

# **Підвищення ресурсу та зниження енерго та металоємності обладнання**

## ***Improving the resource and a reduction in the energy and metal consumption of the equipment***

УДК 621.928.26

### **К РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ НА ПРОФИЛЯХ НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**Богомолов А.В., д.т.н., проф.,**

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)*

**Брагинец Н.В., д.т.н., проф., Богомолов А.А., аспирант**

*(Луганский национальный аграрный университет)*

*В статье рассмотрены вопросы сепарации частиц детермированной формы и размеров от частиц, форма и размеры которых отличаются от частиц основной формы. Определены параметры начала движения частиц, входение их на сепарирующую поверхность из зоны загрузки и укоса частиц «неправильной формы» из зоны сепарации с помощью гибкой бесконечной ленты с профилями наименьшего сопротивления.*

**Постановка проблемы.** Одним из наиболее энергоэффективных способов сепарации сыпучих материалов является способ сепарации на сепарирующих поверхностях с профилями наименьшего сопротивления [1]. Наиболее эффективен данный способ для сепарации частиц, детермированной формы, например таблетированных лекарственных форм, дражированных семян и других изделий при изменении их формы из-за нарушений технологического процесса слипани, случайном смешивании частиц различной формы и размеров и других случаях.

В тоже время размеры и форма большинства изделий строго детермированы, и способ сепарации на сепарирующих поверхностях с ПНС позволит практически идеально выделить из смеси эти примеси.

Для этого необходимо решить две задачи:

1) разработать рекомендации по обеспечению необходимых условий начала качения частицы;

2) обеспечить нетравмируемость изделий и унос примесей из зоны сепарации.

Вторая задача может быть решена выполнением сепарирующей подвижной поверхности в виде гибкой эластичной бесконечной ленты.

Решение же первой играет решающую роль при создании таких сепараторов. Это поясняется следующим.

Частица на строго фиксированный участок профиля наименьшего сопротивления должна попадать строго определенным участком своего сечения со стабильными динамическими параметрами. Вследствие того, что при качении без скольжения катящаяся частица и ПНС представляют собой подвижную и неподвижную центроиды, между точками касания при движении должно выполняться взаимоднозначное соответствие [2]. Это значит, что при наличии скольжения преимущества этого способа сепарации существенно снижаются даже для детерминированных форм сечений.

Именно благодаря этому обстоятельству этот способ и пригоден для случаев особо точной сепарации.

В этой связи рассмотрим процесс сепарирования таблеток «Раунатин» и «Силибор» производства Харьковской фармацевтической компании «Здоровье». Таблетка «Раунатин» представляет собой геометрическое тело в виде эллипсоида вращения с полуосями  $a = 3,65 \text{ мм}$ ,  $b = 1,9 \text{ мм}$ . Это значит, что эксцентриситет эллипса, составляющего поперечное сечение эллипсоида,  $\varepsilon = 0,85$ . Определим, согласно [3, 4], коэффициент трения таблетки о поверхность ПНС: предельное значение коэффициента трения удовлетворяет неравенству:

$$\frac{e^2}{2\sqrt{1-e^2}} < f,$$

где  $e$  – эксцентриситет эллипса,  
 $f$  – коэффициент трения.

В нашем случае

$$\frac{e^2}{2\sqrt{1-e^2}} = 0,77.$$

Следовательно, искомый коэффициент  $f > 0,77$ .

Примем  $f > 0,8$ . Тогда угол наклона ПНС к горизонту должен быть близок к нулю (рис. 9.3.1 из [5]). Примем  $\alpha = 2^\circ$  с той целью, чтобы обеспечить гарантированное качение таблетки по профилю (даже при  $\alpha = 0^\circ$  качение возможно, однако, при достаточно больших силах трения ( $f = 0,8$ ) таблетка может остановиться раньше схода ее с профилированной деки). Таким образом, ПНС должен быть выполнен из такого материала, чтобы обеспечить коэффициент трения о таблетку  $f = 0,8$  и наклонен под углом  $2^\circ$  к горизонту.

