

CALCULATION OF DESIGN AND FORCE PARAMETERS OF GRAVITY-CASCADE SEPARATOR

I. Dudarev¹, A. Khomych², V. Olkhovskiy¹

¹Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

²Liubeshiv Technical College, Liubeshiv, Ukraine



Key words:

gravity separator,
separator parameters,
sieve tilt angle,
force calculation of
separator,
screw-nut transmission

Article history:

Received 28.07.2020

Accepted 03.09.2020

Corresponding author:

i_dudarev@ukr.net

ABSTRACT

Different types of separators are used to separate seed mass in agriculture. Seed separation is mainly carried out according to the physic and mechanical and aerodynamic properties of seed mass. Separators of gravity type are promising designs of seed separators. Energy is not used for the seed separation process in this type of separators, but energy is used for dosing and loading of seed mass. The design of the gravity-cascade separator of scissor type is proposed in the article. For seed separation, separation sections of gravity separator must be installed at a given tilt angle. The tilt angle of separation section depends on the physical and mechanical properties of the seed mass. The transmission screw-nut is proposed to install the separation sections of gravity-cascade separator in a given position. The scissor-type separator is a new type of separators, so the theoretical studies have been conducted to obtain its design and force parameters. The design of the proposed gravity-cascade separator belongs to scissor-type frame structure. To eliminate the possibility of unauthorized movement of the separator rollers, it is necessary to calculate the holding force. As a result of theoretical studies, the dependence between the screw-nut transmission parameters and the gravity-cascade separator parameters was obtained in the article. In addition, the dependence which allows us to determine the holding force of the separator sections in a given position was obtained by using the principle of virtual displacements. The weights of the separator, and seeds in the hopper and on the working surfaces of the gravity-cascade separator, and the sieve tilt angle were taken into account in the obtained dependence to determine holding force.

УДК 621.928:167

**РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ТА СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ
ГРАВІТАЦІЙНО-КАСКАДНОГО СЕПАРАТОРА****І.М. Дударев¹, А.В. Хомич², В.О. Ольховський¹**¹Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна²Любешівський технічний коледж, Любешів, Україна**Ключові слова:**

гравітаційний
сепаратор,
параметри сепаратора,
кут нахилу решіт,
силовий розрахунок
сепаратора,
передача “гвинт-гайка”

Історія публікації:

Отримано 28.07.2020

Затверджено 03.09.2020

**Автор для
листування:**

i_dudarev@ukr.net

АНОТАЦІЯ

У сільському господарстві для сепарування зерна використовують різні типи сепараторів. Сепарування в основному проводять за фізико-механічними та аеродинамічними властивостями зернової маси. До перспективних конструкцій сепараторів зернової маси відносяться гравітаційні сепаратори. У цих сепараторах енергія не витрачається на сепарування. У статті запропоновано гравітаційно-каскадний сепаратора ножичного типу. Конструкція гравітаційно-каскадного сепаратора відноситься до рамних конструкцій ножичного типу. Для забезпечення сепарування зерна в такому сепараторі, необхідно встановити сепарувальні секції під заданим кутом до горизонтальної площини, що визначається властивостями сировини. Для встановлення секцій сепаратора в задане положення в конструкції сепаратора пропонується використовувати передачу “гвинт-гайка”. Для усунення можливості самовільного переміщення роликів сепаратора необхідно розрахувати утримуюче зусилля. Крім того, для обґрунтування силових та конструктивних параметрів сепаратора необхідно було провести теоретичні дослідження. Дослідження дозволили встановити взаємозв'язок між параметрами сепаратора і передачі “гвинт-гайка”. Також використовуючи принцип можливих переміщень було отримано залежність для визначення зусилля, що необхідне для утримання секцій сепаратора в заданому положенні із урахуванням маси сепаратора та сировини, а також кута нахилу секцій до горизонтальної площини.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi45.315>

Стан питання та постановка проблеми

Зерно та насіння сільськогосподарських культур перед закладанням на зберігання, а також перед переробкою сепарують на сепараторах різних конструкцій з метою розділення на фракції за розміром та очищення від насіння інших культур, пошкодженого насіння та різних домішок [1]. Конструкція сепаратора зерна чи насіння залежить від способу сепарування, який він реалізує. У сільському господарстві сепарування в основному проводять за фізико-механічними та аеродинамічними властивостями зернової (насіenneвої) маси [2, 3].

