

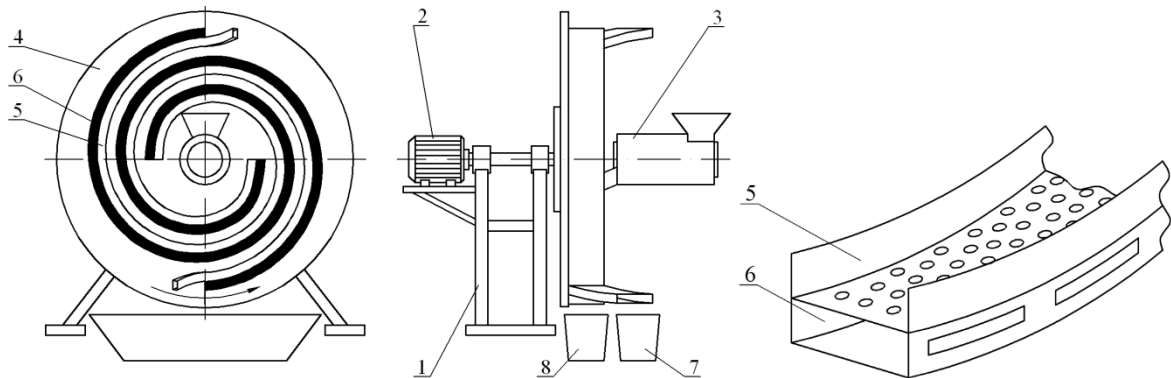
Дударев І.М., Голячук С.Є.
Луцький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПІРАЛЬНОГО СЕПАРАТОРА

У статті вказано, що сепарування насінневого вороху льону – це одна з найбільш складних технологічних операцій його переробки. Потреба розділення насінневого вороху льону на складові (вільне насіння льону та насінневі коробочки льону) зумовлена необхідністю зниження енергоємності процесу сушіння складових вороху. Для сепарації насінневого вороху льону пропонується використовувати спіральний сепаратор, що містить спіралеподібне решето. Запропоноване конструктивне рішення дозволяє зменшити габаритні розміри сепаратора за рахунок встановлення спіралеподібного робочого органа, і, відповідно, зменшити його металомісткість. У статті також теоретично обґрунтовано кінематичні параметри спірального сепаратора, зокрема допустимого куту швидкості обертання його спірального решета в залежності від конструктивного виконання. Встановлений раціональний режим роботи спірального сепаратора дозволить забезпечити якісне виконання технологічної операції розділення насінневого вороху на вільне насіння та насінневі коробочки льону без їх пошкодження та втрати.

Ключові слова: спіральний сепаратор, спіралеподібне решето, кінематичні параметри, допустима швидкість обертання спірального решета.

Постановка проблеми. У харчовій промисловості для розділення сипких матеріалів за розмірами на фракції використовують сепаратори різного конструктивного виконання. Найбільш поширеними є сепаратори з плоскими та барабаними решетами. Основними недоліками сепараторів з плоскими та барабаними робочими органами є значні габаритні розміри та металомісткість конструкцій. Усунути зазначені недоліки відомих конструкцій сепараторів можна застосовуючи конструкцію спірального сепаратора [1], що представлений на рис. 1.



1 – рама; 2 – привод; 3 – бункер; 4 – диск; 5 – спіралеподібне решето; 6 – спіралеподібний збірник; 7 – накопичувач для основної фракції; 8 – накопичувач для дрібної фракції

Рисунок 1 – Спіральний сепаратор

Спіральний сепаратор є більш компактним та має меншу металомісткість. Для забезпечення якісного виконання технологічної операції сепарації сипких матеріалів на спіральному сепараторі необхідно обґрунтувати його раціональний режим роботи з врахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу. Режим роботи спірального сепаратора також залежить від конструкції спірального решета та визначається куту швидкості обертання решета. Тому дослідження спрямовані на визначення кінематичних параметрів спірального сепаратора є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надзвичайно актуальними є дослідження спрямовані на зменшення енергоємності технологічних операцій за рахунок обґрунтування раціональних режимів роботи обладнання. Серед найбільш енергоємних операцій в технології переробки лляного вороху є сушіння його складових. Для зниження енергоємності сушіння проводять розділення насінневого вороху льону перед операцією на складові: насінневі коробочки та вільне насіння льону. Дослідженням сепарації насінневого вороху льону присвячені праці багатьох вітчизняних та закордонних науковців [2 – 4]. Разом з тим, запропонована нова конструкція

спірального сепаратора [1], а, відповідно, є необхідність в проведенні теоретичних досліджень з метою обґрунтування раціонального режиму його роботи.