Следует отметить, что устойчивым для тела с продолговатым сечением является такое его положение, когда оно расположено длинной полуосью вдоль образующей опорной поверхности (т.е. лежит или движется плашмя). Такое расположение тела допускает меньший произвол в выборе положения в пространстве, чем, скажем, качение. При качении некруглых тел для определения параметров движения требуется большее количество независимых координат и большее количество допущений, обеспечивающих стабилизацию конечных условий движения. В связи с этим, очевидно, для выбора режима

движения таблетки в питателе сепаратора с ПНС следует выбрать скольжение неопрокидывающейся частицы по гравитационной поверхности. Так же очевидно, что заход на ПНС должен быть безударным во избежание отскока частицы (таблетки) от деки, откуда следует, что поступательная скорость подачи питателя должна быть минимальной, определяемой из соображений обеспечения необходимого запаса энергии для преодоления длины деки до схода с нее. Следует учесть также, что частицы не должны сталкиваться или слипаться друг с другом, что нарушило бы работу сепаратора. Кроме того, необходимо обеспечить унос некондиционных частиц с участка поступления и сепарации частиц на ПНС. Учитывая вышеизложенное, следует считать целесообразным, что питающее устройство нужно выполнить из двух частей: неподвижного питателя в виде наклонной плоскости и подвижной стабилизирующей наклонной плоскости (стабилизатора), совершающей совместное движение с ПНС. ПНС же со стабилизатором следует выполнять в виде бесконечной ленты, наружная поверхность которой выполнена по заданному профилю. В таком случае стандартные частицы будут скатываться поперек движения ленты, а нестандартные будут унесены лентой в направлении движения ленты.

Рассмотрим положение равновесия эллипсоида вращения на наклонной плоскости. Очевидно, что контакт с плоскостью будет точечным, а большая полуось эллипса будет расположена по линии наибольшего ската. Расчетная схема показана на рис. 1.

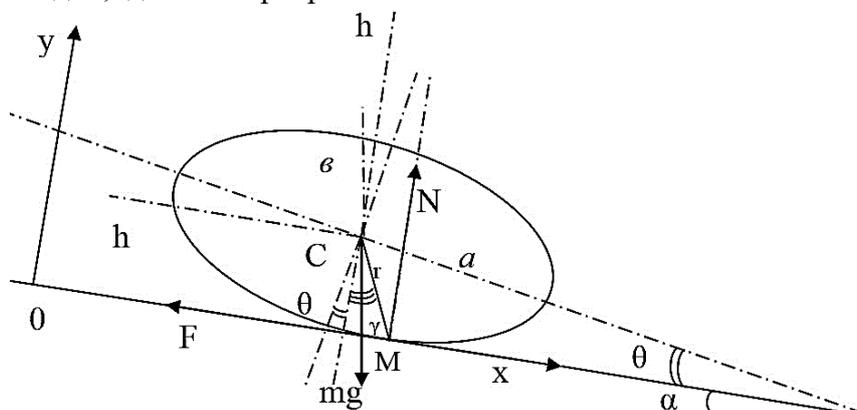


Рис. 1. Расчетная схема для определения положения равновесия эллипса на наклонной плоскости

Здесь приняты следующие обозначения:  $\alpha$  - угол наклона плоскости;  $\theta$  - угол наклона большей оси эллипса к наклонной плоскости;  $a, b$  - полуоси эллипса;  $M(x_0, 0)$  - точка контакта;  $C(x_c, y_c)$  - центр масс эллипса;  $mg = G$  - сила тяжести;  $F_{TP}$  - сила трения;  $N$  - нормальная к наклонной плоскости реакция;  $r$  - радиус эллипса, соединяющий центр тяжести с точкой контакта;  $\gamma$  - угол между радиусом и нормалью к наклонной плоскости;  $x, y$  - система координат.

Учитывая обозначения и расположения сил на расчетной схеме, уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_c &= mg \sin \alpha - F_{TP}; \\ m\ddot{y}_c &= -mg \cos \alpha + N; \\ Y_c \ddot{\theta} &= -F_{TP} h_1 + N h_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  - плечи сил,

$I_c$  - момент инерции эллипса относительно оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно плоскости эллипса.

Из геометрических соображений:

$$h_1 = f \cos \gamma, \quad h_2 = f \sin \gamma. \quad (2)$$

Для положения равновесия  $\ddot{x}_c = 0, \ddot{y}_c = 0, \ddot{\theta} = 0$ .

