

УДК 631.362:633.15

UDC 631.362:633.15

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

О ДВИЖЕНИИ ВИБРООЖИЖЕННОГО СЕПАРИРУЕМОГО СЛОЯ ЗЕРНА ПО ПЛОСКОМУ РЕШЕТУ КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ**ABOUT THE MOTION OF THE VIBROLIQUIFIED SEPARATED LAYER OF GRAIN ON THE FLAT SIEVE OF FINITE WIDTH**

Самурганов Евгений Ерманекосович
магистр, старший преподаватель кафедры тракторов, автомобилей и технической механики РИИЦ SPIN-код: 798353

Samurganov Evgeny Ermanekosovich.
Master's degree, Senior Lecturer of the Academic Department of tractors, cars and technical mechanics RISC SPIN-code: 798353

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия
samurganov@mail.ru

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia
samurganov@mail.ru

Цель исследования - аналитическое определение средней скорости семян кукурузы на плоском вибрационном решете конечной ширины. Объект исследования – процесс сортирования семян кукурузы на плоском вибрационном решете. Математическое моделирование движения сепарируемой зерновой смеси по решету обусловлено необходимостью интенсификации разделения зерновых материалов на плоском решете. Несмотря на существенный прогресс в разработке математических моделей движения смеси по вибрационному решету, их дальнейшее уточнение остается актуальной задачей. В частности, в расчетной практике используют теории, в которых ширина плоского решета считается бесконечной, т.е. не учитывается влияние на процесс движения рамки решетного стана. В связи с отсутствием оценок погрешности, вносимой этим допущением, возникла необходимость разработать теорию движения смеси по решету конечной ширины. Для анализа были приняты следующие допущения: первое – семена кукурузы рассматривались как шары различного диаметра, второе – слой зерна на решете рассматривали как неоднородную вязкую жидкость. На основании проведенного исследования установлено, что наиболее рациональным для достижения поставленной цели является применение метода Бубнова-Галеркина. В результате проведенного исследования получены аналитические зависимости для расчета скорости потока зерновой смеси по вибрационному решету конечной ширины с учетом разделения смеси фракции

The aim of the research is analytical determination of the middle speed of the corn seeds on the flat vibrating sieve of finite width. The object of the study is the process of sorting of seeds of corn on the flat vibrating sieve. The mathematical modeling of the motion of the separated layer of the cereal mixture on the sieve is conditioned by the necessity of intensification of division of grain-growing materials on a flat sieve. Despite the significant progress in the development of mathematical models of the motion of a mixture on vibrated sieve, their further refinement remains an actual task. In particular, in calculation practice, theory in which the width of the flat sieve is considered infinite is used, i.e. the impact on the process of the moving frame of the sieve bed is not taken into account. In connection with absence of estimations of the error brought in by this assumption, the necessity to develop a theory of the movement of the mixture on a sieve of the finite width appeared. For the analysis, the following assumptions were accepted: first, the corn seeds were considered as balls of different diameter, second – the layer of grain on a sieve was considered as heterogeneous viscid liquid. Based on undertaken study it is set that most rational for the achievement of the put aim is application of method of Bubnov-Galerkin. As a result of undertaken research analytical dependences are received for the calculation of flowrate of grain mixture on the vibrational sieve of the final width taking into account separation of the mixture into factions

Ключевые слова: ПЛОСКОЕ РЕШЕТО, ЗЕРНО, ВИБРООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ, ФРАКЦИЯ, ДВИЖЕНИЕ СМЕСИ, СКОРОСТЬ

Keywords: FLAT SIEVE, GRAIN, VIBROLIQUIFIED LAYER, FACTION, MOTION OF MIXTURE, SPEED

Doi: 10.21515/1990-4665-123-036

Введение

Математическое моделирование движения сепарируемой зерновой смеси по решетку обусловлено необходимостью интенсификации разделения зерновых материалов на плоском решетке.

