

## ЗАКОНОМІРНОСТІ РУХУ СТЕРЖНЕПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСІ ЇХ ВИСИПАННЯ З БУНКЕРІВ

**Єрмаков Сергій Володимирович**

завідувач навчально-наукової лабораторії «DAK GPS»

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-6840-5309

dakgps@pdatu.edu.ua

**Гуцол Тарас Дмитрович**

доктор технічних наук, доцент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-9086-3672

pro-gp@pdatu.edu.ua

**Гарасимчук Ігор Дмитрович**

кандидат технічних наук, доцент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-4304-4447

igorgarasymchuk@gmail.com

**Вусатий Микола Вікторович**

асистент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0003-3070-9283

0611142015vys@gmail.com

У роботі розглянуто проблеми вивантаження стержнеподібних тіл (на прикладі живців енергетичної верби) у вільному потоці під дією сил гравітації. Потреба вивчення цього питання продиктована зростаючою популярністю палив з біоенергетичних культур, для нарощування обсягів яких потрібні швидкі та продуктивні машини для створення так званих енергетичних плантацій. Основною перешкодою здійснення вільного вивантаження матеріалів є явище склепоутворення, яке, перериваючи природне висипання матеріалів, негативно впливає на їх витратні характеристики. Метою статті є пошук і виділення закономірностей руху стержнеподібних тіл у процесі їх висипання з бункерів. Для пошуку можливих розв'язків проблеми безперервного вивантаження здерев'янілих живців важливо проаналізувати можливі форми склепінь, що утворюються при вивантаженні з створюють перешкоди руху. В якості моделі бункера, для вивантаження живців, розглядається щільний бункер у вигляді двох стінок, розташованих під кутами до горизонтальної площини. Ці стінки утворюють вивантажувальну воронку з налаштовуванню шириною вивантажувального вікна та кутом розчину.

Дослідним шляхом при висипанні матеріалу зафіксовано склепіння, які утворюються при різних параметрах бункера в процесі вільного вивантаження і виділено особливості формування склепінь утворених живцями. В результаті дослідження встановлено, що для забезпечення безперебійного вивантаження живців можна підібрати таку ширину вивантажувального вікна бункера, при якій буде забезпечено рівномірне висипання живців без склепоутворень та зупинок пов'язаних з цим процесом. Також проведено аналіз безперервного вивантаження стержнеподібного матеріалу та виділено особливості його протікання. Встановлено, що для живців енергетичної верби ширина вікна, що забезпечує безперервне висипання складає 8–12 см.

Результати роботи можуть бути використані при подальшому вивченні питань вивантаження подібних матеріалів, а також при проектуванні бункерів-накопичувачів у системах автоматичної подачі живців енергетичної верби в саджалках.

**Ключові слова:** склепоутворення, вивантаження, живець, енергетична верба, бункер, склепіння, автоматизація садіння.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.4>

Вступ. Багато машин, що використовуються у виробничих технологічних лініях, використовують у своєму принципі роботи такі процеси, як завантаження, вивантаження, відбір, транспортування різних матеріалів, які найчастіше складаються з однотипних частинок. Високопродуктивна та якісна робота таких машин значною мірою залежить від швидкості вивантаження

продукту, використовуюваного обладнання та параметрів та режимів роботи розвантажувальних пристроїв (Adamchuk 2004; Hutsol et al., 2021). Проблема ще більше ускладнюється при необхідності забезпечення рівномірного і безперервного вивантаження матеріалу, у якого один розмір (довжина) значно перевищує два інших розміри. Прикладом такого стержнеподібного

матеріалу є живці рослин. Потреба вивчення цього питання продиктована зростаючою популярністю палив з біоенергетичних культур, для нарощування обсягів яких потрібні швидкі та продуктивні машини для створення так званих енергетичних плантацій. Однією з найбільш поширених таких культур є енергетична верба, садіння якої здійснюється вегетативним способом живцями довжиною 20–25 см та діаметром 8–20 мм (Baran et al., 2007; Frączek et al., 2005; Roik et al., 2015). Садіння насаджень енергетичної верби здійснюється машинами, в яких посадковий матеріал подається вручну, що суттєво обмежує можливості підвищення ефективності агрегатів. При створенні автомата садіння такого матеріалу виникло завдання швидкісної та точної подачі живців, що призвело до пошуку шляхів обґрунтування руху живців при вивантаженні з накопичувальної ємності (Yermakov & Borys, 2015; Yermakov, 2017; Yermakov et al., 2019; Yermakov & Hutsol, 2021).