Тогда из (1):

$$\begin{aligned} F_{TP} &= mg \sin \alpha; \\ N &= mg \cos \alpha; \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_{TP} \cdot h_1 = N \cdot h_2.$$

Решая (3) совместно с (2), получим:

$$htg\alpha = tg\gamma. \quad (4)$$

Используя известные свойства сопряженных диаметров эллипса, будем иметь для его радиуса:

$$r_s = a \sqrt{\frac{1 - e^2(2 - e^2) \cos^2 \theta}{1 - e^2 \cos^2 \theta}}. \quad (5)$$

$$\gamma = \arctg \frac{e^2 \sin \theta \cos \theta}{1 - e^2 \cos^2 \theta}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), получим:

$$tg\alpha = \frac{e^2 \sin \theta \cos \theta}{1 - e^2 \cos^2 \theta} = \frac{e^2 tg\theta}{1 + tg^2 \theta - e^2}.$$

После соответствующих несложных

преобразований получим зависимость угла  $\theta$  от угла наклона плоскости:

$$\theta = \arctg \frac{e^2 - \sqrt{e^4 - 4(1 - e^2)tg\alpha}}{2tg\alpha}. \quad (7)$$

Следует обратить внимание, что в (7) при  $\alpha \rightarrow 0$  выражение имеет вид неопределенности типа  $\frac{0}{0}$ .

Вычислим предел, к которому стремится это выражение, используя правило Лопиталя:

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{e^2 - \sqrt{e^4 - 4(1 - e^2)tg\alpha}}{2tg\alpha} &= \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{(e^2 - \sqrt{e^4 - 4(1 - e^2)tg\alpha})'_\alpha}{(2tg\alpha)'_\alpha} = \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2\sqrt{e^4 - 4(1 - e^2)tg^2\alpha}} \cdot 2tg\alpha \cdot \frac{1}{\cos^2\alpha}}{2 \cdot \frac{1}{\cos^2\alpha}} = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{tg\alpha}{\sqrt{e^2 - 4(1 - e^2)tg^2\alpha}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0}{e^2} = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, согласно выражению (7) при  $\alpha \rightarrow 0$   $\theta(0) = 0$ , и функция  $\theta(\alpha)$  определена в области значений  $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . В

реальных условиях всегда  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ .

Для различных значений эксцентриситета  $e$  зависимости  $\theta(\alpha)$  показаны на рис. 2.

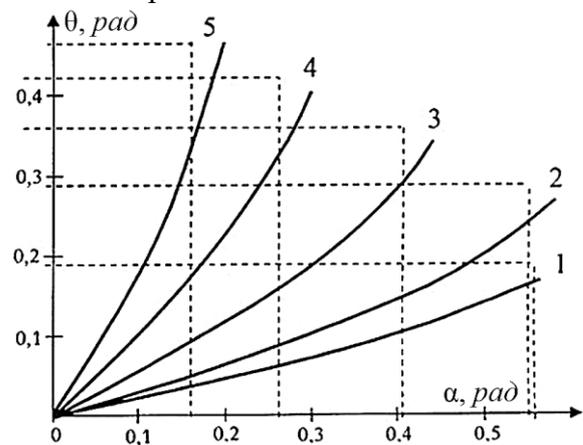


Рис. 2. Зависимость функции  $\theta(\alpha)$  от эксцентрисета  $\varepsilon$ : 1) при  $\varepsilon = 0,9$ ; 2) при  $\varepsilon = 0,85$ ; 3) при  $\varepsilon = 0,8$ ; 4) при  $\varepsilon = 0,7$ ; 5) при  $\varepsilon = 0,6$

Как видно, с уменьшением эксцентриситета угол  $\theta$  растёт при одном и том же угле  $\alpha$ , и частица теряет равновесие при меньшем угле наклона плоскости (обрыв на графике зависимости  $\theta(\alpha)$  свидетельствует о потере равновесия частицы и ее опрокидывании). Например, для таблетки «Раунатин» ( $\varepsilon = 0,85$ ) предельным является угол наклона плоскости  $\alpha = 31^\circ \cong 0,6 \text{ рад}$ . С другой стороны, с точки зрения производительности сепаратора угол  $\alpha$  не должен быть малым (с уменьшением угла  $\alpha$  снижается скорость движения). Таким образом, угол наклона плоскости следует выбирать близким к значению  $\alpha = 0,6 \text{ рад}$ . Выберем  $\alpha = 30^\circ$ . При этом предельный коэффициент трения  $f$  не должен принимать значения, большего  $f = 0,5774 \approx 0,58$ .