Мета дослідження – теоретичне обґрунтування кінематичних параметрів спірального сепаратора, зокрема визначення допустимих значень кутової швидкості обертання спірального решета в залежності від його конструктивного виконання.

Результати дослідження. Визначимо кутову швидкість обертання $\omega_{сп.}$ спіралеподібного решета сепаратора за якої частинка сипкого матеріалу (у нашому випадку – насінневого вороху льону) буде рухатися поверхнею решета. Дослідження будемо проводити, враховуючі положення, що викладені в роботі [5]. Для цього визначимо сили, що діють на частинку насінневого вороху, яка знаходиться на поверхні спіралеподібного решета, що скручене по спіралі Архімеда або логарифмічній спіралі. На частинку насінневого вороху, яку приймаємо за матеріальну точку A , діють (рис. 2): сила ваги $m_{н.в.}g$ (де $m_{н.в.}$ – маса частинки насінневого вороху льону, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²), Н; сила реакції N поверхні спіралеподібного решета, що спрямована вздовж нормалі до поверхні решета, Н; сила тертя $F_{тер.} = f_{н.в.}N$ (де $f_{н.в.}$ – коефіцієнт тертя насінневого вороху льону по поверхні спіралеподібного решета), що спрямована по дотичній до поверхні решета, Н; відцентрова сила інерції переносного руху $P_{и.} = m_{н.в.}\omega_{сп.}^2\rho$ (де ρ – відстань від осі обертання решета до розглядуваної частинки вороху на решеті (радіус спіралі, за якою скручене спіралеподібне решето), м), що спрямована вздовж радіуса ρ .

Початком рухомих координат будемо вважати точку A та спрямуємо вісь $A\tau$ по дотичній до поверхні спіралеподібного решета у напрямку можливого переміщення частинки, а вісь An спрямуємо по нормалі до поверхні решета в напрямку від осі його обертання. Нехай частинка вороху залишається у стані відносного спокою на поверхні решета до його повороту на граничний кут α . Для того, щоб частинка перебувала у стані рівноваги необхідно, щоб сума проєкцій сил на осі $A\tau$ та An була рівною нулю. Таким чином, рівняння рівноваги частинки вороху на спіралеподібному решеті матимуть вигляд:

$$\begin{cases} A\tau : P_{и.}\cos\mu + m_{н.в.}g\cos\lambda\cos\mu + m_{н.в.}g\sin\alpha\sin\mu - F_{тер.} = 0; \\ An : P_{и.}\sin\mu + m_{н.в.}g\cos\lambda\sin\mu - m_{н.в.}g\sin\alpha\cos\mu - N = 0; \end{cases} \quad (1)$$

де μ – кут між радіусом-вектором довільної точки спіралі $\rho = \rho(\varepsilon)$ і дотичною до неї в цій точці, град.

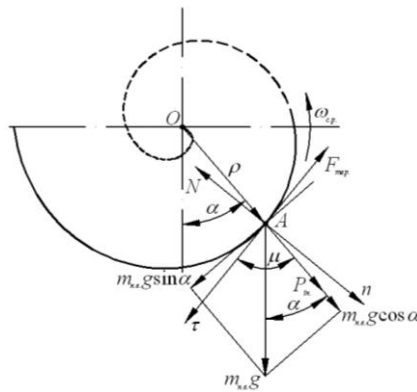


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на частинку насінневого вороху, яка знаходиться на спіралеподібному решеті

З другого рівняння системи (1) визначимо силу N :

$$N = P_{и.}\sin\mu + m_{н.в.}g\cos\lambda\sin\mu - m_{н.в.}g\sin\alpha\cos\mu \quad (2)$$

Для руху частинки насінневого вороху поверхнею решета має виконуватися умова, що отримана з першого рівняння системи (1):

$$P_{и.}\cos\mu + m_{н.в.}g\cos\lambda\cos\mu + m_{н.в.}g\sin\alpha\sin\mu > F_{тер.} \quad (3)$$

