



Механізація, електрифікація

УДК 631.358.44/45

© 2017

В.М. Булгаков,
академік НААН,
доктор технічних наук
Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України

В.В. Адамчук,
академік НААН,
доктор технічних наук
Національний науковий
центр «Інститут
механізації та
електрифікації
сільського господарства»

І.В. Головач,
доктор технічних наук

С.В. Смолінський,
кандидат технічних наук
Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України

Є.І. Ігнат'єв
Таврійський державний
агротехнологічний
університет

ТЕОРІЯ ВІДБИВАННЯ БУЛЬБ КАРТОПЛІ ПІД ЧАС РОБОТИ СПІРАЛЬНОГО СЕПАРАТОРА

Мета. Підвищення ефективності та якості виконання технологічного процесу сепарації картопляного вороху способом удосконалення конструкції спірального сепаратора вібраційного типу і теоретичного обґрунтування його раціональних параметрів за умови виключення пошкоджень бульб картоплі.

Методи. Теоретичні дослідження вдосконаленого сепаратора картопляного вороху проводили з використанням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, методів складання програми для числових розрахунків на ПК та побудови графічних залежностей і їх аналізу. **Результати.** Розроблено еквівалентну схему та отримано нові аналітичні залежності взаємодії бульби картоплі з поверхнею консольних спіральних пружин, на основі яких досліджено кінематичні характеристики польоту бульби до її ударного контакту з еластичною поверхнею відбиваючого транспортера. **Висновки.** Побудовано нову розрахункову математичну модель польоту бульби картоплі і її взаємодії з поверхнею спірального сепаратора та удару об відбивальний транспортер. На основі отриманих аналітичних залежностей та їх розв'язування на ПК теоретично досліджено раціональні кінематичні параметри спірального сепаратора картоплезбиральної машини вдосконаленої конструкції за умови непошкодження бульб картоплі.

Ключові слова: картопля, бульба, спіральний сепаратор, сепарація домішок, еквівалентна схема, рівняння руху, відбивання.

Картоплярство є однією з енерго- і матеріалоємних галузей сільського господарства, оскільки лише за енерговитратами

перевищує питомі витрати енергії на виробництво одиниці зернових у 4–5 разів. Тому за подальшої розробки і вдосконалення

робочих органів картоплезбиральних машин і оптимізації їх параметрів потрібно забезпечити зменшення матеріало- і енергоємності зі значним підвищенням якості отриманої продукції. Питомі енерговитрати виробництва одиниці продукції вітчизняними картоплезбиральними машинами в 1,6–2,2 раза більші, ніж у країнах Західної Європи.

Аналіз технологічних схем картоплезбиральної техніки свідчить про те, що найбільша частка маси всієї машини припадає на сепарувальні робочі органи, оскільки зі збільшенням їх кількості і тривалості сепарації картопляного вороху досягається підвищення чистоти отриманої продукції. Це пояснюється тим, що очисні робочі органи є основною ланкою в забезпеченні якісних показників роботи картоплезбиральної машини загалом.

Для підвищення показників якості роботи картоплезбиральних машин було розроблено конструкцію спірального сепаратора картопляного вороху, захищену патентом України [1]. Сепаратор складається з 3-х послідовно встановлених привідних гвинтових спіралей, які виконані у вигляді консольних

спіральних пружин, закріплених у маточинах (рис. 1).

Експериментальні дослідження очисника [2] на прикладі роботи в технологічній схемі однорядного картоплекопача підтвердили ефективність його застосування на картоплезбиральних машинах. Проте виявлено, що деяка частка бульб картоплі і ґрунтових грудок з розмірно-масовими характеристиками, подібними до бульб, перелітає через наступні спіралі сепаратора, що призводить до втрат і погіршення якості їх очищення. Крім того, виникає складність у підвищенні продуктивності сепаратора через обмеженість значень кутових швидкостей спіралей. Щоб бульби картоплі не перелітали через сепаратор, запропоновано вдосконалену конструкцію спірального сепаратора, яка вирізняється тим, що над спіралями встановлений під деяким кутом до лінії, яка утворена центрами осей спіралей сепаратора, відбивальний стрічковий (гумовий) гладкий транспортер. При цьому бульба картоплі, що відірвалася від поверхні спіралі, ударяється об відбивальний транспортер і повертається на сепарувальну поверхню.