Из (1) для установившегося движения частицы по наклонной плоскости ( $\dot{x}_c = 0, \dot{z}_c = 0$ ) будем иметь:

$$m x_c = m g \sin \alpha - f m g \cos \alpha,$$

что при начальных условиях  $t = 0, V = V_0$  даёт:

$$V = V_0 + (\sin \alpha - f \cos \alpha) g t, \quad (8)$$

где  $V_0$  – начальная скорость,

$g$  – ускорение силы тяжести,

$t$  – время.

Из (8) видно, что равномерное движение ( $V = V_0$ ) возможно, когда  $\sin \alpha = f \cos \alpha$ , т.е.  $f = 0,58$  при  $\alpha = 30^\circ$ . Отметим, что

равномерное движение позволяет осуществлять режим, когда частицы не сталкиваются, и не догоняют одна другую на ограниченном участке плоскости. При  $f = 0,8$  (коэффициент трения при движении частицы по стабилизатору ПНС) (8) даёт закон изменения скорости ( $\alpha = 30^\circ$ ):

$$V = V_0 - 0,19 g t = V_0 - 1,864 t,$$

что свидетельствует о замедленном движении частицы.

Положим  $V_0 = 0,1$  м/с. Она остановится

$$\text{при } t = \frac{1}{1,864} c = 0,54 c.$$

При этом пройденный путь составит:

$$\begin{aligned} S(t) &= V_0 t + \frac{g}{2} (\sin \alpha - f \cos \alpha) t^2 = \\ &= 0,1 t - \frac{0,1864}{2} t^2 = 0,1 t - 0,0932 t^2 = \\ &= 0,1 \cdot \frac{1}{1,864} - 0,0932 \left( \frac{1}{1,864} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{18,64} - \frac{0,0932}{(18,64)^2} = 0,029 \text{ м} \end{aligned}$$

Рассмотрим теперь равновесие частицы с поперечным сечением в виде оживала, которым можно с достаточной точностью аппроксимировать форму поперечного сечения таблеток «Силибор». Расчетная схема для определения положения оживала на наклонной поверхности приведена на рис. 3.

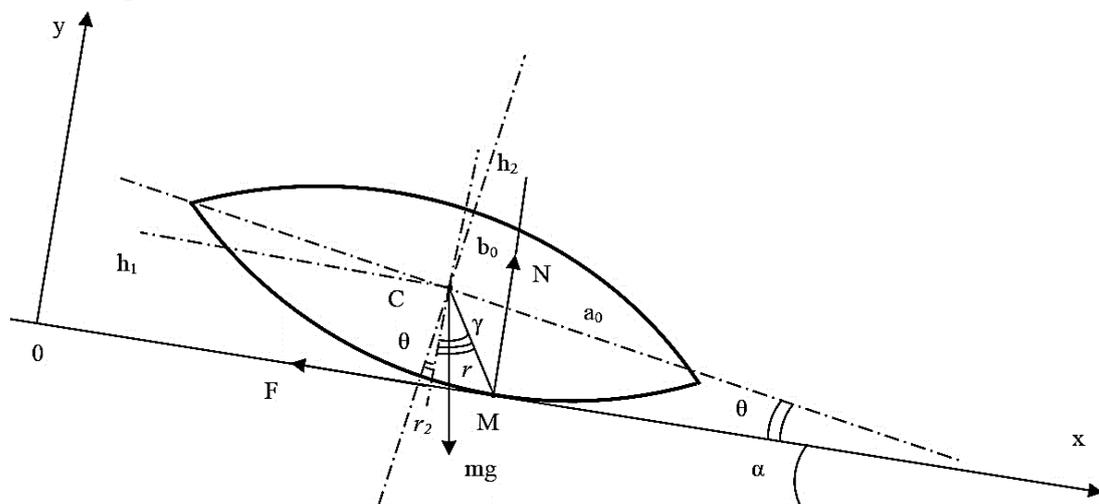


Рис. 3. Расчётная схема для определения положения оживала на наклонной плоскости

Обозначения на рис. 3 соответствуют обозначениям рис. 1.

