовий момент інерції перерізу спіралі.

У класичній теорії згину приймається гіпотеза, згідно з якою плоскі перерізи зберігають свою площинність і після згину, а сама деформація згину напрямлена по нормалі до поздовжніх волокон стержня. Тобто для спрощення теоретичних досліджень у нашому випадку приймається положення, що відбувається плоский згин.

Розв'язком диференціального рівняння (1) є залежність прогину консолі по довжині для випадку власних і вимушених коливань [20, 21].

Отже, для диференціального рівняння (1) згідно з методикою [20, 21] його загальний розв'язок матиме такий вигляд:

$$W = \left[ AS(\lambda z) + BT(\lambda z) + CU(\lambda z) + DV(\lambda z) \right] \times \cos(\omega \cdot k \cdot t) + \frac{qL^2 \left( \frac{z^4}{L^2} - \frac{2z^3}{L} + 6z^2 \right)}{24E \cdot I_R}, \quad (2)$$

де  $S(\lambda z)$ ,  $T(\lambda z)$ ,  $U(\lambda z)$  і  $V(\lambda z)$  — спеціальні функції Кривої;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  — сталі, які

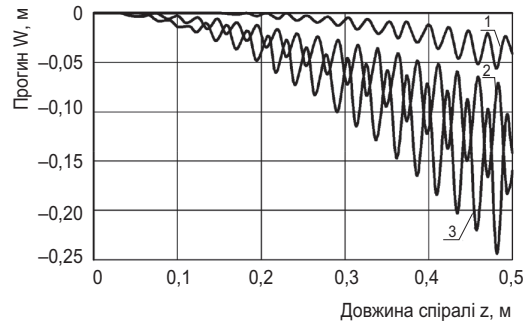


Рис. 3. Залежність повного прогину  $W$  осі спіралі від її довжини  $z$  при власних згинальних коливаннях і дії рівномірно розподіленого навантаження: в моменти часу: 1 -  $t=0$  с; 2 -  $t=0,05$  с; 3 -  $t=0,25$  с

визначаються з граничних умов;  $\lambda$  — спектр власних значень частот коливань;  $k$  — кратність коливань (відношення частоти власних коливань до кутової швидкості обертання спіралі);  $L$  — довжина спіралі.

Розв'язок цього диференціального рівняння (2) є залежністю, що відображає процес коливання консольної спіралі як функцію конструктивних параметрів спіралі та властивостей матеріалу.

Оскільки коефіцієнти при функції Крилова мають певні числові значення для кожного положення спіралі, то розв'язок (2) диференціального рівняння (1) можна реалізувати

на ПК у вигляді графічних залежностей, враховуючи такі конструктивні, кінематичні та силові параметри: при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega = 30 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , густині матеріалу (пружинна сталь), з якого виготовлена спіраль,  $\rho = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , модулі пружності  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , радіусі прутка спіралі  $r = 8,5 \text{ мм}$  при дії рівномірно розподіленого навантаження з інтенсивністю  $1000 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$  в моменти часу: 1) 0 с; 2) 0,05 с; 3) 0,25 с (рис. 3).

При одночасному врахуванні впливу коливань ненавантаженої спіралі та коливань під дією розподіленого навантаження прогин осі спіралі змінюється у межах від 0 до 0,25 м.

## Висновки

Побудовано розрахункову математичну модель коливань робочих органів спірального сепаратора картопляного вороху, внаслідок чого складено диференціальне рівняння поперечних згинаючих коливань його консольної очисної спіралі.

На основі розв'язку диференціального рівняння поперечних згинальних коливань очисної спіралі отримано аналітичні вирази, які описують закон коливального процесу і прогин спіралі в довільний

момент часу для будь-якої точки її повздовжньої осі.

При кутовій швидкості обертання спіралі, що дорівнює  $\omega = 30 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , густині матеріалу, з якого виготовлена спіраль,  $\rho = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , модулі пружності  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , радіусі прутка  $r = 8,5 \text{ мм}$ , рівномірно розподіленому навантаженні спіралі картопляним ворохом інтенсивністю  $1000 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$  повний прогин спіралі по її довжині змінюється у межах від 0 до 0,25 м.

