

8. Ажогин В.В., Згуровский М.З. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ. – К.: Виш. шк., 1983. – 280 с.
9. Хобин В.А., Егоров В.Б. Процесс экструдирования растительного сырья как объект управления: особенности, задачи управления, структура // Мат. XV міжнарод. конф. з автоматичного управління (Автоматика – 2008). – Одеса: ОНМА, 2008. – Мат. в 2-х т. – Т. 2. – С. 643 – 646.
10. Хобин В.А., Егоров В.Б. Концептуальна модель процесу екструдювання рослинної сировини як об'єкта управління // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса: 2009. – Вип. 36. – Т. 2. – С. 246 – 254.
11. Смит О.Дж.М. Автоматическое регулирование. – М.: Физматгиз, 1962. – 847 с.
12. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
13. Хобин В.А. Перспективы применения автоматических систем прогнозируемого управления с переменной структурой в пищевой технологии // Сб. научн. тр. «Автоматизация на процесите в хранителновкусова промишленост». – г. Пловдив, НРБ, 1981. – С. 54 – 63.
14. Хилал М. Прогнозирование перегрева приводных электродвигателей в задачах управления нагрузкой технологического оборудования: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.07. – Одесса, 1996. – 147 с.
15. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / Монография: Одесса: «ТЭС», 2008. – 304 с.

УДК 664.743.02:519.876.5

## К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ НА СИТАХ С ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ

Амбарцумянц Р.В., д-р техн. наук, профессор, Амбарцумянц Р.Р., инженер  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*В статье изложен новый методологический подход к изучению процесса сепарирования частиц на поступательно движущихся ситах. Доказано, что существующий до настоящего времени метод не совсем корректен. Получены необходимые выражения, позволяющие определить значение ускорения сита при известной геометрии отверстий на сите. Предложен принцип определения диаметра отверстий на сите при заданном значении его ускорения.*

*In the article new methodological approach to the staying of the process of separation of particles on moving – forward sieves is describes. It is well – proved that the existing until present method is no quite correct. The necessary expressions are got allowed to define a minimum value of a sieve acceleration for being knocked over at the known geometry of holes a sieve. A new approach for the determination of diameter of holes on a set value of sieve acceleration is offered.*

Ключевые слова: сито, сепарирование, ускорение, статическое равновесие, силы инерции, тяжести.

Для сепарирования сыпучих грузов в зерноперерабатывающей промышленности широко используют сита с отверстиями различной конфигурации, в частности, круглыми. Естественно положить, что форма и размеры отверстий оказывают существенное влияние на движение частиц и, следовательно, на производительность ситовых сепараторов. Для изучения динамики движения частиц определяющее значение имеет правильное определение значения усилий, действующих на частицу и предопределяющих ее движение. В работе [1] приведена расчетная модель взаимодействия частицы с ситом на горизонтальной плоскости (рис. 1,а) и под углом относительно горизонтали (рис. 1,б).

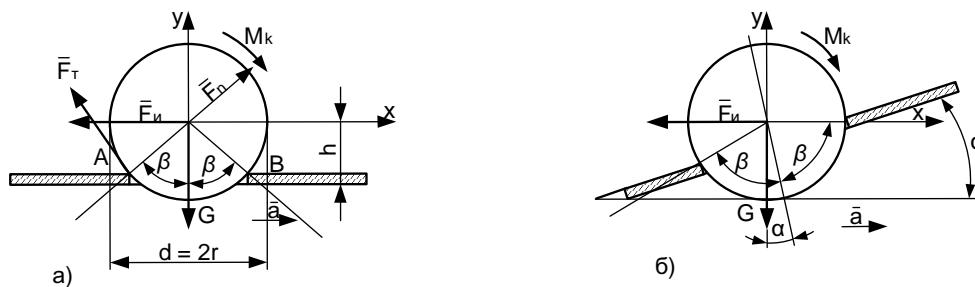


Рис. 1 – Расчетная модель взаимодействия частицы с отверстием сита в горизонтальной плоскости – а, под углом относительно горизонтали – б

Предполагается, что сита в обоих случаях имеет ускорение  $\bar{a}$  направо, угол заклинивания между нормальными плоскости сита и точек контакта частицы с ситом равняется  $\beta$  (рис.1). На частицу действуют силы:  $G=mg$  – сила тяжести частицы,  $F_u=ma$  сила инерции,  $F_m=fF_n$  – сила трения скольжения,  $M_k=kF_m$  – момент трения качения. Здесь  $f, k$  – коэффициенты трения скольжения и качения соответственно, а  $F_n$  – нормальное усилие между частицей и опорной поверхностью.

В работе [1] рассматривается момент опрокидывания частицы вокруг точки  $A$  в предположении, что в другой точке опоры частицы  $B$  сила трения отсутствует, т.е. предполагается, что в точке  $B$  нет опоры.

