

## СТАТИЧНА ВЗАЄМОДІЯ ПАЛЬЦІВ ВИЛКИ І ЗУБКА ЧАСНИКУ

*Ярослав Семен, к. т. н., Олег Крупич, к. т. н., Олег Семен, магістр*

*Львівський національний університет природокористування,*

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,*

*e-mail: jsemen@ukr.net, krupycholeh@gmail.com, olehsemen11@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.22-26>

### **Семен Я., Крупич О., Семен О. Статична взаємодія пальців вилки і зубка часнику**

Запропоновано наукову працю, яка є вагомим доповненням до загальних наукових досліджень, спрямованих на створення засобів для механізованого поштучного орієнтованого садіння зубків часнику, якій передували аналітичні дослідження з визначення об'єму, маси і координат центра ваги зубків часнику, сформованих на центральному стрижні головки часнику, котрий розглядається у декартовій системі координат як частина кулі відповідного радіуса, взаємодії елементів системи «барабан – зубок часнику – вилка», взаємодії ролика штока вилки, між пальцями якої утримується зубок часнику, з різними за профілем поверхнями напрямних садильного апарату розробленої конструкції саджалки.

У статті подано результати наукових досліджень взаємодії покритих із внутрішньої сторони еластичним матеріалом пальців вилки садильного апарату машини для примусового поштучного орієнтованого садіння зубків часнику денцем вниз, а ростком вверх із зубком часнику. В ній аналітичним методом вирішено контактну задачу взаємодії двох тіл різної щільності, кожне з яких характерне відповідним модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона.

Наведено розрахункову схему з областю контакту зубка часнику і еластичного матеріалу пальців вилки у вигляді еліпса, параметри відповідних півосей якого залежать від розмірів і форм різних сортів часнику. Також враховано умову, що головні радіуси кривизни поверхні зубка часнику та еластичного елемента пальців вилки відомі, а головні площини поверхонь тіл, що контактують, збігаються.

У результаті проведених теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності, що дозволяють знайти максимальне значення сили защемлення зубка часнику між пальцями вилки за умови, що напруження, які при цьому виникатимуть, не перевищуватимуть певних допустимих значень та жорсткість пружини, необхідної для утримання зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування й безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

**Ключові слова:** зубок часнику, пальці вилки, взаємодія, сила защемлення, жорсткість пружини.

### **Semen Ya., Krupych O., Semen O. Static interaction between the tines of a fork and a garlic clove**

The proposed scientific study significantly contributes to the ongoing research aimed at developing mechanized techniques for the individual planting of garlic cloves. This work is built upon analytical research focused on determining the volume, mass, and coordinates of the center of gravity of garlic cloves, which are formed on the central core of the garlic head. This is considered within a Cartesian coordinate system as part of a sphere of the corresponding radius. The study examines the interactions within the "drum - garlic clove - fork" system and explores how the roller of the fork rod interacts with the various profile surfaces of the planting device guides in the proposed planter design.

The article presents findings on the interaction between the forks of the planting device, which is designed for forced, individually oriented planting of garlic cloves with the bottom facing down and the sprout facing up. These forks are lined on the inside with an elastic material that interacts with the garlic clove. An analytical method is employed to address the contact problem arising from the interaction of two anisotropic bodies of differing densities, each characterized by its respective Young's modulus and Poisson's ratio.

A calculation scheme is provided, illustrating the contact area between a garlic clove and the elastic material of the fork tines in the shape of an ellipse. The parameters of this ellipse's semi-axes depend on the size and shape of various garlic varieties. The study also accounts for the fact that the principal radii of curvature of the garlic clove's surface and the elastic element of the fork tines are known, and that the main contact planes of the surfaces involved coincide.

The conducted theoretical analyses have resulted in analytical relationships that enable the determination of the maximum pinching force exerted on a garlic clove between the tines of the fork. This is contingent on ensuring that the resulting stresses remain below permissible limits. Additionally, the research identifies the necessary stiffness of the spring required to securely hold the garlic clove between the fork tines during in-machine transportation and direct insertion into pre-formed grooves.