Очевидно, уравнения движения будут иметь тот же вид, что и уравнения (1). Учитывая геометрические размеры «оживала», будем иметь (таблетка «Силибор» с  $a_0 = 4,35\text{мм}$ ,  $b_0 = 2,15\text{мм}$ ,  $R = 5,48\text{мм}$ ,  $a_0$  и  $b_0$  – больший и меньший полуразмеры оживала):

$$r = -(R - b_0) \cos \varphi \pm \sqrt{(R - b_0)^2 \cos^2 \varphi + 2Rb_0 - b_0^2}$$

где  $r$  – радиус-вектор,  $R_0 = \frac{a_0^2 + b_0^2}{2b_0}$ .

С учётом (2), (3) и (4), получим

$$\theta = \arctg \frac{(R_0 - b_0)^2 \pm \sqrt{(R_0 - b_0)^4 + [R_0^2 \cos 2\alpha - (2R_0 b_0 - b_0^2)](2R_0 b_0 - b_0^2)}}{2[R_0^2 \cos 2\alpha] - (2R_0 b_0 - b_0^2) \cos^2 \alpha} \sin 2\alpha$$

Проводя аналогичные рассуждения о движении оживала, получим

$$f = 0,62 \text{ при } \alpha = 32^\circ.$$

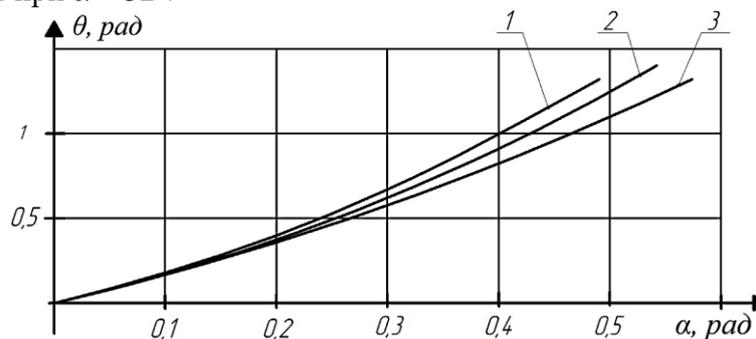


Рис. 4. Зависимость функции  $\theta(\alpha)$  от параметров  $R$  и  $b$ : 1 – при  $b_0 = 1,8\text{мм}$ ,  $R_0 = 4,1\text{мм}$ ; 2 – при  $b_0 = 2,15\text{мм}$ ,  $R_0 = 5,48\text{мм}$ ; 3 – при  $b_0 = 1,15\text{мм}$ ,  $R_0 = 3,5\text{мм}$

Учитывая вышеизложенное, схема работы питателя сепаратора в поперечном сечении, раскрывающая принцип его работы,

При этом:

$$V = V_0 - 0,21gt = V_0 - 2,06t.$$

Положим  $V_0 = 0,1\text{м/с}$ .

Остановка произойдёт при

$$t = \frac{1}{2,06}c = 0,485\text{с}.$$

Пройденный путь  $S(t) = 0,02\text{м}$ .

Из сравнения рис. 2 и рис. 4 видно, что форма поверхности частицы существенно влияет на угол устойчивого равновесия: оживальная форма более устойчива (допускает больший угол  $\theta$  к наклонной плоскости, чем эллиптическая), однако от размеров практически не зависит (рис. 4). Предельные углы наклона плоскости для обеих форм практически одинаковы ( $31^\circ$  и  $32^\circ$ ). Тот факт, что угол  $\theta$  для оживала близок к  $80^\circ$ , свидетельствует в пользу благоприятного вхождения ребра во впадину ПНС.

должна быть, выполнена согласно рис. 5 (на примере эллипсоидальной частицы).