Після підстановки в умову (3) значень сил $P_{и}$ та $F_{мер.}$, а також тригонометричних перетворень, отримаємо:

$$\omega_{c.p.}^2 \rho (\cos \mu - f_{н.в.} \sin \mu) > g (f \sin(\mu - \alpha) - \cos(\mu - \alpha)) \quad (4)$$

Приймаючи, що при розкручуванні спіралеподібного решета, скрученого як за спіраллю Архімеда, так і логарифмічною спіраллю, справедлива нерівність $(\cos \mu - f_{н.в.} \sin \mu) < 0$, тоді умову (4) можна записати наступним чином:

$$\omega_{c.p.} < \sqrt{\frac{g (f \sin(\mu - \alpha) - \cos(\mu - \alpha))}{\rho (\cos \mu - f_{н.в.} \sin \mu)}} \quad (5)$$

Для створення сприятливих умов для сепарації насінневого вороху необхідно, щоб частинка насінневого вороху піднімалася на найменший граничний кут α , приймаємо $\alpha = \varphi_{мер.}$ (де $\varphi_{мер.}$ – кут тертя насінневого вороху льону по поверхні спіралеподібного решета, град.). Враховуючи, що $\alpha = \varphi_{мер.}$, $f_{н.в.} = \operatorname{tg} \varphi_{мер.}$ та провівши тригонометричні перетворення в умові (5), матимемо:

$$\omega_{c.p.} < \sqrt{\frac{-g \cos \mu}{\rho (\cos \varphi_{мер.} \cos \mu - \sin \varphi_{мер.} \sin \mu)}} = \sqrt{\frac{-g}{\rho (\cos \varphi_{мер.} - \sin \varphi_{мер.} \operatorname{tg} \mu)}} \quad (6)$$

Визначимо тангенс кута μ [6]:

- для спіралі Архімеда, яка описується рівнянням $\rho(\varepsilon) = a\varepsilon$ (де a – коефіцієнт спіралі Архімеда ($a = h_{сн.} / 2\pi$), м/рад.; $h_{сн.}$ – крок спіралі Архімеда, м; ε – кут спіралі Архімеда, град.):

$$\operatorname{tg} \mu^{Арх.} = \frac{\rho(\varepsilon)}{\rho'(\varepsilon)} = \frac{a\varepsilon}{a} = \varepsilon \quad (7)$$

- для логарифмічної спіралі, яка описується рівнянням $\rho(\varepsilon) = \rho_0 e^{m\varepsilon}$ (де ρ_0 – початковий радіус логарифмічної спіралі, м; ε – кут логарифмічної спіралі, град.; m – коефіцієнт логарифмічної спіралі ($m = (\rho - \rho_0) / l^{лог.}$); $l^{лог.}$ – довжина логарифмічної спіралі, що обмежена радіусами ρ_0 та ρ , м):

$$\operatorname{tg} \mu^{лог.} = \frac{\rho(\varepsilon)}{\rho'(\varepsilon)} = \frac{\rho_0 e^{m\varepsilon}}{\rho_0 m e^{m\varepsilon}} = \frac{1}{m} \quad (8)$$

Умова (6) з врахуванням виразів (7) та (8) матиме вигляд:

$$\omega_{c.p.} < \sqrt{\frac{-g}{\rho^{Арх./лог.} (\cos \varphi_{мер.} - \sin \varphi_{мер.} \operatorname{tg} \mu^{Арх./лог.})}} \quad (9)$$

де $\rho^{Арх./лог.}$ – радіус спіралеподібного решета, що скручене за спіраллю Архімеда або логарифмічною спіраллю, на якому знаходиться частинка насінневого вороху, м.

Для сепарації насінневого вороху у спіральному сепараторі, необхідно забезпечити ковзання частинки вороху поверхнею спіралеподібного решета, а також високу продуктивність сепаратора, яка залежить від кутової швидкості обертання $\omega_{ср.}$. Збільшити продуктивність можна збільшуючи кутову швидкість обертання спіралеподібного решета $\omega_{ср.}$, але при зростанні кутової швидкості може настати момент, коли частинка вороху “прилипне” до решета і почне рухатися разом з ним. При цьому ковзання частинки поверхнею спіралеподібного решета буде відсутнє, а, відповідно, не відбуватиметься процес сепарації. Порівняємо спіралеподібні решета, що скручені по спіралі

Архімеда та логарифмічній спіралі, за значеннями допустимої швидкості їх обертання $[\omega_{c.p.}]^{Apx.}$ та $[\omega_{c.p.}]^{log.}$. Спіралеподібне решето доцільно скручувати за тією спіраллю, для якої значення допустимої швидкості обертання решета буде більшим, оскільки при забезпеченні ковзання поверхнею решета частинки вороху, таке решето матиме більшу продуктивність.