Серед різноманітних конструкцій сепараторів [4] найменш енергоємними є гравітаційні сепаратори, в яких зернова (насіenneва) маса рухається робочими поверхнями внаслідок дії на неї сил гравітації. До гравітаційних сепараторів також відноситься сепаратор гравітаційно-каскадного типу [5], в якому сепарування зернової (насіenneвої) маси відбувається без енергетичних витрат безпосередньо на процес сепарування.

З'єднання сепарувальних секцій сепаратора гравітаційно-каскадного типу аналогічне до з'єднання важелів механізму ножичного типу, який широко використовується в підйомних механізмах [6], робототехніці [7], механізмах розгортання космічних антен [8], конструкціях мобільних мостів [9] тощо. Найбільшу конструктивну схожість сепаратор гравітаційно-каскадного типу має з підйомником ножичного типу. Кількість секцій такого підйомника визначає висоту піднімання вантажу [10], а кількість секцій сепаратора визначає кількість решіт, якими проходить потік зернової (насіenneвої) маси. Для піднімання в необхідне положення багатосекційних механізмів ножичних підйомників використовують один або декілька гідроциліндрів із різними схемами розташування [11]. Використання гідроциліндрів зумовлене необхідністю піднімання вантажів із великою масою, тоді як для піднімання легких сепарувальних секцій сепаратора гравітаційно-каскадного типу (для встановлення решіт під необхідним кутом до горизонтальної площини) використовувати гідроциліндр не є доцільним. Для встановлення сепарувальних секцій в необхідне положення більш доцільно використовувати передачу "гвинт-гайка".

Науковцями проведені розрахунки механізмів ножичного типу підйомників із різною кількістю секцій та розташуванням вантажів, зокрема, розраховано частоти власних коливань механізму [12, 13], проведено розрахунок на міцність з метою встановлення небезпечних перерізів механізму [14], проведено силовий розрахунок механізму на різних стадіях підйому [15], окремі розрахункові моделі дозволяють

врахувати тертя в шарнірах механізму [16], також встановлені залежності сил, які діють в механізмі, від кута повороту важелів секцій [17], розраховане необхідне зусилля для утримання механізму в заданому положенні [18]. Отримані науковцями результати теоретичних розрахунків можуть бути покладені в основу розрахунку та обґрунтування параметрів сепаратора гравітаційно-каскадного типу.

Мета дослідження – встановлення взаємозв'язку між конструктивними параметрами гравітаційно-каскадного сепаратора та передачею “гвинт-гайка”, що використовується для встановлення секцій сепаратора в робоче положення, а також визначення зусилля для утримання секцій сепаратора в заданому положенні.

Матеріали і методи

Конструкція гравітаційно-каскадного сепаратора відноситься до рамних конструкцій ножичного типу (рис. 1) [5]. Для усунення можливості самовільного переміщення роликів з визначеного положення, і, відповідно, самої конструкції, що може зумовити зміну кута α встановлення решіт та негативно вплинути на процес сепарування, необхідно визначити зусилля R , яке забезпечить утримання секцій сепаратора в необхідному положенні. Визначення зусилля R базувалося на основних положеннях теоретичної механіки, зокрема, було використано принцип можливих переміщень.