**Keywords:** garlic clove, fork tines, interaction, pinching force, spring stiffness.

**Постановка проблеми.** Під час орієнтованого поштучного садіння часнику за допомогою саджалки з ланцюгово-плунжерними садильними апаратами, його зубки утримуються між нижнім коритоподібним і двома боковими пальцями,

покритими еластичним матеріалом до моменту безпосереднього встромляння їх у наперед утворену борозенку [6; 9; 15]. Зусилля, з яким пальці діють на зубок часнику, визначається жорсткістю пружного елемента механізму керування пальцями

вилки. Його значення ототожнюється з фізико-механічними властивостями зубків часнику, тобто величина вказаного зусилля не повинна перевищувати допустимих меж на руйнування самого зубка. Водночас величина зусилля, з яким пальці вилки діють на зубок часнику, має бути достатньою для його надійного утримування під час внутрішньомашинного транспортування й безпосереднього встромляння в ґрунтове середовище.

Саме тому дослідження спрямовані на визначення зусилля, яке діє на зубок часнику під час його утримування між пальцями вилки, адаптованого до фізико-механічних властивостей різних за формою і розмірами зубків часнику, актуальне.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Більшість наукових праць, пов'язаних із виробництвом часнику, присвячені агротехніці його вирощування та біологічним особливостям вказаної сільськогосподарської культури [1; 2; 4; 5; 10–13; 16; 22]. Варто виокремити й наукові публікації, в яких висвітлено дослідження фізико-механічних властивостей та розмірних характеристик окремих сортів часнику, умов їх проростання і пристосованість до механізованого орієнтованого садіння [8; 14; 18].

Окремим напрямком є дослідження, спрямовані на побудову аналітичних моделей різних за формою і розмірами зубків часнику, які слугуватимуть основою для наступного математичного моделювання процесу їх поштучного захоплення робочими органами саджалок, внутрішньомашинного транспортування і орієнтованого примусового встромляння денцем униз, а ростком угору. Цим дослідженням присвячені наукові праці [17] та [21], де аналітичні моделі зубка часнику розглядали без центрального стержня і з ним та були частиною кулі певного радіуса  $R$  з центром у точці  $O_1$ . Їхні об'єми обмежувалися двома меридіональними площинами, двогранний кут між якими становив  $2\alpha$ , та однією площиною, яка лежала в основі зубка і була перпендикулярною до двох інших.

Сьогодні вагома частка наукових публікацій присвячена створенню і дослідженню робочих органів машин для орієнтованого садіння зубків часнику, конструктивні та кінематичні параметри й режими роботи яких адаптовані до їхніх фізико-механічних властивостей. Так, у науковій праці [19] розглянуто модель системи «барабан – зубок часнику – вилка», де теоретично досліджено рух зубка часнику після відокремлення його від отвору на поверхні барабана до моменту захоплення пальцями вилки та отримано аналітичні залежності для визначення часу падіння та кута відривання

зубка від поверхні барабана, встановлено й проаналізовано основні закономірності вказаного процесу.

Питання взаємодії ролика штока вилки, між пальцями якої утримується зубок часнику, з різниці за профілем поверхнями напрямних садильного апарату розробленої конструкції саджалки розглядалися в наукових працях [15; 20]. У них наведено аналітичні залежності для визначення основних кінематичних параметрів взаємодії ролика, закріпленого на штоці з напрямними у вигляді дуги кола та параболи під час заглиблення вилки із зубком часнику в ґрунт, проте питання статичної взаємодії пальців вилки і зубка часнику під час вказаних досліджень не розглядали, що дещо обмежує значення отриманих результатів.

**Постановка завдання.** Наше завдання – отримати аналітичні залежності, які дають змогу визначити допустиме значення максимальної сили защемлення зубка часнику між пальцями вилки та жорсткість пружин, які забезпечують утримування зубка часнику між ними.

**Виклад основного матеріалу.** У відомій саджалці часнику [6; 9; 15] під час руху вилки разом із транспортером, її пальці, покриті з внутрішнього боку еластичним матеріалом, діють на зубок часнику з деякою силою  $P$  (рис., а), внаслідок чого у ньому виникають напруження, які, звичайно, не повинні перевищувати певного допустимого значення.

Припустимо, що у місці контакту  $S$  (рис., а, б) відомі головні радіуси кривизни поверхні зубка часнику  $R_1$  і  $R'_1$  та еластичного елемента пальців вилки  $R_2$  і  $R'_2$ , причому головні площини цих поверхонь збігаються.