Для порівняння задамо для решета, що скручене за спіраллю Архімеда, значення кроку спіралі $h_{cn.} = 0,15$ м, найменшого радіуса спіралеподібного решета $\rho_1^{Apx.} = 0,3$ м та довжину решета $l^{Apx.} = 4$ м. З рівнянням спіралі Архімеда визначимо значення кута $\varepsilon_1 = \rho_1^{Apx.} / a = 12,55$ рад. За рівнянням довжини

$$l^{Apx.} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sqrt{\rho^2(\varepsilon) + \rho'^2(\varepsilon)} d\varepsilon = a \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sqrt{\varepsilon^2 + 1} d\varepsilon = \frac{a}{2} \left[\varepsilon \sqrt{1 + \varepsilon^2} + \ln(\varepsilon + \sqrt{1 + \varepsilon^2}) \right]_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2}$$

спіралі Архімеда

визначаємо шляхом підбору (оскільки аналітичний розв'язок рівняння відносно ε ускладнений) значення ε_2 , за якого довжина спіралі $l^{Apx.} = 4$ м, отримаємо $\varepsilon_2 = 22,18$ рад. Далі за рівнянням спіралі Архімеда визначаємо значення найбільшого радіуса спіралеподібного решета $\rho_2^{Apx.} = 0,53$ м. Тепер розглянемо спіралеподібне решето, що скручене за логарифмічною спіраллю, для якого задамо найменший радіус решета $\rho_0 = 0,3$ м, найбільший радіус решета $\rho_2^{log.} = 0,53$ м та довжину решета $l^{log.} = 4$ м, тоді $m = (\rho_2^{log.} - \rho_0) / l^{log.} = 0,058$. Для даного випадку при $\varepsilon_1 = 0$, отримаємо $\rho_1^{log.} = \rho_0 = 0,3$ м. З рівняння

логіфічної спіралі визначаємо значення $\varepsilon_2 = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_2^{log.}}\right)$. За отриманими значеннями перевіряємо довжину решета, скрученого за логарифмічною спіраллю

$$l^{log.} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sqrt{\rho^2(\varepsilon) + \rho'^2(\varepsilon)} d\varepsilon = \rho_0 \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} e^{m\varepsilon} \sqrt{1 + m^2} d\varepsilon = \frac{\rho_0 \sqrt{1 + m^2}}{m} e^{m\varepsilon} \Big|_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2}$$

Далі будемо графічні залежності (рис. 3) для допустимої швидкості обертання $[\omega_{c.p.}]^{Apx.}$ решета, що скручене за спіраллю Архімеда, та допустимої швидкості обертання $[\omega_{c.p.}]^{log.}$ решета, що скручене за логарифмічною спіраллю. Значення допустимих швидкостей обертання визначаються за виразом у правій частині умови (9), тобто:

$$[\omega_{c.p.}]^{Apx.} = \sqrt{\frac{-g}{\rho^{Apx.} (\cos \varphi_{мер.} - \sin \varphi_{мер.} \operatorname{tg} \mu^{Apx.})}}; \tag{10}$$

$$[\omega_{c.p.}]^{log.} = \sqrt{\frac{-g}{\rho^{log.} (\cos \varphi_{мер.} - \sin \varphi_{мер.} \operatorname{tg} \mu^{log.})}}. \tag{11}$$

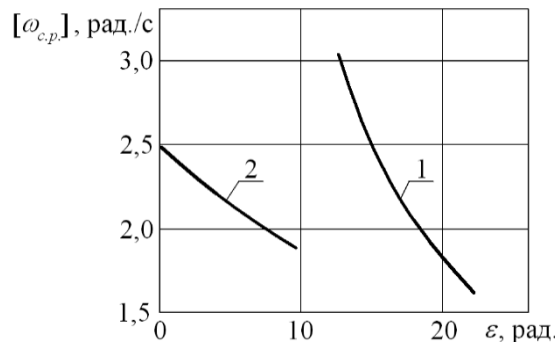


Рисунок 3 – Графічні залежності при $\varphi_{мер.} = 21$ град.: 1 – для допустимої швидкості обертання $[\omega_{c.p.}]^{log.}$ решета, що скручене за логарифмічною спіраллю; 2 – для допустимої швидкості обертання $[\omega_{c.p.}]^{Apx.}$ решета, що скручене за спіраллю Архімеда