Адамчук В.В.<sup>1</sup>, Булгаков В.М.<sup>2</sup>, Головач І.В.<sup>3</sup>, Ружило З.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ННЦ «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», ул. Вокзальная, 11, пгт Глеваха Васильковского р-на Киевской обл., 08631, Украина; <sup>2-4</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Обороны, 15, г. Киев, 03041, Украина; e-mail: <sup>1</sup>vadamchuk@gmail.com, <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>4</sup>ruzhylo@nubip.edu.ua

**Математическая модель колебательного движения спирали очистителя картофеля от примесей**

**Цель.** Исследовать колебательный процесс рабочих спиралей очистителя картофеля от примесей для интенсификации и повышения качества технологического процесса. **Методы.** Теоретические исследования проведены с использованием основных методов моделирования, высшей математики, теоретической механики и сопротивления материалов. В частности, использованы методы исследования

колебаний упругих и деформированных стержней Бернулли-Эйлера и применены специальные функции Крылова, а также методы составления программ и проведения численного моделирования с помощью ПК. **Результаты.** Разработана новая конструкция очистителя вороха от примесей, который применяется при выкапывании картофеля из почвы и состоит из консольно установленных очистных спиральных пружин. При одновременных вращательном и колебательном движениях пружины дают возможность качественно очищать и транспортировать клубни. Достигается это также за счет способности спиралей самоочищаться. Нами проведены теоретические исследования колебательного движения очистителя для определения оптимальных конструктивных и кинематических параметров. Составлено новое дифференциальное уравнение в частных производных колебаний консольной очистительной спирали. Аналитическое решение этого дифференциального уравнения позволило получить закон колебательного процесса очистительной спирали по ее длине для любого момента времени



и оценить величину ее деформации. **Выводы.** При проведении численного моделирования на ПК было установлено, что при угловой скорости вращения спирали, равной  $\omega = 30 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , плотности материала, из которого изготовлена спираль  $\rho = 7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , модуля упругости  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , радиусе прутка очистительной спирали  $r = 8,5 \text{ мм}$  и равномерно распределенной нагрузке, равной  $1000 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$  полный прогиб спирали по ее длине изменяется в пределах от 0 до 0,25 м, что обеспечивает качество очистки и транспортировки клубней картофеля.

**Ключевые слова:** клубень картофеля, выкапывание, грунтовые примеси, консольная спираль, колебания, дифференциальное уравнение, числовые расчеты на ПК.

DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201909-08>

Adamchuk V.<sup>1</sup>, Bulgakov V.<sup>2</sup>, Holovach I.<sup>3</sup>, Ruzhlyo Z.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Scientific Centre Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 11 Vokzalna Str., Hlevakha township, Vasilkovsky district, Kyiv oblast, 08631, Ukraine, <sup>2-4</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: <sup>1</sup>[vvadamchuk@gmail.com](mailto:vvadamchuk@gmail.com), <sup>2</sup>[vbulgakov@meta.ua](mailto:vbulgakov@meta.ua), <sup>3</sup>[holovach.iv@gmail.com](mailto:holovach.iv@gmail.com), <sup>4</sup>[ruzhlyo@nubip.edu.ua](mailto:ruzhlyo@nubip.edu.ua)

#### Mathematical model of oscillating motion of spiral of cleanser of potato from admixtures

**The purpose.** To study oscillating process of working spirals of cleanser of potato from admixtures for intensification and improvement of quality of the process. **Methods.** Theoretical researches are carried out with the use of basic methods of

simulation, higher mathematics, theoretical mechanics and strength of materials. In particular, methods of research of oscillations of elastic and strained Bernulli-Eiler rods are used. Krylov's special functions, and also methods of creation of programs and numerical modeling by means of PC are applied. **Results.** New construction of cleanser of heap from admixtures which is applied at digging up of potato from soil is developed and consists of console installed clearing spiral springs. At simultaneous rotational and oscillating movements springs qualitatively clear and carry tubers. Simultaneously spirals self-clean themselves. Theoretical researches of oscillating motion of cleanser made it possible to determine optimum constructive and kinematic parameters. New differential partial equation of oscillations of console cleaning spiral was made. Analytical solution of that equation had allowed to gain the law of oscillating process of cleaning spiral in view of its length for any instant and to evaluate its deformation. **Conclusions.** At modeling on the PC it has been established that at angular velocity of twirl of spiral equal to  $30 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , density of material of spiral equal to  $7700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , coefficient of elasticity equal to  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , radius of a bar of cleaning spiral equal to 8,5 mm, and uniformly distributed load, equal to  $1000 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ , the full sag of a spiral on its length varies within the limits from 0 up to 0,25 m. That ensures quality of cleaning and transportation of tubers of potato.