Як відомо, згідно з теорією Герца, зона контакту обмежена еліпсом (див. рис., б) з центром у т.  $O$ , рівняння якого [3; 7]:

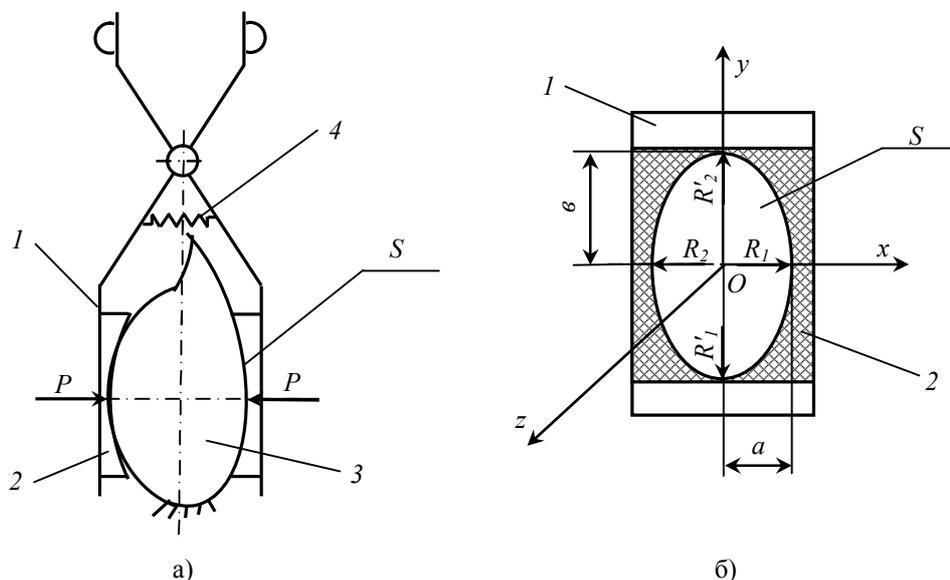
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

де  $a, b$  – півосі еліпса, ( $a \leq b$ ).

Величини (розміри) півосей  $a$  та  $b$  залежать від форми й розмірів зубків часнику. З відомих аналітичних молей [17] і [21] випливає, що кожен зубок часнику має дві поверхні, переважно у вигляді плоских граней, які утворюють клин, та одну поверхню у вигляді кола певного радіуса. Саме тому під час захоплення зубка часнику пальцями вилки його зона контакту з еластичним матеріалом кожного пальця вилки буде визначатися формою поверхні зубка, яка безпосередньо з ним

взаємодіє. Щоб уникнути розбіжностей у подальших аналітичних дослідженнях, припустимо, що зони контакту зубка часнику з еластичним

матеріалом кожного з пальців вилки однакові й мають форму еліпса з відповідними півсями  $a$  та  $b$ .



**Рис.** Схема взаємодії пальців вилки, покритих еластичним матеріалом із зубком часнику (а) та місце (зона) їхнього контакту (б):  
 1 – пальці вилки; 2 – еластичний матеріал; 3 – зубок часнику; 4 – пружина.  
**Fig.** Diagram of the interaction of the fork tines covered with elastic material with a garlic clove (a) and the places (zones) of their contact (b):  
 1 – fork tines; 2 – elastic material; 3 – garlic clove; 4 – spring.

Напруження в зоні контакту обчислюється за формулою

$$q(x, y) = \frac{3P}{2\pi a b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (2)$$

Щоб отримати вирази для знаходження значень півосей  $a$  і  $b$  еліпса, спочатку розв'язуємо рівняння (2) і визначаємо параметр  $e$

$$\frac{(1 - e^2)(K(e) - E(e))}{e^2 E(e)} = \frac{B}{A + B}, \quad (3)$$

де  $e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$ ,  $A = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ,  $B = \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2}$ ,

причому  $A > B$ ;  $K(e)$  – повний еліптичний інтеграл першого роду:

$$K(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}; \quad (4)$$

$E(e)$  – повний еліптичний інтеграл другого роду:

$$E(e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (5)$$

$\varphi$  – змінний параметр,  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ .

Тоді півосі обчислюємо за формулами:

$$b = \sqrt[3]{\frac{3PE(e)(K_1 + K_2)}{2(1 - e^2)(A + B)}} = b_1 \sqrt[3]{p}, \quad (6)$$

$$a = b \sqrt{1 - e^2} \cdot \sqrt[3]{p} = a_1 \cdot \sqrt[3]{p}, \quad (7)$$

де  $K_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}$ ,  $K_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$ ,  $E_1$ ;  $E_2$  – модулі Юнга матеріалів, що контактують;  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  – відповідно, коефіцієнти Пуассона.