Аналіз досліджень і публікацій. Сепаратори картопляного вороху мають не лише забезпечувати надійне та якісне виконання технологічного процесу, а й постійно самоочищатися в процесі роботи. Системи сепарувальних робочих органів, які застосовують на серійних картоплезбиральних комбайнах, не завжди забезпечують високий ступінь сепарації ґрунтових домішок [3]. Відбувається це найчастіше в результаті інтенсивного залипання поверхонь сепарувальних робочих органів вологим ґрунтом.

Над проблемою створення ефективних і надійних у роботі сепараторів картопляного вороху під час його збирання та очисників, які застосовують на стаціонарних картоплеочисних пунктах, працювало багато дослідників і конструкторів [4–8]. Однак попри велику кількість технологічних процесів очищення картопляного вороху під час збирання досліджень з оптимізації кінематичних і конструктивних параметрів спіральних сепараторів відносно мало.

Мета досліджень — підвищення ефективності та якості виконання технологічного процесу сепарації картопляного вороху

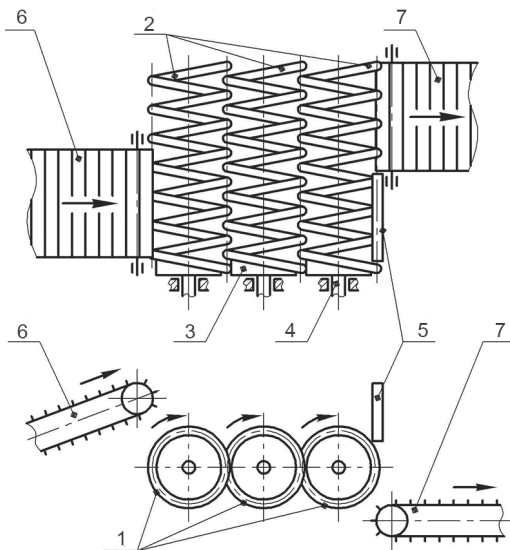


Рис. 1. Конструктивна схема спірального сепаратора картопляного вороху: 1 — спіральні вальці; 2 — консольні спіральні пружини; 3 — маточина; 4 — привідний вал; 5 — захисний щиток; 6 — транспортер, що подає ворох; 7 — відповідний транспортер

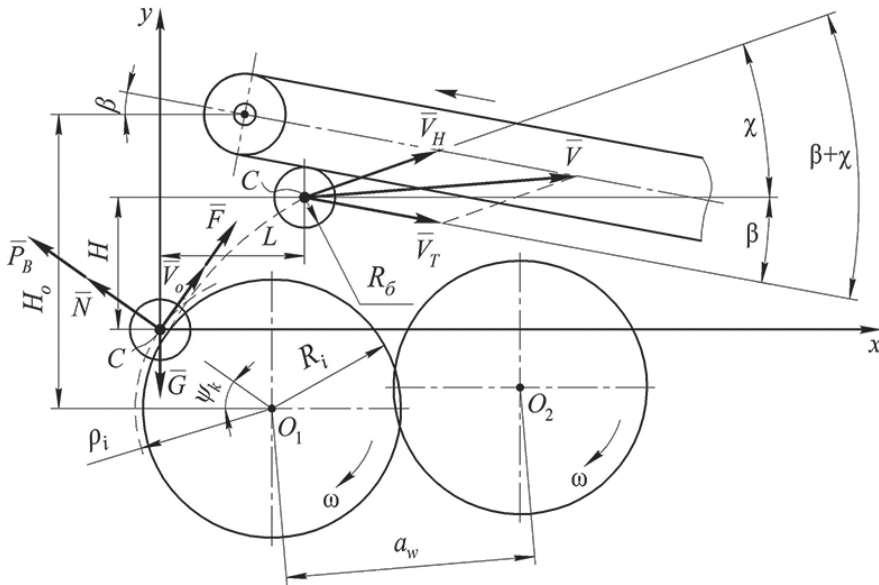


Рис. 2. Еквівалентна схема польоту бульби в спіральному сепараторі вдосконаленої конструкції

способом удосконалення конструкції спірального сепаратора вібраційного типу та теоретичного обґрунтування його раціональних параметрів за умови виключення пошкоджень бульб картоплі.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження вдосконаленого сепаратора картопляного вороху проводили з використанням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, методів складання програми для числових розрахунків на ПК та побудови графічних залежностей і їх аналізу.