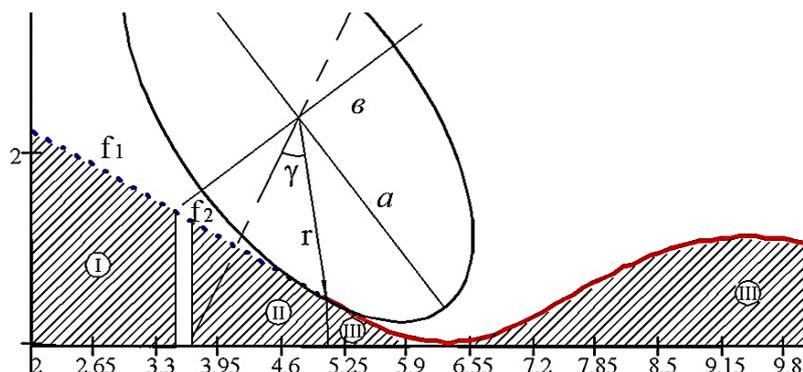


Рис. 5. Поперечное сечение питателя сепаратора с ПНС

Здесь важными являются три зоны: I зона – направляющая наклонная плоскость, формирующая необходимую ориентацию частицы по отношению к ПНС; II зона – стабилизирующая скорость подвижная наклонная плоскость, обеспечивающая необходимые начальные условия для вхождения в ПНС; III зона – собственно сам сепаратор, выполненный в виде подвижного ПНС. Необходимо сразу же заметить, что частицы, отличные по форме и размерам от стандартных (для этого сепаратора), катятся по профилю не будут, и останутся в его

начале.

**Выводы.** Таким образом для сепарации легкотравмируемых частиц на сепараторах с профилями наименьшего сопротивления рабочий орган сепаратора необходимо выполнить подвижным в виде гибкой эластичной бесконечной ленты. В результате стандартные частицы будут скатываться поперек ленты в поперечный приемник, а все остальные (слипшиеся, надколотые и т.п.) будут уноситься лентой в продольный приемник продуктов разделения.

#### Литература

1. Богомолов А.В. Сепарация трудноразделимых сыпучих смесей (научное обоснование энергосберегающих процессов и оборудования): монография. – Х.: ХНТУСГ им. П. Василенка. 2013. – 296 с.
2. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. - М.: Высшая школа. 1986. - 416 с.
3. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы

- сепарации на зерноперерабатывающих предприятиях. - М.: Колос, 1980. - 304 с.
4. Кожуховский И.Е. Зерноочистительные машины. - М.: Машиностроение, 1965. - 220 с.
5. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики. - К.: Изд-во УСХА, 1992. - 507 с.

#### References

1. Bogomolov A.V. Separatsyya trudnorazdelimyyh syrpuchoy mixture (nauchnoe rationale enerhosberehayuschyh processes and equipment) [Separation trudnorazdelimyyh bulk mixtures (scientific substantiation of energy saving processes and equipment)]: monograph. - H.: HNTUSG them. P. Vasilenko. 2013. - 296 p. [in Russian].
2. S.M. Targ Brief course teoretycheskoy mechanics [Short course of the theoretical mechanics]. - M.: Higher School. 1986. - 416 p. [in Russian].
3. Gortinsky V.V., Demsky A.B., M.A.Boriskin Processes for

- separatsyyu zernopererabatyvayuschyh enterprises [Separation processes in the grain processing enterprises]. - M.: Kolos, 1980. - 304 p. [in Russian].
4. Kozhukhovskiy I.E. Zernoochystitelnyye machine [Grain-cleaning machines]. - M.: Engineering, 1965. - 220 p. [in Russian].
5. Zaika P.M. Favourites problem zemledelcheskoy mechanics [Selected problems of agricultural mechanics]. - K.: Publishing house USKHA, 1992. - 507 p. [in Russian].

#### Анотація

### ДО РОЗРОБКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО СПОСОБУ СЕПАРАЦІЇ ЧАСТИНОК НА ПРОФІЛЬ НАЙМЕНШОГО ОПОРУ

**Богомолов О.В., Брагінець Н.В., Богомолов А.А.**

*У статті розглянуті питання сепарації частинок детермірованої форми і розмірів від часток, форма і розміри яких відрізняються від частинок основної форми. Визначено параметри початку руху частинок, входження їх на сепаруючу поверхню із зони завантаження і укосу частинок «неправильної форми» із зони сепарації за допомогою гнучкої нескінченної стрічки з профілями найменшого опору.*

#### Abstract

### BY THE DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT FASHION PARTICLE SEPARATION ON THE PROFILE OF LEAST RESISTANCE

**Bogomolov A.V., Braginets N.V., Bogomolov A.A.**

*The paper deals with the separation of the particles detemirovannoy shape and size of the particles, the shape and dimensions are different from the particles of the base form. The parameters of the start of the motion of particles entering them on the separation surface of the loading zone and mowing particles "irregular shape" of the separation zone with a flexible endless belt with profiles of least resistance.*