Сфера (предполагается, что в первом приближении зерна мало отличаются от сферы) может соприкасаться с отверстием если не в трех точках, то минимум в двух точках. В работе [1] для опрокидывающего момента получено выражение

$$F_u R \cos \beta \geq GR \sin \beta + M_k, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус частицы,  $\beta$  – угол, определяющий направление нормального усилия  $F_n$  относительно нормали к плоскости сита.

Для определения нормальной силы  $F_n$  используется условие равновесия статики  $\Sigma Y=0$  [2,3]. Имеем:

$$G - F_n^Y \cos \beta + F_m \sin \beta = 0 \text{ или } G - F_n^Y \cos \beta + fF_n^Y \sin \beta = 0. \text{ Отсюда}$$

$$F_n^Y = \frac{G}{\cos \beta - f \sin \beta} = \frac{mg}{\cos \beta - f \sin \beta}, \quad (2)$$

где  $F_n^Y$  – нормально усилие, найденное по уравнению  $\Sigma Y=0$ .

По нашему мнению расчетная модель и полученные на ее основе расчетные уравнения и, следовательно, выводы, не совсем корректны. Дело в том, что при принятых начальных условиях возникает однозначная векторная зависимость между силами, действующими на частицу, а именно  $\bar{F}_n = \bar{G} + \bar{F}_n$ . Это означает, что не зависимо от того, какое условие равновесия используется для определения реакции в точке  $A$  результат должен быть одинаковым.

Определим нормальное усилие в точке  $A$  используя условием равновесия статики  $\Sigma X=0$ . Имеем:

$$F_n^X \cos(90 - \beta) + F_m \cos \beta = F_u \text{ или } F_n^X \sin \beta + fF_n^X \cos \beta = ma. \text{ Отсюда}$$

$$F_n^X = \frac{mg}{f \cos \beta + \sin \beta}, \quad (3)$$

где  $F_n^X$  – нормально усилие, найденное по уравнению  $\Sigma X=0$ .

На основании (2), (3) для отношения сил  $F_n^Y, F_n^X$  получим

$$\frac{F_n^Y}{F_n^X} = \frac{mg}{\cos \beta - f \sin \beta} / \frac{mg}{f \cos \beta + \sin \beta} = \frac{g(f + \operatorname{tg} \beta)}{a(1 - f \operatorname{tg} \beta)}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что силы  $F_n^Y, F_n^X$  не равны между собой, т.к. данное отношение не может равняться единице. Значит, задача в такой постановке не определена и представленное в работе [1] решение не совсем корректно. Более того, если проанализировать выражение, полученное для определения ускорения сита, обеспечивающее опрокидывание частицы, то легко установить, что при угле  $\beta$  равного

$\operatorname{arg} \operatorname{tg} \frac{1}{f}$  сила инерции для опрокидывания частицы стремится к бесконечности, т.е. происходит заклинивание частицы в сите, что весьма спорно.

Такой результат можно объяснить тем, что в предложенной расчетной модели число уравнений статики больше, чем число неизвестных. Очевидно с начало необходимо было бы определить значение силы инерции частицы при котором реакция в точке  $B$  принимает нулевое значение, а затем определить полную реакция в опорной точке  $A$  при условии, что частица находится в статическом равновесии и сила трения в ней отсутствует. Определить полную реакцию с учетом сил трения, возникающей в точке в момент опрокидывания частицы, а затем ставить условие опрокидывания частицы.

Целью настоящей работы является предложение более точного методологического подхода определения ускорения сита для опрокидывания частицы по нему.

В принципе в пространственном изображении, учитывая неровности поверхности сепарируемых части, частица соприкасается с отверстием на ситах через три точки. Расположение этих точек может быть любым. В случае известности координат этих точек используя уравнения статики для пространственного

тела[3] и принимая во внимание, что на частицу действует система сходящих сил, можно определить опорные реакции и найти условие, обеспечивающее опрокидывание частицы.

Ввиду отсутствия какой либо информации о координатах точек контакта частицы с отверстием на сите решим поставленную задачу рассматривая плоскую модель частицы в предположении, что сито совершает поступательное перемещение с ускорением  $\bar{a}$  и контактируется с частицей в двух точках  $A$  и  $B$  (рис. 2).