Несмотря на существенный прогресс в разработке математических моделей движения смеси по вибрационному решетку, их дальнейшее уточнение остается актуальной задачей. В частности, в расчетной практике используют теории, в которых ширина плоского решета считается бесконечной, т.е. не учитывается влияние на процесс движения рамки решетного стана. В связи с отсутствием оценок погрешности, вносимой этим допущением, возникла необходимость разработать теорию движения смеси по решетку конечной ширины.

Современные кукурузокалибровочные машины, как правило, калибруют семена кукурузы по одному признаку – диаметру зерновки. Для дальнейшего анализа примем следующие допущения: первое – семена кукурузы будем рассматривать как шары различного диаметра, второе – слой зерна на решетке мы рассматриваем как неоднородную вязкую жидкость.

Постановка задачи

Цель исследования – аналитическое определение средней скорости семян кукурузы на плоском вибрационном решетке конечной ширины. Объект исследования – процесс сортирования семян кукурузы на плоском вибрационном решетке.

Результаты исследований

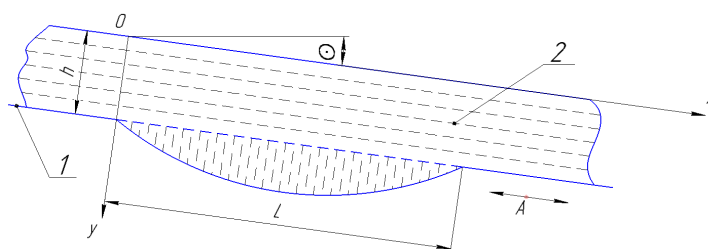
Движение виброоживленной среды по направляющей плоскости конечной ширины рассматривалось в работе Л.Н. Тищенко [1]. Задача решалась без учета просеивания части зерна через перфорированную поверхность решета. Распределение скорости потока в установившемся режиме движения представлено одинарным тригонометрическим рядом.

Решение аналогичной задачи получено в виде двойного тригонометрического ряда и использовано для определения интегральных характеристик потока: производительности решета и средней скорости движения смеси. В практических инженерных расчетах удобнее использовать приближенные замкнутые решения, к которым приводит метод Бубнова-Галеркина [2,3]. Приближенный метод с высокой точностью описывает краевой эффект у рамки решетного стана.

В отличие от указанных выше публикаций в данной работе решается более общая краевая задача с учетом просеивания части смеси через перфорированную рабочую плоскость наклонного решета.

Целью является получение аналитических зависимостей для расчета скорости потока зерновой смеси по вибрационному решету конечной ширины с учетом разделения смеси на сходовую и проходовую фракции.

Постановка краевой задачи и построение ее точного аналитического решения. Для уточнения известных моделей движения используем показанную на рисунке 1 декартову систему координат, в которой оси Ox и Oz лежат в плоскости, совпадающей со свободной поверхностью движущегося слоя смеси, а ось Oy перпендикулярна плоскости решета, наклоненного под углом θ к горизонту.



1 – вибрационное решето с движущимся зерном; 2 – поперечное сечение слоя;

Рисунок 1 - Расчетная схема

Рассматривая установившийся режим движения, проекцию скорости

w на ось Oz полагаем равной нулю. Проекцию скорости \mathbf{v} на ось Oy считаем постоянной и определяем по формуле

$$\mathbf{v} = \varepsilon \mathbf{v}_n, \quad (1)$$

где \mathbf{v} – скорость движения зерна по решетке, м/с;

ε – коэффициент «живого сечения» решета;

\mathbf{v}_n – проекция на ось Oy скорости просеивания проходовой фракции через отверстия в решетке, м/с.

Проекцию скорости потока смеси $u = u(y, z)$ на ось Ox в установившемся режиме движения считаем независимой от x и находим из решения краевой задачи

$$\frac{d^2 u}{dy^2} - \frac{v}{v} \frac{du}{dy} + \frac{d^2 u}{dz^2} = -\frac{g}{v} \sin \theta. \quad (2)$$

$$u(y, 0) = u(y, H) = u(h, z) = u_y(0, z) = 0. \quad (3)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости смеси;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h, H – соответственно толщина и ширина движущегося слоя зерна, м.