Результати досліджень. Теоретичне обґрунтування параметрів вдосконаленого спірального сепаратора картопляного вороху здійснено побудовою математичної моделі взаємодії бульби картоплі, яка виштовхується з поверхні спірального сепаратора вгору і взаємодіє з гумовою поверхнею встановленого зверху відбивального стрічкового транспортера.

Для цього насамперед потрібно побудувати еквівалентну схему виштовхування, подальшого польоту і відхилення бульби картоплі під час роботи спірального сепаратора вдосконаленої конструкції (рис. 2). Покажемо на еквівалентній схемі конструктивні елементи вдосконаленого спірального

сепаратора, позначимо їх кінематичні і конструктивні параметри, до бульби картоплі прикладемо діючі на неї сили.

Бульбу картоплі послідовно розглянемо в 2-х положеннях: під час виштовхування зі спірального сепаратора і під час її ударного контакту з поверхнею відбивального стрічкового транспортера. Для спрощення аналітичних викладок тіло бульби картоплі апроксимуємо кулею. Розглянемо рух бульби картоплі з формою, близькою до кулі встановленого радіуса R_o , по поверхні спірального сепаратора із зовнішнім радіусом R_i , кроком навивки S і діаметром прутка спіралі d_n . Спіралі встановлено послідовно з міжцентровою відстанню a_w і деяким перекриттям. Обертання спіралей навколо власної осі відбувається за напрямом годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω . Припустимо, що в русі спіраль — гладенька циліндрична поверхня.

Положення бульби на поверхні спіралі в значатиметься деякими радіальним ρ_i і кутовим ψ_i параметрами. Взаємодія бульби картоплі з поверхнею спіралі можлива в 2-х варіантах: під час руху по поверхні навивки з контактом в одній точці і під час руху в міжвитковому просторі спіралей [2]. Тому радіальний параметр у цих випадках дорівнюватиме:

під час руху в міжвитковому просторі:

$$\rho_i = \left(R_i - \frac{d_n}{2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{(d_n - 2R_6)^2 - S^2}, \quad (1)$$

під час руху по зовнішній поверхні спіралі:

$$\rho_i = R_i + R_6. \quad (2)$$

Досягнувши певного значення кутового параметра ψ_k , бульба картоплі відривається від поверхні спіралі. Це можливо за умови, що нормальна реакція спіральної навивки буде $N \geq 0$. Для цього розглянемо дію сил на бульбу масою m із центром у точці C : \vec{G} — сила тяжіння; \vec{N} — сила нормальної реакції спіралі, напрямлена по нормалі до траєкторії відносного руху тіла по спіралі; \vec{F} — сила тертя ковзання тіла по поверхні спіралі; \vec{P}_b — відцентрова сила інерції, напрямлена по нормалі до траєкторії руху. Спроекуємо всі сили на нормальну вісь системи координат із початком відліку в центрі бульби C . Маємо:

$$m a_n = N + P_b - G \sin \psi_k. \quad (3)$$

Оскільки рух відбувається лише у напрямі дотичної осі, то $a_n = 0$, і

$$N + P_b - G \sin \psi_k = 0. \quad (4)$$

Тоді за умови відриву визначаємо значення кутового параметра ψ_k , за якого бульба картоплі відривається від поверхні спіралі:

$$\sin \psi_k \geq \frac{P_b}{G}. \quad (5)$$

Оскільки $G = mg$, $P_b = m\omega^2 \rho_i$, то:

$$\psi_k \geq \arcsin \frac{\omega^2 \rho_i}{g}. \quad (6)$$

Визначимо точку дотику (удару) бульби картоплі з відбивальним транспортером і швидкість, якої досягає вона в цій точці. Для цього припустимо, що бульба, відриваючись від поверхні спіралі за кутового положення ψ_k , має швидкість $V_0 = \omega \rho_i$.