З практики функціонування бункерів відомо, що основною перешкодою здійснення вивантажування шматкових матеріалів є явище склепоутворення, яке, перериваючи природне висипання матеріалів, негативно впливає на їх витратні характеристики. Вичерпне теоретичне вирішення цієї проблеми у науковій літературі відсутнє. У галузі досліджень динаміки висипання сипких середовищ з ємностей, боротьби зі склепоутворенням та у сфері розробки склепоруйнівального обладнання відзначимо значний внесок наступних учених Алфьорова К., Білоусова А., Богом'яких В., Горюшинського В., Горюшинського І., Гячева Л., Дженіке Е., Желткова С., Зенкова Р., Квапіла Р., Кеглина Б., Кунакова В., Соколовського В., Третьякова Г., Яцуна С. та ін. У їхніх роботах розглянуто основні характеристики та фізико-механічні властивості сипких матеріалів, що так чи інакше впливають на процес склепоутворення, відображені загальні напрями досліджень у галузі безперебійного функціонування бункерних пристроїв та вдосконалення склепозрушувального обладнання для сипких вантажів з широким спектром фізико-механічних властивостей (Kucher & Prokopchuk, 2017; Dziedzic et al., 2017; Mao et al., 2014; Mitkov et al., 2021; Kucher & Prokopchuk, 2019; Ivanyshyn & Hutsol, 2017; Bogomjagkih & Pechuk, 1985; Savage & Cowin, 1999; Geniev, 1972; Gjachev, 1992; Miwa, 1991). Численні дослідження процесу склепоутворення дозволили встановити лише деякі залежності, що пояснюють суть цього процесу. Ступінь впливу величезної кількості різних взаємозалежних чинників на склепоутворення важко оцінити практично і передбачити теоретично: це і геометрія бункера і випускного отвору, і фізико-механічні властивості матеріалів, і умови завантаження, зберігання та випуску. Саме у зв'язку зі складністю забезпечення рівномірного безперервного руху, якому перешкоджає процес склепоутворення, до теперішнього часу не існує універсального пристрою-живильника, що ефективно працював би з будь-яким сипким матеріалом, а різноманітність матеріалу, що вимагає вивантаження сприяє подальшим пошукам обґрунтувань руху того чи іншого матеріалу.

Також важко переоцінити наукове та практичне значення досліджень механізму руху сипких матеріалів під дією власної ваги, так як фізико-механічні властивості даних матеріалів та закономірності їх висипання чинять вирішальний вплив на конструкцію бункерів, а також випускних пристроїв та пристроїв, що стимулюють висипання.

Науковці виділяють два основних напрями для забезпечення безперебійного вивантаження сипких вантажів із ємностей:

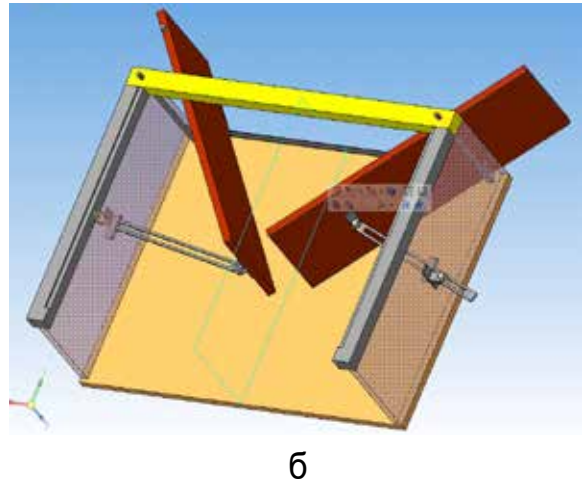
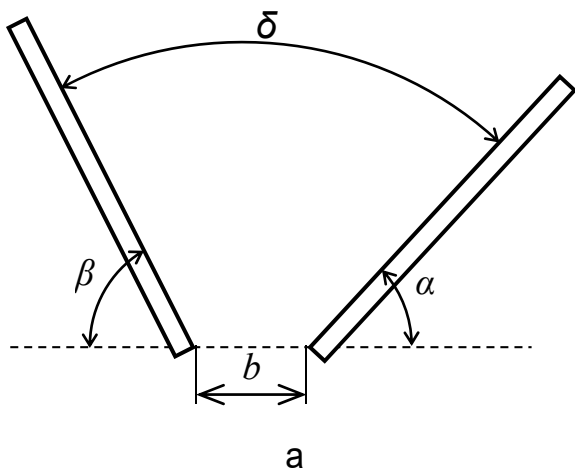
1. запобігання виникненню склепін, що може бути досягнуто правильним вибором параметрів ємності;
2. руйнування склепін, що утворилися, із застосуванням різних зводообрушувальних пристроїв.

Обидва напрями актуальні, проте більш прогресивним вважатимемо перший, оскільки краще запобігти склепоутворенню, ніж боротися з ним (Мупко, 2013). Моделювання руху частинок сипкого матеріалу під час вивантаження, як і вибір засобів для руйнування утворених в ємності склепін залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і параметрів самої ємності. У цій роботі нас цікавить поведінка стержнеподібних неоднорідних матеріалів (якими є, зокрема, живці енергетичної верби чи тополі) в процесі вивантажування з бункера під дією гравітаційних сил, тому метою статті є пошук і виділення закономірностей руху стержнеподібних тіл у процесі їх висипання з бункерів. Для досягнення цієї мети слід вирішити такі завдання:

- обґрунтувати модель бункера для вивантаження живців енергетичної верби;
- створити дослідну модель бункера, яка б задовольняла умовам вивантажування стержнеподібних матеріалів;
- проаналізувати процес склепоутворення для стержнеподібних матеріалів та виявити характерні особливості утворення склепін для живців верби;
- виявити можливість безперервного висипання живців енергетичної верби та характер протікання цього процесу;
- створити рекомендації для бункерів-живильників для сажалок енергетичної верби та визначити напрями для подальшого вивчення даного процесу.

Матеріали і методи досліджень. Вивантажування стержнеподібних матеріалів зручно здійснювати з бункерів із похилими стінками та цілним вивантажним вікном (рис.1). Характер заповнення бункера такими матеріалами буде здійснюватись шарами один над іншим, тому в першому наближенні досліджуючи рух у цій системі можна обмежитися вивченням процесів у площині перпендикулярній тілам та стінкам бункера, нехтуючи можливістю їх руху у поперечному напрямку. Тому при виготовленні діючої лабораторної установки, обмежимо простір бункера двома паралельними стінками на відстані трохи перевищує довжину використовуваного для вивантажування матеріалу (рис. 3).

Лабораторна установка дозволяє в широких діапазонах регулювати кути двох стінок  $\alpha$  і  $\beta$ , а також змінювати ширину вивантажувального вікна, що потрібно для дослідження Використання даної моделі бункера дозволить дослідити характер витікання матеріалу з бункера,



**Рис. 1. Дослідна установка: а – модель бункера для вивантажування живців енергетичної верби.  $\alpha$  та  $\beta$  кути до горизонтальної площини двох стінок,  $\delta$  кут розхилу вивантажувальної воронки, утвореної двома стінками; б. – ширина вивантажувального вікна; б – вигляд лабораторної установки**

а також визначити крайові параметри для можливості такого вивантаження без утворення склепінь і, відповідно, без затримок.