Уравнение (2) получено из системы Навье-Стокса, с учетом того, что $w=0$; $\mathbf{v} = const$; $u = u(y, z)$ и эти проекции не зависят от времени t .

Кинематический коэффициент вязкости смеси определяем по формуле

$$v = \frac{b_h}{12\omega\rho_0 r_0 \sqrt{(2A)^2 - (\delta b_h)^2}}, \quad (4)$$

где $\delta = \pi(4M\omega^2)^{-1}, c^2 / кг$;

M – эквивалентная масса условно сферических частиц, образующих смесь плотности ρ , кг;

r_0 – эквивалентный радиус условно сферических частиц, образующих

смесь плотности ρ , м;

f – коэффициент внутреннего трения в смеси;

A – амплитуда продольных вибраций решета, м;

ω – круговая частота продольных вибраций решета, рад/с.

Таким образом, кинематическая вязкость виброожиженной смеси зависит от ее механико-технологических характеристик и параметров вибраций решета.

Заметим, что вследствие просеивания проходовой фракции толщина слоя h будет зависеть от координаты x . Но в рассматриваемой теории этой зависимостью пренебрегаем, усредняя h по длине решета, что допустимо, когда объем отделяющейся части мал по сравнению с общим объемом смеси на решете.

Учитывая граничные условия (3), решение уравнения (2) ищем в виде ряда

$$u(y, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(y) \sin(\beta_n z), \quad (5)$$

где $\beta_n = \frac{(2n+1)\pi}{H}$; $\varphi_n(y)$ – неизвестные функции.

Подставив (5) в (2), с учетом ортогональности $\sin(\beta_n z)$ на промежутке $z \in [0; H]$, получаем уравнения для определения $\varphi_n(y)$

$$\frac{d^2 \varphi_n}{dy^2} - \frac{v}{V} \frac{d\varphi_n}{dy} - \beta_n^2 \varphi_n = -\frac{4g \sin \theta}{\pi v (2n+1)}. \quad (6)$$

Общим решением уравнения (6) является

$$\varphi_n(y) = c_{1n} \exp(k_{1n} y) + c_{2n} \exp(k_{2n} y) + \frac{4g H^2 \sin \theta}{\pi^3 v (2n+1)^3}. \quad (7)$$

Здесь

$$k_{1n, 2n} = \frac{v}{2V} \pm \sqrt{\frac{v^2}{4V^2} + \beta_n^2}$$

где c_{1n}, c_{2n} – произвольные постоянные, которые находим с помощью выражения (3).

Определение постоянных проводим по формулам

$$c_{1n} = \frac{4gH^2 \sin\theta}{\pi^3 \nu (2n+1)^3} \frac{k_{2n}}{k_{1n} \exp(k_{2n}h) - k_{2n} \exp(k_{1n}h)}; \quad c_{2n} = -\frac{k_{1n}}{k_{2n}} c_{1n}. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (5), с учетом (8), получаем

$$u(y, z) = \frac{4gH^2 \sin\theta}{\pi^3 \nu} \sum_{n=0}^{\infty} \left[1 - \frac{k_{1n} \exp(k_{2n}y) - k_{2n} \exp(k_{1n}y)}{k_{1n} \exp(k_{2n}h) - k_{2n} \exp(k_{1n}h)} \right] \cdot \frac{\sin(\beta_n z)}{(2n+1)^3} \quad (9)$$

Для убыстрения сходимости полученного решения воспользуемся известной суммой ряда

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(\beta_n z)}{(2n+1)^3} = \frac{\pi^3}{8H^2} z(H-z). \quad (10)$$

После убыстрения сходимости имеем

$$u(y, z) = \frac{g \sin\theta}{2\nu} \cdot \left[z(H-z) - \frac{8H^2}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(\beta_n z)}{(2n+1)^3} \frac{k_{1n} \exp(k_{2n}y) - k_{2n} \exp(k_{1n}y)}{k_{1n} \exp(k_{2n}h) - k_{2n} \exp(k_{1n}h)} \right]. \quad (11)$$

Решение (11) при $y = 0; z = 0,5H$ переходит в ряд, представляющий максимальное значение проекции скорости

$$\max u = \frac{gH^2 \sin\theta}{8\nu} \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (k_{1n} - k_{2n})}{(2n+1)^3 [k_{1n} \exp(k_{2n}h) - k_{2n} \exp(k_{1n}h)]} \right]. \quad (12)$$

Интегрируя (11) можно получить формулы для расчета производительности решета по сходовой фракции, а также других интегральных характеристик. Однако, определять их проще с помощью приближенного решения краевой задачи, которое построим ниже.