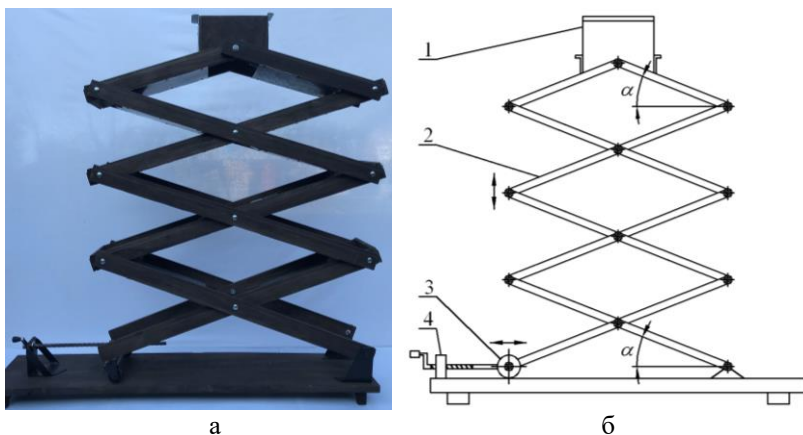


Рис. 1 – Гравітаційно-каскадний сепаратор (а) та схематичне зображення з'єднання сепарувальних секцій (б):

- 1 – бункер; 2 – сепарувальні секції; 3 – ролики;
4 – передача “гвинт-гайка”

Згідно принципу можливих переміщень сума елементарних робіт активних сил на будь-якому можливому переміщенні системи з положення рівноваги за умови, що в початковий момент система є нерухомою, рівна нулю [19]:

$$\sum_{k=1}^n \delta A(\vec{F}_k^a) = 0, \quad (1)$$

де $\delta A(\vec{F}_k^a)$ – елементарна робота k -ої активної сили, Дж; n – кількість активних сил, шт.

За малого переміщення δs тіла під дією сили F , над ним здійснюється робота [20]:

$$\delta A = F \delta s \cos \theta, \quad (2)$$

де δA – робота сили F , Дж; F – сила, Н; δs – переміщення, м; θ – кут між вектором сили F та напрямком переміщення δs , град.

Під час визначення зусилля R припускали, що маса зерна (насіння) у бункері, на решетах та піддонах сепарувальних секцій є сталою величиною (уявно зупиняли потік зернової (насінневої) маси на решетах і піддонах). Крім того, припускали, що на симетричних сепарувальних секціях маса зерна (насіння) є однаковою.

Результати дослідження та обговорення

Регулювання положення сепарувальних секцій гравітаційно-каскадного сепаратора, тобто встановлення решіт під необхідним кутом α до горизонтальної площини, відбувається за допомогою передачі “гвинт-гайка”. Встановимо взаємозв’язок між параметрами сепарувальних секцій та передачі “гвинт-гайка”. Для цього розглянемо дві нижні сепарувальні секції сепаратора A та B . Нехай, в початковий момент відстань між нижніми кінцями секцій становить S_0 (рис. 2), а кут нахилу решіт (сепарувальних секцій) до горизонтальної площини – α_0 . Тоді, враховуючи, що сепарувальні секції з’єднані шарніром посередині, матимемо залежність:

$$S_0 = 2l \cos \alpha_0, \quad (3)$$

де S_0 – відстань між нижніми кінцями сепарувальних секцій в початковий момент, м; l – довжина між отворами під шарніри на сепарувальних секціях, м; α_0 – початковий кут нахилу решіт (сепарувальних секцій) до горизонтальної площини, град.

Для того, щоб збільшити кут α нахилу решіт, необхідно зменшити відстань S між нижніми кінцями сепарувальних секцій, тобто можна записати $S = S_0 - \Delta S$ (де ΔS – переміщення опорних роликів вправо з початкового положення (рис. 2, а), вісь яких розташована в нижніх

отворах нижньої сепарувальної секції A , за допомогою передачі “гвинт-гайка”, м).

Для того, щоб зменшити кут α нахилу решіт, необхідно збільшити відстань S між нижніми кінцями сепарувальних секцій, тобто можна записати $S = S_0 + \Delta S$ (де ΔS – переміщення опорних роликів вліво з початкового положення за допомогою передачі “гвинт-гайка” (рис. 2, б), м). Ураховуючи зазначене, можна записати:

$$S_0 \pm \Delta S = 2l \cos \alpha, \quad (4)$$

де α – кут нахилу решіт (секцій) до горизонтальної площини, град.