**Key words:** tuber of potato, digging up, soil admixtures, console spiral, oscillations, differential equation, numerical calculations on the PC.

DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201909-08>

## Бібліографія

1. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. Москва: Машиностроение, 1984. 320 с.

2. Батяев Ф.И. Автоматическая сепарация примесей от клубней (к механизации уборки картофеля). Картофель и овощи. 1967. № 6. С. 16–17.

3. Батяев Ф.И., Карев Е.Б., Петров Г.Д. Состояние и перспективы развития рабочих органов для отделения клубней картофеля от примесей при комбайновой уборке. Москва, 1972. 63 с.

4. Верещагин Н.И., Пшеченков К.А. Рабочие органы для возделывания, уборки и сортирования картофеля. Москва: Машиностроение, 1965. 241 с.

5. Егошин А.В., Кропотов Е.И. К вопросу отделения клубней картофеля от примесей и гнилей. Исследование машин и рабочих органов для возделывания и уборки картофеля, овощных и зерновых культур: сб. научн. тр. Нижегородского СХИ, Н.-Новгород, 1991. С. 55–57.

6. Колчин Н.Н., Фурлетов В.М., Арсеньев Д.А.

Состояние и перспективы развития отделителей примесей для послеуборочной обработки картофеля и овощей. Москва: ВИСХОМ, 1986. 65 с.

7. Karwowski T. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. Т. 3. Warszawa: PWRiL, 1982. 429 с.

8. Булгаков В.М., Зиков П.Ю. та ін. Очисник вороху коренебульбоплодів від домішок: пат. України № 43907, А 01 D 33/08. Опубл. 15.01.2002 р. Бюл. № 1.

9. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Ilnatiev Y. Investigation of the influence of the parameters of the experimental spiral potato heap separator on the quality of work. *Agronomy Research*. 2017. V. 15, № 1. P. 44–54.

10. Bulgakov V., Smolinskiy S., Frančák J., Jech J. Optimalizovanie konstrukcie rozdrúzovaca zemiakov. GRONECH NITRA 2001. Pol'nohospodarska technika na zaciatku 21 storocia: Zbornik z medzinarodnej vedeckej konferencie. Slovenska

pol'nohospodarska univerzita v Nitre. Nitra, Slovenska republika, 2001. P. 73–79. <https://doi.org/10.15584/eti.2017.3.13>

11. *Митрофанов В.С.* Физико-механические свойства картофеля. В кн. «Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин». Т. 5, Москва-Ленинград: Машгиз, 1940. С. 629–634.

12. *Василенко П.М.* Введение в земледельческую механику. Киев: Сельхозобразование, 1996. 234 с.

13. *Фаворин М.В.* Моменты инерции тел: справочник. Москва: Машиностроение, 1997. 511 с.

14. *Bulgakov V., Smolinsky S., Plizga K.* Theoretical Research on Parameters of Working Bodies in the Spiral Separator of Potato Lots at Working Loading. Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. V. 2. Lublin, Poland. 2002. P. 31–34.

15. *Светлицкий В.А.* Механика стержней.

В 2-х ч. Москва: Наука, 1967. Ч. 2. Динамика. 304 с.

16. *Челомей В.Н.* Избранные труды. Москва: Машиностроение, 1989. 336 с.

17. *Заика П.М.* Избранные задачи земледельческой механики. Киев: УСХА, 1992. 512 с.

18. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. Москва: Физматгиз, 1959. 327 с.

19. *Вибрации в технике: справочник.* В 6-ти т.; ред. совет: В.Н. Челомей. Москва: Машиностроение, 1981. Т. 1. 356 с.

20. *Долгов Н.М.* Элементы динамики систем на подвижных деформируемых основаниях. Киев: Техника, 1996. 92 с.

21. *Долгов Н.М.* Высшая математика. Киев: Вища школа, 1988. 416 с.

22. *Ананьев И.В., Тимофеев П.Г.* Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование. Москва: Машиностроение, 1965. 526 с.