Построение приближенного решения краевой задачи методом Бубнова-Галеркина. Решение уравнения (2), при граничных условиях (3), ищем в виде

$$u(y, z) = f(z) \cdot (h^2 - y^2), \quad (13)$$

где $f(z)$ – неизвестная функция.

Для её определения указанным методом получаем уравнение

$$\frac{d^2 f}{dz^2} - \frac{5}{2h^2} \cdot \left(1 - \frac{3\nu h}{8\nu} \right) f = -\frac{5g}{4h^2 \nu} \sin\theta. \quad (14)$$

Общее решение уравнения имеет вид

$$f(z) = c_3 \operatorname{sh}(\lambda z) + c_4 \operatorname{ch}(\lambda z) + \frac{g \sin \theta}{2\nu \left(1 - \frac{3\nu h}{8\nu}\right)}. \quad (15)$$

Здесь

$$\lambda = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{5}{2} \left(1 - \frac{3\nu}{8\nu}\right)}.$$

c_3 и c_4 – произвольные постоянные.

Граничные условия (3) удовлетворяются, когда

$$c_4 = -\frac{g \sin \theta}{2\nu \left(1 - \frac{3\nu h}{8\nu}\right)}; \quad c_3 = c_4 \frac{1 - \operatorname{ch}(\lambda H)}{\operatorname{sh}(\lambda H)}. \quad (16)$$

Учитывая (14), (15) и (16) получаем приближенное замкнутое решение задачи

$$u(y, z) = \frac{g \sin \theta}{2\nu - \frac{3}{4}\nu h} \left(1 - \frac{\operatorname{ch}\left(\lambda \frac{H}{2} - \lambda z\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\lambda H}{2}\right)}\right) (h^2 - y^2). \quad (17)$$

Из него следует компактная формула для вычисления максимального значения проекции скорости

$$\max u = u\left(0, \frac{H}{2}\right) = \frac{gh^2 \sin \theta}{2\nu - \frac{3}{4}\nu h} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{\lambda H}{2}}\right). \quad (18)$$

Интегрируя решение (17), находим производительность решета по сходовой фракции

$$Q_c = \int_0^h \int_0^H u(y, z) dy dz = \frac{2gHh^3 \sin \theta}{3 \cdot \left(2\nu - \frac{3}{4}\nu h\right)} \left(1 - \frac{2}{\lambda H} \operatorname{th} \frac{\lambda H}{2}\right). \quad (19)$$

Производительность решета по проходовой фракции зависит от длины решета L и определяется выражением

$$Q_n = \varepsilon \nu_n H L. \quad (20)$$

Вычислив Q_c , далее несложно найти среднюю скорость потока смеси $u_c = Q_c (Hh)^{-1}$ и удельную загрузку решета

Анализ численных результатов. Расчеты проведены для зерна смеси кукурузы, у которой [4]: $f = 0,47$; $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$; $r_0 = 0,008 \text{ м}$; $M = 0,0004 \text{ кг}$; $h = 0,007 \text{ м}$. Параметры решета задавали следующие: $\theta = 8^\circ$; $\varepsilon = 0,4$; $L = 0,79 \text{ м}$; $H = 0,5 \text{ м}$; $A = 0,0075 \text{ м}$; $\omega = 41,86 \text{ с}^{-1}$.