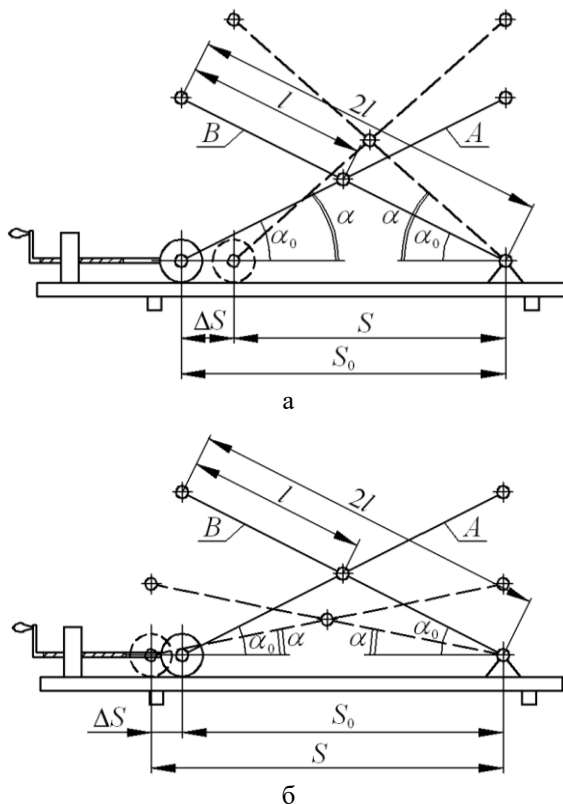


Рис. 2 – Схеми розташування нижніх сепарувальних секцій A та B :
 а – кут нахилу секцій зростає від α_0 до α ($S = S_0 - \Delta S$);
 б – кут нахилу секцій зменшується від α_0 до α ($S = S_0 + \Delta S$)

Після підставлення у залежність (4) залежності (3), матимемо:

$$2l \cos \alpha_0 \pm \Delta S = 2l \cos \alpha. \quad (5)$$

Переміщення опорних роликів від передачі “гвинт-гайка”:

$$\Delta S = n_{об.} P, \quad (6)$$

де $n_{об.}$ – кількість обертів передачі “гвинт-гайка”, обертів; $n_{об.}$ – крок різі передачі “гвинт-гайка”, м.

Якщо прийняти, що у випадку обертання гвинта передачі “гвинт-гайка” проти годинникової стрілки відстань між нижніми кінцями сепарувальних секцій зменшується, тоді у залежності (5), перед значенням ΔS , яке розраховане за залежність (6), ставиться знак “-”. У цьому випадку матимемо $\alpha > \alpha_0$. Тоді, у випадку обертання гвинта передачі “гвинт-гайка” за годинниковою стрілкою, відстань між нижніми кінцями сепарувальних секцій збільшується, і, відповідно, у залежності (5), перед значенням ΔS , яке розраховане за залежність (6), ставиться знак “+”. У цьому випадку матимемо $\alpha < \alpha_0$.

Знаючи початковий кут α_0 встановлення решіт, необхідний кут α встановлення решіт та параметри сепарувальних секцій і передачі “гвинт-гайка”, можна визначити необхідну кількість обертів і їх напрямок для встановлення решіт сепаратора в необхідне положення:

$$n_{об.} = \frac{2l}{P} (\cos \alpha - \cos \alpha_0). \quad (7)$$

Таким чином, у випадку $\alpha > \alpha_0$ матимемо число обертів $n_{об.}$, що розраховане за залежністю (7), зі знаком “-”, тобто для встановлення решіт під кутом α , необхідно обертати гвинт передачі “гвинт-гайка” проти годинникової стрілки; у випадку $\alpha < \alpha_0$ матимемо число обертів $n_{об.}$, що розраховане за залежністю (7), зі знаком “+”, тобто для встановлення решіт під кутом α , необхідно обертати гвинт передачі “гвинт-гайка” за годинниковою стрілки.