Висновок. Аналіз графічних залежностей (рис. 3) показує, що більше значення допустимої кутової швидкості обертання спіралеподібного решета в кінці останнього витка (це характерне місце, оскільки тут найбільший радіус решета, а, відповідно, найбільше значення відцентрової сили, яка діє на частинку вороху) має решето, що скручене за логарифмічною спіраллю, тобто $[\omega_{c.p.}]^{log.} > [\omega_{c.p.}]^{Apx.}$,

відповідно, таке спіралеподібне решето забезпечує більшу продуктивність за однакових конструктивних параметрів з решетом, що скручене за спіраллю Архімеда.

Якщо спіральний сепаратор обладнано одним спіралеподібним решетом, тоді насіннєвий ворох подається на нього порціями, причому час між подачею порцій рівний часу, за який решето здійснює один оберт. Для збільшення продуктивності такого сепаратора, тобто збільшення частоти подачі порцій вороху, необхідно збільшувати частоту обертання решета. Як уже зазначалося, збільшення частоти обертання негативно впливає на процес сепарації. Тому для збільшення продуктивності необхідно збільшувати кількість спіралеподібних решіт, тоді частота подачі порцій вороху зростає. З іншої сторони кількість спіралеподібних решіт має бути обмежена, що зумовлено зростанням металомісткості та енергоємності конструкції сепаратора. Тому доцільно встановлювати від 2 до 4 спіралеподібних решіт.

Збільшення кількості спіралеподібних решіт забезпечує створення сприятливих умов для сепарації, оскільки шар вороху, що розміщується на витках, має меншу товщину. Перевагою спірального сепаратора також є те, що відцентрова сила, яка діє на частинку вороха, зростає із розкручуванням спіралеподібного решета, відповідно за довжиною решета можна розділяти матеріал, що сепарується, на фракції, які відрізняються за масою.

1. Пат. №111203 Україна, МПК В07В13/11. Спіральний сепаратор / Дударев І.М.; Заявлено 16.12.2013; Опубл. 11.04.2016; Бюл. № 7.

2. Кудрявцев С.Н. Повышение эффективности переработки сырого льновороха путем применения сепаратора / С.Н. Кудрявцев // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Минск, 2010. – С. 141-144.

3. Боярчук Ю.И. Повышение эффективности послеуборочной обработки льновороха путем его сепарации перед сушкой: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.20.01 / Боярчук Юрий Иванович; Всерос. селекц.-технол. ин-т садоводства и питомниководства. – М., 1994. – 13 с.

4. Карташевич С.М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытания технологических комплексов): монография / С.М. Карташевич. – Минск: РУП “БелНИИагроэнерго”, 2001. – 288 с.

5. Дударев І.М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону: монографія / І.М. Дударев. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. – 268 с.

6. Каплан И.А. Практические занятия по высшей математике / И.А. Каплан. – 3-е изд. – Харьков: ХГУ, 1967. – 947 с.

REFERENCES

1. Dudarev I.M. (2016). *Spiral separator [Spiralnyy separator]*, Patent №111203 Ukraine, IPC В07В13/11; application 16.12.2013, publ. 11.04.2016, Bulletin №7.

2. Kudravtsev S. (2010). Increase of efficiency of process of treatment of flax heap by application of separator. [*Povyshenie effektivnosti pererabotki syrogo lnovoroha putom primeneniya sепaratora*]. *Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists “Energy and resource saving technologies and technical equipment in the agricultural industry”*. [Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodyh uchonyh “Energoresursozberegaushie tehnologii i technicheskie sredstva dlya ih obespechenia v selskom hozaystve”]. Minsk, RUP “NPC NAN Belarusi po mehanizatsii selskogo hozaystva”, pp. 141-144.

3. Boyarchuk, Y. (1994). *Increase of efficiency of after harvesting treatment of flax heap by separation before drying*. Ph.D. Diss. [*Povyshenie effektivnosti posleuborochnoy obrobтки lnovoroha putom yego sепaratsii pered sushkoy*]. Ph.D. Diss.]. Moscow. 16 p.