Свяжем с центром тяжести  $O$  частицы прямоугольную систему координат  $YOX$ . Поскольку частица опирается на две точки и находится в статическом равновесии, то силы трения в них не возникают

Запишем уравнения равновесия  $\Sigma Y=0, \Sigma X=0$ , сил, действующих на частицу. Имеем:

$$-F_u + F_A \sin \beta + F_B \sin \beta = 0, \quad (5)$$

$$F_A \cos \beta + F_B \cos \beta - G = 0. \quad (6)$$

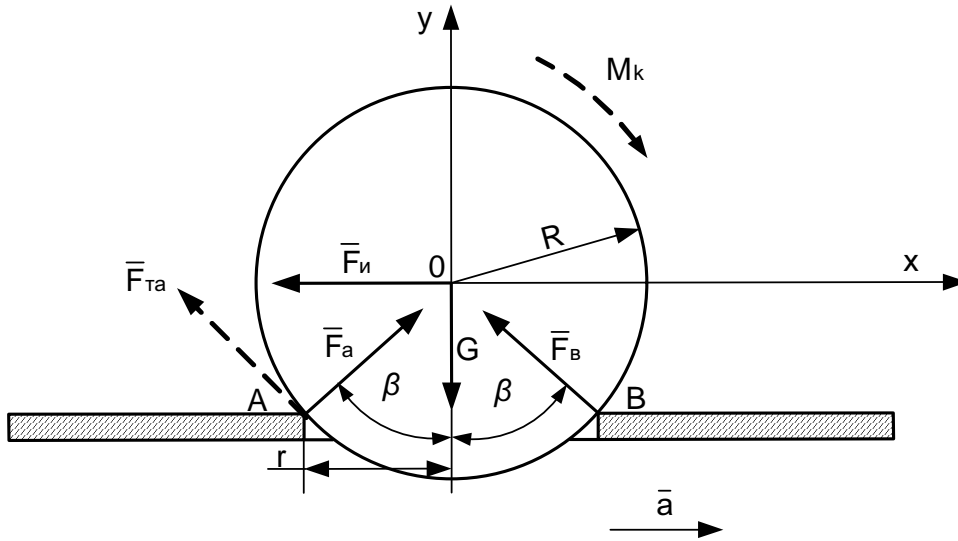


Рис. 2 – Расчетная модель частицы в статике с двумя точками контакта

Уравнения (5), (6) представим в виде:

$$F_A + F_B = \frac{F_u}{\cos \beta}, \quad (7)$$

$$F_A - F_B = \frac{F_u}{\sin \beta} \quad (8)$$

Решив совместно уравнения (7), (8) после преобразования находим:

$$F_A = \frac{G \sin \beta + F_u \cos \beta}{\sin 2\beta}. \quad (9)$$

$$F_B = \frac{G \sin \beta - F_u \cos \beta}{\sin 2\beta}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) и (10) в уравнения (5), (6) легко убедиться в их тождественности.

Реакция  $F_B=0$ , если  $G \sin \beta - F_u \cos \beta = 0$ . Из последнего равенства получим  $F_u = G \operatorname{tg} \beta$ . Выражая силы инерции и тяжести через массу частицы и соответствующие ускорения для ускорения сита, при котором частица упирается только в одной точке, получим

$$a_{\min} = g \operatorname{tg} \beta. \quad (11)$$

В таком случае для опорной реакции в точке опрокидывания, принимая во внимание выражение (11), после несложных преобразований, находим

$$F_A = mg \frac{1}{\cos \beta}, \quad (12)$$

Следует отметить, что аналогичный результат можно получить, если принимать во внимание, что силы  $\overline{F}_n, \overline{G}, \overline{F}_u$  образуют систему сходящих сил и их векторная сумма равна нулю.

Поскольку частица находится в начале опрокидывания, то в данный момент времени в точке опоры возникает сила трения и полная реакция в точке  $A$  равна

$$(F_A)_n = \sqrt{F_A^2 + F_{mA}^2} = \sqrt{1 + f^2} \frac{mg}{\cos \beta}. \quad (13)$$

Для опрокидывания частицы необходимо выполнение неравенства (рис.2)

$$(F_u)_{\min} R \cos \beta \geq mgR \sin \beta + M, \quad (14)$$

где  $M = k(F_A)_n$  – момент трения качения в точке опоры  $A$ ,  $k$  – плечо трения качения.

Выражение (14) с учетом предельного значения ускорения для опрокидывания и момента трения качения принимает вид

$$ma_{np}^* R \cos \beta \geq mgR \sin \beta + mgk \frac{1}{\cos \beta} \sqrt{1 + f^2}, \quad (15)$$

где  $a_{np}^*$  – предельного значения ускорения сита для опрокидывания частицы.