Результати. У процесі проведення дослідів з вивчення характеристик висипання стержнеподібного матеріалу через щільне вивантажувальне вікно живці енергетичної верби завантажувалися рівномірним шаром в бункер при закритому вивантажувальному вікні. При встановленні малих параметрів ширини вікна неминуче будуть утворюватися склепіння. Зафіксувавши положення живців при зупинці руху можна виявити чинники які впливають процес склепоутворення даного матеріалу. А розширивши вивантажне вікно можна досягти умов, за яких висипання буде проходити безупинно. Використовуючи швидкісну зйомку, можна виявити закономірності такого висипання для використання при подальшому вивченні даного процесу. У роботі І.В. Горюшинського, І.І. Кононова, В.В. Денисова дано таке визначення процесу утворення склепінь: склепоутворення – це утворення склепінь у ємностях у процесі випуску сипкого вантажу (Horiushynskiy, 2003). Живці рослин мають стержнеподібну форму, тому відкидаючи інші фактори, склепоутворення тут можна розглядати як процес в одній площині, де матеріал, що вивантажується, утворює арочну конструкцію. При цьому живці у склепінні (кожен з них) утримуються від падіння нормальними реакціями та відповідними силами тертя сусідніх живців. А живці, які

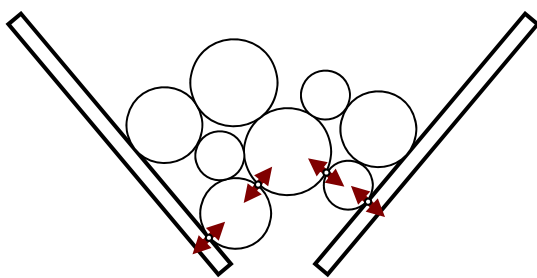
займають крайні положення (дотичні до стінок) утримуються нормальними реакціями і силами тертя не тільки сусідніх живців, а й силами їх взаємодії з матеріалом стінок бункера (рис. 2).

Для пошуку можливих рішень проблеми безперервного висипання живців енергетичної верби важливо проаналізувати можливі форми утворюваних склепінь. Як було сказано вище, при використанні стержнеподібних матеріалів в обмеженому за їх довжиною середовищі склепоутворення можна розглядати тільки в одній площині. Враховуючи це спробуємо порівняти утворення склепінь в контрольованих умовах і безпосередньо для масиву живців.

Для першого випадку візьмемо циліндричні тіла різних діаметрів. У нашому випадку цілком підійдуть монети різного номіналу. Деякі варіанти склепінь утворені під час руху таких тіл показано на рис. 3.

Аналізуючи рис. 3 можна зробити висновок, що формування склепінь в системі однієї площини цілком може бути описано закономірностями взаємодії між частинками відповідно до зайнятих ними положень. Причому самі форми склепінь хоч і носять випадковий характер, але загалом формуються за одним і тим самим закономірностям й у загальних рисах цілком можуть бути спрогнозовані. Зважаючи на розмірні характеристики живців рослин, не важко спрогнозувати, що на процес склепоутворення може впливати ще й довжина живців. На рис. 6 показано деякі варіанти зафіксованих склепінь при вивантаженні живців через вивантажувальний отвір при кутах  $\alpha=90^\circ$  і  $\beta=40^\circ$ , а на рис. 7 – те саме при кутах  $\alpha=60^\circ$  та  $\beta=40^\circ$ .

Таким чином, бачимо, що форми склепінь суттєво відрізняється від попередніх склепінь в одній площині. Відмінність хоча б у тому, що не завжди крайні живці у площині бічної стінки стикаються з стінкою бункера, а деякі живці у цій площині взагалі не контактують із сусідніми живцями, переплітаючись з ними десь у глибині шару. Часто зависання живців провокує неоднорідне защемлення їх за довжиною, коли один з кінців звільняється раніше іншого і таким чином намагаючись



**Рис. 2. Схема склепоутворення при висипанні живців**



а



б



в



г



д



е

**Рис. 3. Приклади утворених склепінь при вивантаженні циліндричних тіл на площині**

зайняти вертикальне положення, що можна побачити на рис. 6 – б, г, е.