Згідно з відомими залежностями [5, 9, 10] дальність і висота польоту бульби картоплі визначатимуться з таких виразів:

$$L = V_0 t \cdot \cos \psi_k \quad (7)$$

та

$$H = V_0 t \cdot \sin \psi_k - \frac{gt^2}{2}. \quad (8)$$

Виключаючи із залежностей (7) та (8) параметр часу t і об'єднавши їх, отримаємо вираз, який описує траєкторію руху центра бульби картоплі як залежність висоти польоту від дальності:

$$H(L) = L \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gL^2}{2V_0^2 \cos^2 \psi_k}. \quad (9)$$

При цьому в точці з висотою H бульба картоплі матиме таку швидкість руху:

$$V_H = \sqrt{V_0^2 - 2gH} = \sqrt{V_0^2 - 2g \left(L \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gL^2}{2V_0^2 \cos^2 \psi_k} \right)}. \quad (10)$$

Якщо через центр C бульби картоплі провести систему координат xCy з горизонтальною віссю x і вертикальною віссю y і замінити у виразі (9) параметри L і H на поточні координати x і y відповідно, то закон польоту бульби в цій системі координат набуде вигляду:

$$y(x) = x \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2 \psi_k}. \quad (11)$$

У конструкції вдосконаленого спірального сепаратора картопляного вороху на висоті H_0 від центра першої спіралі встановлено відбивальний стрічковий транспортер, установлений під кутом β до горизонту з нахилом у бік транспортування технологічної маси. Його поверхня (нижня робоча гілка) описуватиметься у тій самій системі координат рівнянням:

$$y(x) = H_0 - (\rho_i + R_6) \sin \psi_k - x \operatorname{tg} \beta. \quad (12)$$

Очевидно, що точка C контакту бульби картоплі з відбивальним транспортером є точкою перетину траєкторії (11) польоту бульби з поверхнею транспортера (площина, яка описана виразом (12)), тому координати точки зазначеного контакту в системі координат xCy можна визначити, розв'язавши системи рівнянь (11) і (12). Оскільки ліві частини зазначених рівнянь будуть у цьому разі рівними між собою, то, прирівнюючи праві частини цих рівнянь, після деяких перетворень отримаємо квадратне рівняння відносно невідомої координати x :

$$\frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2 \psi_k} - (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \psi_k) x + [H_0 - (\rho_i + R_6) \sin \psi_k] = 0. \quad (13)$$

Розв'язуючи отримане рівняння, знаходимо величину дальності польоту бульби картоплі до взаємодії зі стрічковим відбивальним транспортером:

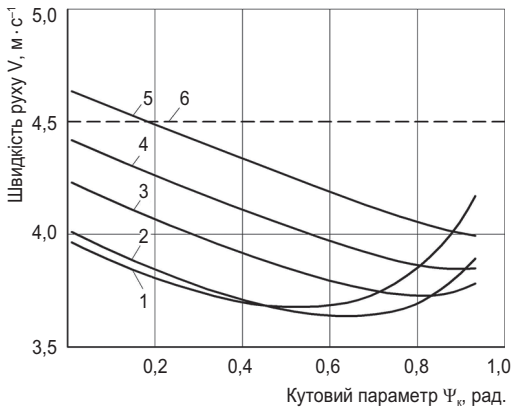


Рис. 3. Залежність швидкості руху бульби від кутового параметра ψ_k за різних значень радіального параметра ρ : 1 – $\rho = 0,24$ м; 2 – $\rho = 0,27$ м; 3 – $\rho = 0,32$ м; 4 – $\rho = 0,35$ м; 5 – $\rho = 0,38$ м; 6 – обмеження швидкості руху за умови непошкодження бульб