Визначимо зусилля R , яке необхідне для утримання секцій гравітаційно-каскадного сепаратора в заданому положенні. Для цього виокремимо в конструкції сепаратора дві нижні сепарувальні секції A та B , що з'єднані навхрест (рис. 3). Зведемо задачу до плоскої задачі. Це можливо, оскільки рамна конструкція нижніх сепарувальних секцій містить паралельні групи ланок, що мають однакову геометрію, характеристики та закріплення. Масою нижніх сепарувальних секцій і роликів та тертям у їх шарнірах нехтуємо. До верхніх кінців цих секцій (на рис. 3 – це точки D та E) прикладемо однакові сили $P/2$ (де P – сила ваги усіх сепарувальних секцій, окрім двох нижніх, разом із бункером та зерною (насінневою) масою у бункері, на решетах і піддонах сепарувальних секцій, Н).

Система, що розглядається, має один ступінь вільності. За незалежне можливе переміщення системи оберемо $\delta\alpha$ – кут повороту сепарувальної секції B . Позначимо можливі переміщення точок системи (конструкції): точки D через δs_1 , точки E – δs_2 , точки L – δs_3 та точки K – δs_4 (рис. 3).

Ураховуючи прийняті припущення, надамо нижнім сепарувальним секціям сепаратора можливого переміщення, тобто коли під вагою решти секцій, бункера та зернової (насіньової) маси ролик починає рухатися вліво платформою внаслідок повороту нижньої секції B на елементарний кут $\delta\alpha$ (рис. 3). Ураховуючи зазначене, запишемо рівняння суми робіт активних сил, що діють на механізм:

$$\frac{P}{2} \delta s_1 \cos \alpha + \frac{P}{2} \delta s_2 - R \delta s_3 = 0, \quad (8)$$

де P – сила ваги сепарувальних секцій (без двох нижніх секцій) разом із бункером та зерною (насіньовою) масою, Н; δs_1 – можливе переміщення верхнього кінця нижньої секції B , м; δs_2 – можливе переміщення верхнього кінця нижньої секції A , м; δs_3 – можливе переміщення нижнього кінця нижньої секції A , м.

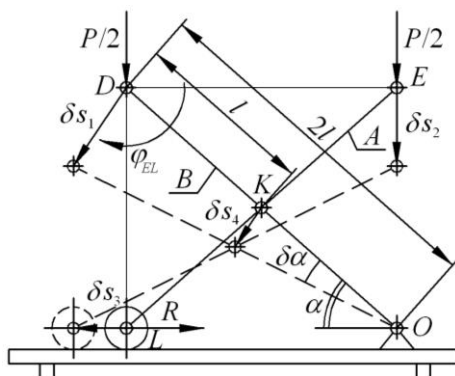


Рис. 3 – Схема до визначення зусилля R , яке необхідне для утримання секцій гравітаційно-каскадного сепаратора в заданому положенні

Визначимо можливе переміщення верхнього кінця нижньої сепарувальної секції B (на рис. 3 – це точка D):

$$\delta s_1 = 2l \delta \alpha, \quad (9)$$

де $\delta\alpha$ – можливе переміщення нижньої секції сепаратора B , рад.

Визначимо можливе переміщення δs_4 місця з'єднання нижніх сепарувальних секцій A та B (на рис. 3 – це точка K):

$$\delta s_4 = l \delta \alpha . \quad (10)$$

Для сепарувальної секції A побудуємо миттєвий центр обертання (на рис. 3 – це точка D). Тоді можливе переміщення δs_2 верхнього кінця нижньої сепарувальної секції A (на рис. 3 – це точка E):

$$\delta s_2 = \delta \varphi_{EL} \cdot DE = \frac{\delta s_4}{l} 2l \cos \alpha = 2l \cos \alpha \delta \alpha . \quad (11)$$

Визначимо можливе переміщення δs_3 нижнього кінця нижньої сепарувальної секції A (на рис. 3 – це точка L). Оскільки проєкції можливих переміщень двох довільних точок (на рис. 3 – це точки E та L) твердого тіла на вісь, яка проходить через ці дві точки, рівні між собою, тоді можна записати рівність:

$$\delta s_2 \sin \alpha = \delta s_3 \cos \alpha , \quad (12)$$

Після підстановки рівняння (11) у рівнянні (12), отримаємо:

$$\delta s_3 = 2l \sin \alpha \delta \alpha . \quad (13)$$

Після підстановки можливих переміщень, які визначені за виразами (9), (11) та (13) у рівняння (8), матимемо:

$$P \cos \alpha - R \sin \alpha = 0 . \quad (14)$$

Із рівняння (14) визначимо зусилля R , яке забезпечить утримання секцій сепаратора в заданому положенні:

$$R = \frac{P}{\operatorname{tg} \alpha} . \quad (15)$$

Аналіз графіків (рис. 4), які побудовані за залежністю (15), вказує на те, що зі зростанням навантаження P на нижні секції сепаратора відбувається зростання зусилля R , яке необхідне для утримання секцій сепаратора в заданому положенні.