Зазначимо, що у багатьох випадках причиною таких відмінностей є перекося по довжині живців щодо один одного. Також причиною іноді були дефекти форми матеріалу – викривлення, зазубрини, конусність тощо. При збігу багатьох цих причин в одному шарі, можна спо-

стерігати навіть картину як на рис. 8, що робить процес рівномірного вивантаження проблематичним, а контрольований вихід матеріалу в потрібній орієнтації практично неможливим.

Такі проблеми виникають при малих величинах ширини вивантажувального вікна, коли превалюють статичні склепіння над динамічними. Коли ж ширину вікна



а

б

в



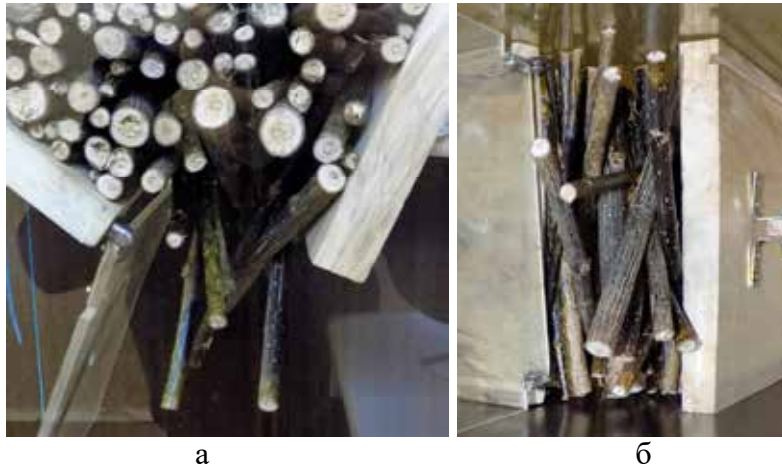
г

д

е

**Рис. 6. Приклади утворених склепінь при вивантаженні живців енергетичної верби**





**Рис. 7. Проблеми вивантаження живців енергетичної верби у зоні вивантажувального вікна**

збільшити, процес вивантаження відбувається більш рівномірно і в цьому випадку можна спостерігати та аналізувати закономірності висипання матеріалу. Встановлено, що для живців енергетичної верби ширина вікна, що забезпечує безперервне висипання складає 8–12 см.

**Висновки.** Для вирішення питань звільнення процесу садіння енергетичної верби від ручної праці при подачі посадкового матеріалу від накопичувальних емностей до місця садіння виникає необхідність створення автоматизованої системи подачі. Відбір та транспортування живців у такій системі можна організувати за допомогою гравітаційного вивантаження з бункера. Модель бункера для вивантаження стержнеподібних матеріалів складається з двох стінок розташованих під кутом до горизонту, внизу яких утворюється вивантажувальне вікно з регульованою шириною. Аналіз процесу вивантажування і форми склепін свідчить про те, що у випадку з таким стержнеподібним матеріалом, як живці енергетичної верби, крім загальних причин