Очевидно, якщо  $e = 0$ , то  $a = b$ , і зоною контакту двох тіл є коло радіусом  $b$ .

Максимальне контактне напруження  $q_{max}$  виникає у центрі еліптичної зони і визначається за формулою

$$q_{max} = \frac{3P}{2\pi a b} = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - e^2}} \sqrt[3]{\frac{3P}{2} \left( \frac{(1 - e^2)(A + B)}{E(e)(K_1 + K_2)} \right)^2}. \quad (8)$$

Вказане напруження у цій точці поширюється в напрямках усіх координатних осей за залежностями:

$$\sigma_z = -q_{max};$$

$$\sigma_x = -2\nu_1 q_{max} - (1 - 2\nu_1) q_{max} \frac{b}{a + b}; \quad (9)$$

$$\sigma_y = -2\nu_1 q_{max} - (1 - 2\nu_1) q_{max} \frac{a}{a + b}.$$

Згідно з четвертою теорією міцності [23; 24] відомо, що:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2} \leq [\sigma], \quad (10)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження для зубка часнику.

Підставивши (9) у (10), отримаємо:

$$\frac{q_{max}(1-2\nu_1)\sqrt{a^2+\epsilon^2}-a\epsilon}{a+\epsilon} \leq [\sigma]. \quad (11)$$

Із нерівності (11), враховуючи вираз (8), визначаємо допустиме значення сили  $P_{max}$  защемлення зубка часнику між пальцями вилки:

$$P_{max} \left\langle \frac{2}{3} [\sigma] \frac{\pi a_1 \epsilon_1 (a_1 + \epsilon_1)}{(1-2\nu_1)\sqrt{a_1^2 + \epsilon_1^2} - a_1 \epsilon_1} \right\rangle^3. \quad (12)$$

Значення цієї сили впливає на жорсткість пружин, які забезпечують утримування зубка часнику між пальцями вилки, а саме:

$$c \Delta l_{max} \langle P_{max} \rangle, \quad (13)$$

де  $c$  – сумарна жорсткість пружин вилки;  $\Delta l_{max}$  – максимальний розтяг пружин вилки під час захоплення зубка часнику.

Із нерівності (13) випливає, що

$$c \left\langle \frac{P_{max}}{\Delta l_{max}} \right\rangle. \quad (14)$$

Отримані залежності (12) та (14) дозволяють визначити максимально допустиме значення сили  $P_{max}$  защемлення зубка часнику між пальцями вилки та відповідної їй жорсткості пружини  $c$ , необхідної для утримування зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування та безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

Згідно з попередніми аналітичними дослідженнями, для зубків часнику сорту Спас максимально допустиме значення сили  $P_{max}$  їх защемлення між пальцями вилки коливається в межах 19,79-28,44Н; для зубків часнику сорту Лідія  $P_{max}$  змінюється в межах 21,31-31,01Н; для зубків часнику сорту Любаша  $P_{max}$  становить 23,81-34,88Н.

Проте, зважаючи на мінливість розмірів і форм зубків різних сортів часнику, під час захоплення їх пальцями вилки можуть спостерігатися певні відмінності у формуванні зон (місць) контакту зубків з еластичним матеріалом, яким покриті поверхні пальців вилки садильного апарату. Саме тому виконані аналітичні дослідження мають бути доповнені експериментами, що планується зробити для озимого часнику вищенаведених сортів.

**Висновки.** Теоретичні дослідження статичної взаємодії пальців вилки і зубка часнику показали таке.

1. Під час взаємодії пальців вилки, покритих із внутрішньої сторони еластичним матеріалом із зубком часнику, утворюється зона контакту у

виді еліпса, розмірні параметри півосей якого залежать від форми й розмірів зубків часнику.

2. Отримані залежності (12) та (14) дозволяють визначити максимально допустиме значення сили  $P_{max}$  защемлення зубка часнику між пальцями вилки та відповідної їй жорсткості пружини  $c$ , необхідної для утримування зубка часнику між її пальцями в часі внутрішньомашинного його транспортування та безпосереднього встромляння у наперед утворену борозенку.

3. Допустиме значення сили  $P_{max}$  защемлення зубка часнику між пальцями вилки залежить від величини максимального контактного напруження  $q_{max}$ , яке виникає у центрі еліптичної зони.