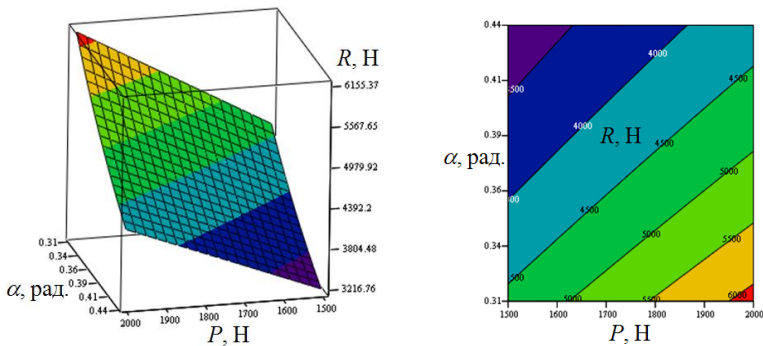


Рис. 4 – Графічні залежності зусилля R від кута α нахилу секцій сепаратора та його ваги P

Діапазон значень кута α для побудови графіків (рис. 4) обирали із урахуванням значень кутів тертя $\varphi_{тер.}$ зерна та насіння різних культур, за яких буде забезпечено рух сипких матеріалів поверхніми решіт сепаратора ($\alpha \geq \varphi_{тер.}$), а діапазон значень сила ваги P із урахуванням ступеня заповнення бункера сипким матеріалом та висоти шару матеріалу на решетах (подачі матеріалу).

Крім того, встановлено, що зменшення кута α нахилу сепарувальних секцій до горизонтальної площини також зумовлює зростання зусилля R . Зусилля R необхідне для обґрунтування силових параметрів передачі “гвинт-гайка” або інших передач (гідравлічної, пневматичної) чи конструктивних елементів, що можуть бути використані для встановлення, фіксації і утримання секцій сепаратора в заданому положенні.

Висновки

Проведені теоретичні дослідження дозволили отримати залежності, які встановлюють взаємозв'язок між параметрами гравітаційно-каскадного сепаратора ножичного типу та параметрами передачі “гвинт-гайка”, яка використовується для встановлення сепарувальних секцій сепаратора під необхідним кутом до горизонтальної площини, що визначається залежно від фізико-механічних властивостей сировини. Крім того, використовуючи принцип можливих переміщень під час визначення силових параметрів конструкції сепаратора, отримано залежність, яка встановлює взаємозв'язок між зусиллям, що необхідне для утримання секцій сепаратора в заданому положенні, та вагою сепаратора з сировиною і кутом нахилу сепарувальних секцій до горизонтальної площини. Так, у випадку повного заповнення бункера сипкою сировиною ($P = 2000$ Н) та за кута встановлення решіт сепаратора $\alpha = 0,32$ рад. ($\approx 18^\circ$), зусилля, що необхідне для утримання секцій сепаратора в заданому положенні, становитиме $R = 6155$ Н.

Отримані залежності дозволяють обґрунтувати силові параметри механічних та інших передач чи конструктивних елементів, які можуть бути використані для встановлення секцій сепаратора в необхідне положення та їх фіксації і утримання в цьому положенні під час сепарування сировини.

Список посилань

1. Wang, Y., Yu, J., Yu, Y., Fu, H. (2017). Numerical simulation of the particular flow on an agricultural screen with a complex motion based on the coupling model of PMBK with DEM. In: X. Li, Y. Feng, G. Mustoe (eds): Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods. DEM 2016.