утворення склепін і закономірностей формування їх форми виникають ще й інші фактори впливу. Особливістю живців рослина є їхня форма, що ускладнює склепоутворення, і викликає такі додаткові умови та фактори, як перекося живців у шарі, неправильна форма живців, нерівномірність їх заземлення за довжиною тощо. При створенні умов, за яких відсутнє виникнення статичних склепін, можна було проаналізувати закономірності вивантажування живців з бункера. В результаті дослідження встановлено, що для забезпечення безперебійного вивантаження живців можна підібрати таку ширину вивантажувального вікна бункера, при якій буде забезпечено рівномірне висипання живців без склепоутворень та зупинок пов'язаних з цим процесом. Використання отриманих даних у подальших дослідженнях уможливить більш повно враховувати всі фактори, що виникають у процесі вивантажування та склепоутворення, що важливо при вивченні та вдосконаленні даного процесу.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Adamchuk, V.V., Baranov, H.L., Baranovskyi O.S. (2004). Suchasni tendentsii rozvytku konstruksii silskohospodarskoj tekhniki [Modern trends in the development of constructions of agricultural machinery]. Kyiv: Ahrarna nauka (in Ukrainian).
2. Hutsol, T., Glowacki, S., Mudryk, K. (2021). Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics). Monograph. Warsaw.
3. Baran, D., Kwaśniewski, D., Mudryk K (2007). Wybrane właściwości fizyczne trzyletniej wierzby energetycznej [Selected physical properties of a three-year-old energy willow]. Inżynieria Rolnicza. V.11. pp. 7–12 (in Polish).
4. Frączek, J., Mudryk, K. (2005). Jakości sadzonek wierzby energetycznej w aspekcie sadzenia mechanicznego [The quality of energy willow seedlings in terms of mechanical planting]. Inżynieria Rolnicza, 6 (66), 159–167 (in Polish).
5. Roik, M.V., Sinchenko, V.M., Fuchylo, Y.D. (2015). Energetychna verba: tehnologiya vy'roshhuvannya ta vy'kory'stannya [Energy willow: cultivation technology and usage]., Vinnitsa: LLC "Nilan-LTD" (in Ukrainian).
6. Mynko, R. N. (2013). Problema svodoobrazovanyia v emkostiakh bunkernoho tipa v uslovyiakh dlitelnoho khraneniya [The problem of arch formation in bunker-type tanks under long-term storage conditions]. Yaroslavskiy pedahohycheskyy vestnyk, 3(1).
7. Yermakov, S, Tulej, M., Tulej, W., Shevchuk, I. (2018). Analiz konstruksiy avtomativ sadinnia [Construction analysis means of planting automation]. Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii. V. 34. Pereiaslav-Khmelnyskiy (in Ukrainian).
8. Yermakov, S.V. (2017). Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. Podilskyy visnyk: silske gospodarstvo, tekhnika, ekonomika. V. 2. pp. 37–45.
9. Yermakov, S. (2019). Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (Salix Viminalis). Teka. Quarterly journal of agri-food industry.
10. Yermakov S.V., Hutsol T.D. (2021) Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in the conditions of static and dynamic arches. Engineering of nature management. V. 3.
11. Yermakov, S., Borys, M. (2015). Efficiency analysis of the energy willow planting devices. Materialy XI Mezinarodni vedecko-prakticka konferencie "Veda a vznik – 2015", v. 14

12. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2018). Features of the heterogeneous rod-like materials outflow (by example of energy willow cutting). Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research.
13. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2019). Economic aspects of biomass market development in Ukraine. Renewable Energy Sources engineering, technology, innovation. Krynica.
14. Bogomjagkih, V.A., Pepchuk, A. P. (1985). Intensifikacija razgruzki bunkernyh ustroystv v uslovijah svodoobrazovaniya zernistykh materialov [Intensification of unloading of hopper devices in the conditions of arch formation of granular materials]. Zernograd. (in Russian).
15. Dziedzic, K., Łapczyńska-Kordon, B., Mudryk, K. (2017). Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix Viminalis* L.). Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation. V. 1.
16. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2017). The development of the market of the renewable energy in Ukraine. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer International Publishing AG.
17. Mao, H., Han, L., Hu, J., Kumi, F. (2014). Development of a pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedlings. Applied engineering in agriculture, 30(4).
18. Mitkov, V., Kiurchev, S., Nurek, T., Chorna, T., Ihnatiev, Ye. (2021) Scientific bases of aggregation of combined units on the basis of an integrated tractor. Monograph. Warsaw.
19. Ivanyshyn, V., Hutsol, T. (2017). The Ukrainian Agricultural Groups State and Agromachinery Revision. Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation, V. 1.
20. Savage, S.B., Cowin, S.C. (1999). Theories for Flow Granular Materials. American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y.
21. Geniev, G.A. (1972). Dinamika plasticheskoy i sypuchey sred. [Dynamics of plastic and granular media]. Moskva. (in Russian)
22. Gjachev, L.V. (1992). Osnovy teorii bunkerov [Fundamentals of hopper theory]. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo universiteta. (in Russian)
23. Miwa, Y. (1991). Automation of plant tissue culture process. In Automation in biotechnology: a collection of contributions presented at the Fourth Toyota Conference, Aichi, Japan, Amsterdam: Elsevier.
24. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2021). Issledovanie processa gravitacionnogo vygruzheniya cherenkov energeticheskoy ivy v uslovijah staticheskikh i dinamicheskikh svodoobrazovaniy [Study of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings]. Engineering of nature management. V. 3. (in Russian)
25. Yermakov, S. (2017) Kierunki optymizatsii maszyn dla sadzenia wierzby energetycznej [Directions of optimization of energy willow planting machines]. Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej. Warszawa. (in Polish)
26. Horiushynskiy, Y.V. (2003). Emkosty dlia sypuchikh gruzov v transportno-hruzovykh sistemakh [Tanks for bulk cargo in transport and cargo systems]. Samara: SamHAPS (in Russian).
27. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2021). Strukturuvannia protsesu avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnoi verby [Structuring the process of automation of planting plants of energy willow]. Bulletin of Sumy National Agrarian University. V.3 (45) (in Ukrainian).
28. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D., Mykhailova, L.M. (2021). Rozrakhunkovi formuly vyznachennia shvydkosti vyvantazhennia zhyvtsiv enerhetychnoi verby z tochky zoru hidrodinamichnykh bahatofaznykh system [Calculation formulas for determining the rate of discharge of energy willow cuttings from the point of view of hydrodynamic multiphase systems]. Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics, V. 34 (in Ukrainian).
29. Mudryk K, Hutsol T., Ovcharuk O. (2021) Określenie rozłożenia pędów wierzby energetycznej [Determination of the distribution of energy willow sprouts.]. Trends and challenges of modern agricultural science: theory and practice. Kyiv (in Polish).
30. Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. Engineering for Rural Development. Jelgava.

**Yermakov S. V.**, Head of the educational and scientific laboratory "DAK GPS", State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Hutsol T. D.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Polissia National University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Garasymchuk I. D.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Vusatyi M. V.**, Assistant, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Patterns of the movement of rod-form materials in the process of their pumping out of hopper**

The paper considers the problems of unloading rod-like bodies (on the example of energy willow cuttings) in a free flow under the influence of gravity. The need to study this issue is dictated by the growing popularity of fuels from bioenergy crops, to increase the volume of which fast and productive machines are needed to create the so-called energy plantations. The main obstacle to the free discharge of materials is the phenomenon of crypt formation, which, interrupting the natural discharge of materials, negatively affects their consumption characteristics. The purpose of the article is to find and highlight the patterns of movement of rod-like bodies in the process of their discharge from hoppers. In order to find possible solutions to the problem of continuous unloading of lignified cuttings, it is important to analyze the possible forms of vaults that are formed during unloading and create obstacles to movement. As a hopper model, for unloading cuttings, a slotted hopper

*in the form of two walls located at angles to the horizontal plane is considered. These walls form a discharge funnel with adjustment of the width of the discharge window and the angle of the solution.*

*The vaults that are formed at different parameters of the bunker in the process of free unloading were recorded experimentally during the pouring of the material and the features of the formation of the vaults formed by cuttings were highlighted. As a result of the study, it was established that to ensure the uninterrupted unloading of cuttings, it is possible to choose such a width of the unloading window of the bunker, which will ensure uniform pouring of cuttings without clog formations and stops associated with this process. An analysis of the continuous discharge of rod-like material was also carried out and the peculiarities of its flow were highlighted. It has been established that for energy willow cuttings, the width of the window, which ensures continuous shedding, is 8–12 cm.*

*The results of the work can be used in the further study of the unloading of similar materials, as well as in the design of hoppers-accumulators in systems of automatic supply of cuttings of energy willow in planters.*

**Key words:** *vault formation, unloading, cuttings, energy willow, hopper, vault, automation of planting.*