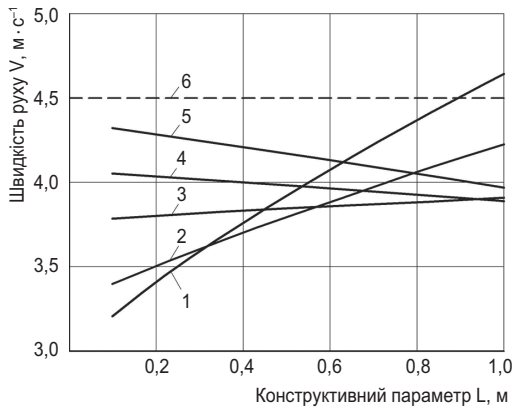


Рис. 4. Залежність швидкості руху бульби від конструктивного параметра L за різних значень радіального параметра ρ : 1 – $\rho = 0,24$ м; 2 – $\rho = 0,27$ м; 3 – $\rho = 0,32$ м; 4 – $\rho = 0,35$ м; 5 – $\rho = 0,38$ м; 6 – обмеження швидкості руху за умови непошкодження бульб

$$x = \frac{V_0^2 \cos^2 \psi_k}{g} \cdot \left\{ \left(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \psi_k \right) + \sqrt{\left(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \psi_k \right)^2 - \frac{2g \left[H_0 - \left(\rho_i + R_6 \right) \sin \psi_k \right]}{V_0^2 \cos^2 \psi_k}} \right\} \quad (14)$$

Висота польоту центра бульби картоплі і її швидкість руху в точці С контакту визначатиметься підстановкою розв'язку (14) у формули (12) і (10).

Швидкість руху V_H у точці С контакту буде напрямлена під кутом χ до горизонту, тангенс якого визначається як похідна від функції (11) за змінною x :

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gx}{V_0^2 \cos^2 \psi_k} \quad (15)$$

Результуюча швидкість \bar{V} бульби картоплі під час удару дорівнюватиме векторній сумі швидкості \bar{V}_H бульби в точці С контакту і швидкості транспортера \bar{V}_T :

$$\bar{V} = \bar{V}_H + \bar{V}_T, \quad (16)$$

або

$$V = \sqrt{V_H^2 + V_T^2 - 2 V_H V_T \cos \left(V_H, V_T \right)}, \quad (17)$$

де $\cos \left(V_H, V_T \right)$ — напрямний косинус вектора швидкості руху \bar{V}_H бульби картоплі в момент контакту до вектора швидкості V_T відбивального транспортера. Згідно зі схемою (рис. 2)

$$\cos \left(V_H, V_T \right) = -\cos \left(\beta + \chi \right). \quad (18)$$

Тоді

$$V = \sqrt{V_H^2 + V_T^2 + 2 V_H V_T \cos \left(\beta + \chi \right)}. \quad (19)$$

Для виконання умови непошкодження бульб картоплі потрібно, щоб результуюча швидкість руху бульби під час удару не перевищувала максимально допустимого значення, яке згідно з [3, 11] приймемо 4–5 м/с. Підставляючи вираз (10) у вираз (19) та враховуючи зазначене

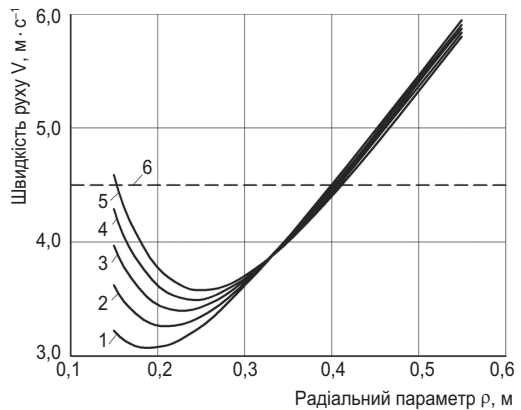


Рис. 5. Залежність швидкості руху бульби від радіального параметра ρ за різних значень конструктивного параметра L : 1 – $L = 0,10$ м; 2 – $L = 0,15$ м; 3 – $L = 0,20$ м; 4 – $L = 0,25$ м; 5 – $L = 0,30$ м; 6 – обмеження швидкості руху за умови непошкодження бульб

вище обмеження на швидкість руху бульби картоплі під час удару, отримаємо кінематичну умову її непошкодження під час удару об поверхню відбивального транспортера:

$$V = \sqrt{\omega^2 \rho_i^2 - 2g \left[L \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gL}{2\omega^2 \rho_i^2 \cos^2 \psi_k} \right] + V_T^2 + 2\sqrt{\omega^2 \rho_i^2 - 2g \left[L \operatorname{tg} \psi_k - \frac{gL}{2\omega^2 \rho_i^2 \cos^2 \psi_k} \right]}} V_T \cos(\beta + \chi) \leq [V]. \quad (20)$$

Реалізація отриманої залежності (20) за допомогою прикладних програм для ПК дала змогу визначити параметри вдосконаленої конструкції спірального сепаратора без пошкодження бульб картоплі, що сприяло

підвищенню продуктивності спірального сепаратора і зменшенню пошкодження бульб.