- Springer Proceedings in Physics. Springer, Singapore, 188, 687–695. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_71
2. Voicu, G., Casandroi, T., Tarcolea, C. (2008). Testing stochastic models for simulating the seeds separation process on the sieves of a cleaning system, and a comparison with experimental data. *Agricultural Conspectus Scientificus*, 73(2), 95–101.
 3. Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M. (2002). A numerical simulation of separation of crop seeds by screening – effect of particle bed depth. *Food and Bioproducts Processing*, 80(2), 109–117. <https://doi.org/10.1205/09603080252938744>
 4. Kugbei, S., Avungana, M., Hugo, W. (2018). Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and AfricaSeeds. Rome.
 5. Дударев, І.М. (2020). Сепаратор гравітаційно-каскадного типу. Патент №139435, Україна.
 6. Islam, M.T., Yin, C., Jian, S., Rolland, L. (2014). Dynamic analysis of scissor lift mechanism through bond graph modeling. In: 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Besancon, France. IEEE, 1393–1399. <https://doi.org/10.1109/AIM.2014.6878277>
 7. Zhang, K., Liu, Y.-W., Li, Y.-J. (2018). A simplified analysis method and simulation of the scissors mechanism in the ET Robot. In: Chao Li (ed.): International Conference on Control Engineering and Mechanical Design (CEMD 2017). ASME Press. http://doi.org/10.1115/1.861677_ch7
 8. Han, B., Xu, Y., Yao, J., Zheng, D., Li, Y., Zhao, Y. (2019). Design and analysis of a scissors double-ring truss deployable mechanism for space antennas. *Aerospace Science and Technology*, 93, 105357. <http://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105357>
 9. Chikahiro, Y., Ario, I., Pawlowski, P., Graczykowski, C., Nakazawa, M., Holnicki-Szulc, J., Ono, S. (2017). Dynamics of the scissors-type mobile bridge. *Procedia Engineering*, 199, 2919–2924. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.339>
 10. Hongyu, T., Ziyi, Z. (2011). Design and simulation based on Pro/E for a hydraulic lift platform in scissors type. *Procedia Engineering*, 16, 772–781. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1153>
 11. Астахов, Э.И., Гарах, В.А., Шкурко, С.С. (2012). Сравнительный анализ схем приводов механизмов ножничных подъемников. В: Б.М. Хрусталева (ред.): *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов: по материалам Международной научно-технической конференции “Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении”*. Белорусский национальный технический университет; Минск, Беларусь. БНТУ, Минск, 26(2), 26–29.
 12. Кирсанов, М.Н., Цзян, Х. (2016). Математическая модель и анализ колебаний ножничного механизма с произвольным числом элементов. *Строительство: новые технологии – новое оборудование*, 10, 52–57.
 13. Al-Sharabi, A.M., Kirsanov, M.N. (2017). Analysis of natural frequencies for the multi-link lift. *Научный альманах*, 2–3(28), 234–237.

14. Партко, С.А., Сиротенко, А.Н., Боровков, А.С., Войнаш, С.А. (2019). Проверка адекватности математической модели силового расчета ножничного подъемного механизма. Известия ТулГУ. Технические науки, 2, 395–401.
15. Грищенко, В.М. (2017). Алгоритм розрахунку та аналіз силового навантаження моделі ножничного підйомника на різних стадіях підйому. Вісник НТУ “ХПІ”, 40(1262), 19–25. <http://doi.org/10.20998/2078-9130.2017.40.119709>
16. Бортяков, Д.Е., Соколов, В.П. (2012). Учет трения в шарнирах многозвенных механизмов. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 3–2(154), 121–125.
17. Соколов, С.А. (2012). Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник. Политехника, Санкт-Петербург, 425.
18. Самаркин, А.И., Дмитриев, С.И. (2009). К расчету необходимого удерживающего усилия подъемника ПГ-3. Труды Псковского политехнического института, 12.3, 208–213.
19. Павловський, М.А. (2002). Теоретична механіка: підручник. Техніка, Київ, 512.
20. Бондаренко, А.А., Дубінін, О.О., Переяславцев, О.М. (2004). Теоретична механіка: підручник: у 2 ч. – ч. 2: Динаміка. Знання, Київ, 590.