4. Kartashevich, S. (2001). *Mechanical and technological bases of increase of efficiency of the mechanical complexes for after harvesting treatment of grain and seed*. [*Mehanico-technologicheskie osnovy povysheniya effektivnosti mehanizirovanyh kompleksov dlya posleuborochnoy obrobтки zerna i semyan*]. Minsk, RUP “BelNIИaagroenergo” Publ. 288 p.

5. Dudarev, I. (2015) *Theoretical foundations of modernization of machines for the production of flax*. [*Teoretychni osnovy modernizatsii mashyn dlya vyrobnytstva lonu*]. Monograph. Lutsk, Lutsk NTU Publ. 268 p.

6. Kaplan, I.A. (1967). *Collection of tasks to on-course mathematical analysis*. [*Prakticheskie zanytiya po vyshey matematike*]. Kharkiv, Kh. SU Publ. 947 p.

Дударев І.Н., Голячук С.Є. Определение кинематических параметров спирального сепаратора.

В статье указано, что сепарация семенного вороха льна – это одна из наиболее сложных технологических операций его переработки. Необходимость разделения семенного вороха льна на составляющие (свободные семена льна и семенные коробочки льна) обусловлена необходимостью снижения энергоёмкости процесса сушки составляющих вороха. Для сепарации семенного вороха льна предлагается использовать спиральный сепаратор, который включает спиралевидное решето. Предложенное конструктивное решение позволяет уменьшить габаритные размеры сепаратора за счет установки спиралевидного рабочего органа, и, соответственно, уменьшить его металлоёмкость. В статье также теоретически обоснованы кинематические параметры спирального сепаратора, а именно допустимая угловая скорость вращения его спирального решета в зависимости от конструктивного исполнения. Установлен рациональный режим работы спирального сепаратора, который разрешает обеспечить качественное исполнение технологической операции разделения семенного вороха на свободные семена и семенные коробочки льна без их повреждения и потерь.

Ключевые слова: спиральный сепаратор, спиралевидное решето, кинематические параметры, допустимая скорость вращения спирального решета.

I. Dudarev, S. Goliachuk. Determination of kinematic parameters of the spiral separator.

Separation of flax heap is one of the most complex refining processes. Flax seed heap contains flax seeds and flax capsules. That's why flax seed heap must be separated before drying to reduce energy consumption. During the separation flax seed heap divided into two components: free flax seeds and flax capsules. Drying individual flax seeds and flax capsules reduces energy consumption in the process. The method of separation of flax seed heap depends on the composition of the heap. Considerable attention of researchers aimed at substantiation of rational methods of separation heap of flax, which would permit to minimize losses and damage all components of the heap. The design of spiral separator is proposed for separation of flax seed heap. Spiral separator includes spiral sieve. Formulas for determination of border speed of rotation of spiral sieve are got as a result of theoretical research of work of spiral separator.

Keywords: spiral separator, spiral sieve, energy parameters, border speed of rotation of spiral sieve.

АВТОРИ:

ДУДАРЕВ Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, Луцький національний технічний університет, доцент кафедри обладнання переробних виробництв, e-mail: opv@lntu.edu.ua

ГОЛЯЧУК Сергій Євгенович, кандидат сільськогосподарських наук, Луцький національний технічний університет, завідувач кафедри обладнання переробних виробництв, e-mail: opv@lntu.edu.ua

АВТОРЫ:

ДУДАРЕВ Игорь Николаевич, кандидат технических наук, Луцкий национальный технический университет, доцент кафедры оборудования перерабатывающих производств, e-mail opv@lntu.edu.ua

ГОЛЯЧУК Сергей Евгеньевич, кандидат сельскохозяйственных наук, Луцкий национальный технический университет, заведующий кафедры оборудования перерабатывающих производств, e-mail: opv@lntu.edu.ua

AUTHORS:

Igor DUDAREV, Ph.D., Lutsk National Technical University, associate professor of Refining Production Equipment Department, e-mail: opv@lntu.edu.ua

Sergiy GOLIACHUK, Ph.D., Lutsk National Technical University, associate professor of Refining Production Equipment Department, e-mail: opv@lntu.edu.ua

Стаття надійшла в редакцію 05.09.2016р.