За розробленою програмою для ПК у середовищі Mathcad було здійснено числові розрахунки, які дали можливість побудувати графічні залежності (рис. 3–5).

За графіками рис. 3, кутовий параметр ψ_k може бути обраним за значеннями радіального параметра $\rho=0,24$ м та $\rho=0,27$ м, що дорівнює 0,4–0,6 рад. Інші розміри ρ не є бажаними за умови збільшення габаритів спірального очисника. Криві, представлені на рис. 4, свідчать про те, що перевагу слід надавати довжинам L , які дорівнюють 0,2–0,5 м на підставі прийнятих попередньо значень ρ . Також за умов прийнятих попередньо конструктивних параметрів спірального очисника (ψ_k і L), як свідчать криві на рис. 5, радіальний параметр ρ повинен мати зазначені раніше значення.

Висновки

Побудовано нову розрахункову математичну модель польоту бульби картоплі і її взаємодії з поверхнею спірального сепаратора та удару об відбивальний транспортер.

На основі отриманих аналітичних залежностей та їх розв'язування на ПК теоретично досліджено раціональні кінематичні параметри

спірального сепаратора картоплезбиральної машини вдосконаленої конструкції за умови непошкодження бульб картоплі.

Раціональними конструктивними параметрами спірального сепаратора за умови непошкодження бульб картоплі слід вважати $\rho=0,26$ м, $\psi_k=0,5$ рад., а L — не більше, ніж 0,5 м.

Бібліографія

1. Патент України № 43907, A01D33/08. Очисник вороху коренебульбоплодів від домішок/В.М. Булгаков, П.Ю. Зиков, С.В. Смолінський, М.Г. Березовий, А.Л. Бондаренко. Опубл. 15.01.2002, бюл. № 1.
2. Смолінський С.В. Експериментальне визначення параметрів спірального сепаратора картоплезбиральних машин//Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. — Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2001. — Вип. 8. — С. 265–271.
3. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины/Г.Д. Петров. — М.: Машиностроение, 1984. — 320 с.
4. Смолінський С.В. Про теоретичний розрахунок параметрів і режимів роботи спірального сепаратора картопляного вороху/С.В. Смолінський//Механізація сільськогосподарського виробництва: зб. наук. пр. НАУ. — К.: Вид-во НАУ, 2002. — Т. VII. — С. 290–293.
5. Gieck K. Technische Formelsammlung/K. Gieck, R. Gieck. — Gernering: Gieck Verlag, 1995. — 330 p.
6. Zaltzman A. Evolution of the potato fluidized bed medium separator/A. Zaltzman, Z. Schmilovitch//

(Conference Paper) American Society of Agricultural Engineers, 1985. — 27 p.

7. Ichiki H. Stone-cold separation and its application to potato cultivation in Hokkaido/H. Ichiki, Van N. Nguyen, K. Yoshinaga//Bio-oriented Technology Research Advancement Institution, Engineering in Agriculture, Environment and Food. — V. 6, Iss. 2. — 2013. — P. 77–85.

8. Karwowski T. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych/T. Karwowski. — Warszawa: PWRiL, 1982. — Т. 3. — 429 p.

9. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики/Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. — М.: Наука, 1985. — Т. 2. — 496 с.

10. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах/М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. — М.: Наука, 1964. — Т. 2. — 664 с.

11. Бышов Н.В. Совершенствование технологического процесса картофелеуборочных машин/Н.В. Бышов, Ю.В. Буряков, И.А. Успенский//Сб. науч. тр. сотрудников и аспирантов. — Рязань: РГСХА, 1996. — Т. 2. — С. 157–159.

Надійшла 24.10.2017.