Вычисленные двумя способами значения $u(y, H/2)$ при различных y указаны в таблице 3. В числителе записаны результаты расчетов по формуле (11), где ряд по n суммировали до $n = 30$. В знаменателе записаны значения проекции скорости, полученные по приближенной формуле (17). Сравнение результатов расчета подтверждает удовлетворительную точность приближенного решения.

Таблица 1 – Значения $u(y, H/2)$ в м/с

y/h	0	0,2	0,4	0,6	0,8
$u(y, H/2)$ при $v_n = 0$	$\frac{0,283}{0,283}$	$\frac{0,272}{0,272}$	$\frac{0,238}{0,238}$	$\frac{0,181}{0,181}$	$\frac{0,101}{0,102}$
$u(y, H/2)$ при $v_n = 10^{-2} \text{ м/с}$	$\frac{0,334}{0,344}$	$\frac{0,321}{0,330}$	$\frac{0,285}{0,289}$	$\frac{0,221}{0,220}$	$\frac{0,127}{0,124}$
$u(y, H/2)$ при $v_n = 2 \cdot 10^2 \text{ м/с}$	$\frac{0,398}{0,439}$	$\frac{0,386}{0,421}$	$\frac{0,347}{0,369}$	$\frac{0,274}{0,281}$	$\frac{0,161}{0,158}$

В числителях в таблице 2 записаны значения $\max u$, вычисленные по формуле (12) суммированием ряда до $n = 30$. В знаменателях указаны результаты, полученные по приближенной формуле (18).

Таблица 4 - Значения $\max u$ для разных v_n

$v_n, \text{ м/с}$	0	0,005	0,01	0,015	0,02
$\max u, \text{ м/с}$	$\frac{0,283}{0,283}$	$\frac{0,307}{0,311}$	$\frac{0,334}{0,344}$	$\frac{0,364}{0,386}$	$\frac{0,398}{0,439}$

С увеличением v_n возрастает погрешность приближенного решения, которое приводит к несколько завышенным результатам.

Заключение

1. Полученное приближенное замкнутое решение (17) краевой задачи позволяет определить среднюю скорость семян кукурузы на плоском вибрационном решете конечной ширины
2. Производительность решета по сходовой и проходовой фракциям находится соответственно по выражения (19) и (20).

Литература

1. Тищенко, Л. Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л. Н. Тищенко // - Харьков: Основа, 2004. - 224 с.
2. Тищенко, Л. Н. О гидродинамической модели движения зерновой смеси по наклонному плоскому решету / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // - Полтава: Пол. НТУ, 2009. - Вып. 3(25), т. 1. - С. 205-213.
3. Тищенко, Л. Н. О колебаниях скорости неоднородного слоя зерновой смеси на плоском виброрешете / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // - Мелитополь: ТДАТУ, 2010. Вып. 10. т. 7. - С. 32-42.
4. Курасов, В. С. Механизация работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве кукурузы: монография / В. С. Курасов, В. В. Кущев, Е. Е. Самурганов; КубГАУ. - Краснодар, 2013. – 151 с. ISBN 978-5-94672-723-5

References

1. Tishhenko, L. N. Intensifikacija separirovanija zerna / L. N. Tishhenko // - Har'kov: Osnova, 2004. - 224 s.
2. Tishhenko, L. N. O gidrodynamiczeskoj modeli dvizhenija zernovoj smesi po naklonnomu ploskomu reshetu / L.N. Tishhenko, V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij // - Poltava: Pol. NTU, 2009. - Vyp. 3(25), t. 1. - S. 205-213.
3. Tishhenko, L. N. O kolebanijah skorosti neodnorodnogo sloja zernovoj smesi na ploskom vibroreshete / L. N. Tishhenko, V. P. Ol'shanskij, S. V. Ol'shanskij // - Melitopol': TDAU, 2010. Vyp. 10. t. 7. - S. 32-42.
4. Kurasov, V. S. Mehanizacija rabot v selekcii, sortoispytanii i pervichnom semenovodstve kukuruzy: monografija / V. S. Kurasov, V. V. Kuceev, E. E. Samurganov; KubGAU. - Krasnodar, 2013. – 151 s. ISBN 978-5-94672-723-5