В таком случае, на основании уравнения (15) для предельного значения ускорения сита, после сложных преобразований, получим

$$a_{np}^* = g \left( \operatorname{tg} \beta + \frac{k}{R} \frac{\sqrt{1 + f^2}}{\cos^2 \beta} \right). \quad (16)$$

Из анализа зависимости (16) следует, что наиболее значимым, влияющим на ускорение опрокидывания является первая слагаемая данного выражения ввиду того что плечо трения качения значительно меньше радиуса частицы. Влияние второй слагаемой выражения (16) становится существенным, если обеспечивается неравенство  $R \cos^2 \beta_{np} \leq k \sqrt{1 + f^2}$ . Отсюда для предельного значения угла давления получим

$$\beta_{np} \leq \arccos \sqrt[4]{\left(\frac{k}{R}\right)^2 (1 + f^2)}. \quad (17)$$

Например, если отношение  $\frac{k}{R} = 0,001$ , а коэффициент трения  $f = 0,3$ , то угол заклинивания

$$\beta_{np} \leq 84^\circ 15'.$$

Выражение (16) удобнее представить через геометрические параметры сита и частицы. Из расчетной модели (см. рис.2) имеем:

$$\sin \beta = \frac{r}{R}, \cos \beta = \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{R}. \text{ Тогда } \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1}}. \text{ Принимая во внимание последние за-}$$

висимости, для предельного ускорения сита получим

$$a_{np}^* \geq g \left( \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}} + \frac{kR \sqrt{1 + f^2}}{R^2 - r^2} \right). \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет довольно легко решить обратную задачу, т.е. определить диаметр отверстий на сите, если задано ускорение опрокидывания  $a_s$ . Имеем  $\frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}} + \frac{kR \sqrt{1 + f^2}}{R^2 - r^2} = \frac{a_{np}^*}{g}$ . Преобразуя данное уравнение относительно неизвестного  $r$ , получим

$$Hr^4 + Dr^2 + E = 0, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} H &= 1 + d^2; D = 2cd - R^2(1 + 2d^2); \\ E &= R^2(d^2R^2 - 2cd) - c; \\ c &= kR\sqrt{1 + f^2}; d = \frac{a_3}{g}. \end{aligned} \quad (19)$$

Наприклад, потребується визначити значення  $r$ , якщо  $a_3 = 4,5 \text{ м/с}^2$ ,  $R = 10 \text{ мм}$ ,  $k = 10 \text{ мкм}$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Існуючи вираження (19) знаходимо:  $H = 1,2104056$ ;  $D = 142,8281623$ ;  $E = 2094,4892$ . Із рішення биквадратного рівняння знаходимо  $r = \sqrt{17,1168} = 4,137 \text{ мм}$ .

Аналіз отриманих вище виражень дозволяє зробити висновок:

1. При вивченні процесу опрокидування частинки на ситі, що здійснює зворотне поступальне переміщення, необхідно ставити умову дотику частинки в одній точці і отримати необхідні умови для цього.

2. При практичних розрахунках достатньо обмежуватися першим членом рівняння (17) і визначити прискорення опрокидування вираженням  $a_{np}^* \geq g \frac{r}{R}$ .

#### Література

1. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна /А. Я. Соколов, В. Ф. Журавлев, В. Ф. Душкин и др.; Под ред. А. Я. Соколова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – 445с.
2. Основы теоретической механики /Н. А. Кильчевский, Н. И. Ремизова, Н. Н. Шепелевская. Под общ. Ред. Чл.-кор. АН УССР Н. А. Кильчевского. – Киев. Техника, 1968. – 260с
3. Артоболовский И.И. Теория механизмов – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит. 1988. – 640 с.

УДК 662.756.3

## КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА РІПАКА З ОТРИМАННЯМ ОЛІЇ ТА БІОДИЗЕЛЮ

Бандура В.М., канд. техн. наук, доцент; Коляновська Л.М., аспірант  
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

*Розглянуто особливості існуючої та перспективної технології отримання біодизельного палива. Проведено дослідження кінетики екстрагування жмиху та цілого зерна ріпака при різних температурах процесу та мікрохвильової обробки.*

*Features of existing and perspective technology of biodiesel fuel extraction have been considered. Researches of kinetics of rape oilcake and rape seeds at different process temperatures and microwave treatment are conducted.*

**Ключові слова:** ріпак, жмих, біодизельне паливо, кінетика, екстрагування.

**Вступ.** У сучасних умовах при швидкому підвищенні цін на енергоносії особливо актуальною стає проблема енергозбереження у виробничій сфері підприємств. Подальше зростання вартості традиційного пального і зменшення його природних запасів спонукають людство до пошуку альтернативних відновлювальних джерел енергії, зокрема до використання біомаси як сировини для виготовлення пального.

Серед відновлювальних джерел енергії дедалі більшого розвитку набувають енергоносії біологічного походження або біопалива: біодизель, біоетанол, біогаз.

Світове виробництво насіння олійних культур становить майже 320 млн т на рік. У зв'язку зі створенням низькоерукових та низькоглікозинолатних сортів значно зросли обсяги виробництва ріпака, так, в Україні у 2008 році зібрано майже 3 млн т насіння ріпака, хоча у 2009 році – 1,84 млн т, а у 2010 році – 1,5 млн т, що свідчить про значне зниження урожайності культури [1].