4. Для зубків часнику сорту Спас максимально допустиме значення сили  $P_{max}$  їхнє защемлення між пальцями вилки коливається в межах 19,79-28,44Н; для зубків часнику сорту Лідія  $P_{max}$  змінюється в межах 21,31-31,01Н; для зубків часнику сорту Любаша  $P_{max}$  становить 23,81-34,88Н.

#### Бібліографічний список

1. Барабаш О. Ю. Технологія вирощування овочів і плодів. Київ: Вища школа, 2004. 240 с.
2. Бобось І. М. Господарсько-біологічна оцінка сортів часнику озимого (*Allium sativum* L.), вирощених у Лісостепу України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Агрономія»*. 2011. Вип. 162. Ч. 1. С. 230–235.
3. Божедарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Львів: Світ. 1994. 560 с.
4. Борисюк В., Багай Т., Волинець О., Дика Л. Ефективність селекції часнику озимого за участі екологічних форм Західного регіону України. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агрономія*. 2021. № 25. С. 120–124.
5. Борисюк В. С., Багай Т. І. Особливості технології вирощування часнику озимого. *Плантатор*. 2018. № 1. С. 32–34.
6. Вилка ланцюгово-плунжерного садильного апарату: пат. 137149 Україна: МПК А01С 7/16. № u 2019 02423; заявл. 12.03.19; опубл. 10.10.19. Бюл. № 19. 4 с.
7. Ніщенко І. О., Шевчук В. В. Теоретичні дослідження руйнування насінин олійних культур. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 11, т. 2 (66). С. 234–239.
8. Кузенко Д. В., Семен О. Я., Гошко З. О., Семен Я. В. Дослідження розмірно-масових показників зубків часнику. *Збірник наукових статей Луцького національного технічного університету: сільськогосподарські машини*. 2018. Вип 39. С. 86–93.
9. Кузенко Д. В., Семен О. Я. Машина для садіння зубків часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 114–118.

10. Лихацький В. І. Біологія і агротехніка вирощування часнику. Київ: УСГА, 1992. 27 с.
11. Лихацький В. І. Чеснок. Біологія і технологія вирощування: практич. посібник. Київ: УСХА, 1990. 96 с.
12. Лихацький В. І., Попова Л. М. Вплив площі живлення на продуктивність нестрілкуючого часнику. *Аграрний вісник Причорномор'я: зб. наук. пр. Одеського державного сільськогосподарського інституту*. 1998. Вип. 2. С. 59–63.
13. Мельник О. В., Митенко І. М. Вирощування часнику озимого: рекомендації. Київ: Аграрна наука, 2020. 52 с.
14. Oleg Krupich, Yaroslav Semen, Rostyslav Kudrynetskyi, Oksana Berezovetska, Viktor Dnes and Stepan Krupych. Experimental studies of the influence of oriented planting cloves for the formation of garlic heads. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. June 2024. Vol. 19, No 11. S. 653–657. <https://doi.org/10.59018/062486>.
15. Oleg Semen, Dmytro Kuzenko, Yaroslav Semen. A machine for oriented planting of garlic teeth. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, Rzeszów, 2017. Vol. 17, No 2. S. 55–60.
16. Попова Л. М. Часник в Україні: навч. посіб. Одеса: ВМВ, 2011. 160 с.
17. Семен О. Я., Кузенко Д. В., Семен Я. В. Аналітична модель зубка часнику. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 40–46.
18. Семен О. Я. Визначення коефіцієнта та кута зовнішнього тертя зубків часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 162–167.
19. Семен О., Кузенко Д., Семен Я. Теоретичні дослідження параметрів системи «барабан – зубок часнику – вилка» саджалки часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 77–85.
20. Семен Я. В. Дослідження параметрів системи «вилка – напрямна» саджалки часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 39–44.
21. Семен Я. В., Крупич О. М., Пономаренко О. М., Левко С. І. Аналітична модель зубка часнику з центральним стрижнем. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2021. № 25. С. 36–41.
22. Снітинський В. В., Лішак Л. П., Ковальчук Н. І., Лішак І. О. Часник на фермерському полі та присадибній ділянці. Львів: Український бестселер, 2010. 110 с.
23. Хайлис Г. А. Механика растительных материалов. Киев: УААН, 1994. 236 с.
24. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: навч. посіб. Київ: Знання, 2009. 380 с.

Стаття надійшла 15.02.2025