

Л.Н. Тищенко, чл. – кор. УААН, проф., д-р техн. наук, В.П. Ольшанский, проф., д-р физ.-мат. наук, С.В. Ольшанский, асп.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко

Определение скорости зерновой смеси при рещётном вибросепарировании

Исходя из упрощённого уравнения гидродинамики, выведены формулы для вычислений средней скорости и производительности рещётного вибросепарирования зерновой смеси, когда плоское наклонное решето совершает гармонические колебания в своей плоскости. Определены закономерности уменьшения толщины зернового слоя по длине решета, возникающие вследствие изменения скорости потока и отделения проходовой фракции на перфорированной поверхности от движущейся зерновой массы.

скорость смеси, толщина слоя, сходовая и проходовая фракция, плоское виброрешето, уравнение гидродинамики, стационарный поток

Проблема. Движение зерновых смесей по наклонным поверхностям виброрешёт происходит при сепарировании зерна. Разделение смеси на фракции осуществляется в ходе движения её по рабочей (перфорированной) поверхности решета. Производительность решета зависит от скорости и толщины движущегося слоя. Поэтому определение скорости зерновой смеси имеет важное практическое значение в обеспечении рациональной загрузки решета, и этому вопросу продолжает уделяться должное внимание в научной литературе.

Краткий обзор имеющихся исследований и публикаций. Прежде всего выделим фундаментальные работы [1,2,3], в которых для определения средней скорости движения смеси исследуется движение отдельной её частицы (зерна). Из последних публикаций этого направления отметим [4,5,6]. Используя аналогию в поведении вязкой жидкости и сыпучей среды в условиях вибраций [7,8], в последнее время, движение слоя зерновой смеси начали описывать уравнениями гидродинамики [9,10,11]. В них основное внимание сконцентрировано на построении профиля скорости потока по высоте (толщине) плоского слоя и на расчёте производительности решета без учёта изменения скорости и толщины слоя в ходе движения. Определение этих изменений, обусловленных действием сил сопротивления и отделением проходовой фракции от движущейся зерновой смеси, является предметом данной работы.

Целью статьи является построение формул для расчёта усреднённой скорости транспортирования смеси по рабочей поверхности решета с учётом её изменения в ходе движения сыпучей среды.

Основное содержание исследования. Изучая стационарный, независимый от времени, поток зерна по рабочей поверхности решета, воспользуемся упрощённым нелинейным уравнением течения вязкой жидкости:

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v \frac{\partial u_1}{\partial y} = g \sin \theta + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2}. \quad (1)$$

В нём u_1 - проекция скорости потока на ось ox , параллельную плоскости решета, наклонённого под углом θ к горизонту;

v - поперечная проекция скорости потока на ось oy , перпендикулярную оси ox ; g - ускорение свободного падения;

μ, ρ - усреднённые вибровязкость и плотность зерновой смеси;

h - толщина движущегося слоя (см. рис. 1).

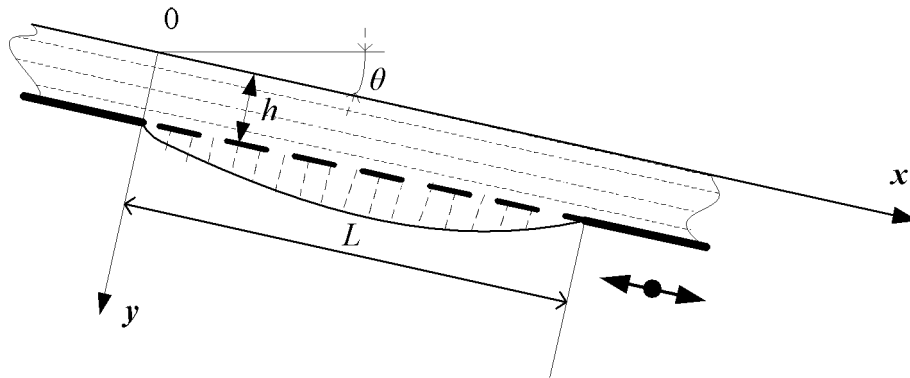


Рисунок 1 – Расчётная схема

При получении (1) в первом уравнении системы Навье-Стокса [12] не учли изменение давления в слое по координате x , а также приняли, что ввиду малости толщины h , как в погранслое [13], выполняется неравенство:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \gg \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}.$$

Поэтому в сумме $\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}$, входящей в уравнение Навье-Стокса, сохранили только первое слагаемое.

Следуя теории Бернулли для течения жидкости в трубе [14] перейдём к усреднённой скорости $u = u(x)$ по высоте слоя. Учитывая граничные условия:

$$\frac{\partial u_1(x, y)}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0 \text{ и } u_1(x, h) = 0,$$

подставим удовлетворяющее им выражение

$$u_1(x, y) = \frac{3u(x)}{2h^2}(h^2 - y^2)$$

в уравнение (1), а затем проинтегрируем его по y от 0 до h .

В результате такого преобразования получаем

$$\frac{6}{5}u \frac{du}{dx} - \frac{3v}{2h}u = g \sin \theta - \frac{3\mu}{\rho h^2}u. \quad (2)$$

Коэффициент вибровязкости μ зависит от частоты ω и амплитуды A^* продольных колебаний решета, а также от механико-технологических параметров зерновой смеси. Используя выражение μ из работы [11], находим, что

$$\frac{3\mu}{\rho h^2} = \frac{6}{5} \frac{a}{h}, \quad (3)$$

причём

$$\delta = \frac{\pi}{4M\omega^2};$$

f - коэффициент внутреннего сухого трения зёрен в смеси;

r_0, M - средние радиус и масса частиц, образующих смесь;

h_0 - начальная высота слоя, с которой смесь подаётся на решето.

Учитывая (3), уравнение (2) сводим к виду:

$$u \frac{du}{dx} + \frac{a_1}{h} u = g_1, \quad (4)$$

$$\text{где } a_1 = a - \frac{5}{4}v; \quad g_1 = \frac{5}{6}g \sin \theta.$$

Среднюю скорость прохождения отделяющейся фракции через отверстия в решете считаем независимой от координаты x и равной поперечной составляющей скорости потока v внутри слоя. В рамках такого допущения условие сохранения объёма движущейся смеси имеет вид:

$$h_0 u_0 = hu + vx,$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{h} = \frac{u}{h_0 u_0 - vx}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) приходим к дифференциальному уравнению типа Бернулли:

$$\frac{du}{dx} + \frac{c}{1 - \lambda x} u = \frac{g_1}{u}, \quad (6)$$

в котором $c = \frac{a_1}{h_0 u_0}$; $\lambda = \frac{v}{h_0 u_0}$; $1 - \lambda x > 0$.

Решение (6) ищем при начальном условии:

$$u(0) = u_0, \quad (7)$$

где u_0 - усреднённая скорость, с которой смесь подаётся на рабочую поверхность решета.

Характерно, что в рассматриваемой задаче от u_0 зависит не только начальное условие, а и коэффициент при u , в дифференциальном уравнении (6).

Представим скорость $u(x)$ произведением двух неизвестных функций

$$u(x) = \xi(x)\eta(x).$$

Подставив это произведение в (6), получаем два уравнения первого порядка с разделёнными переменными

$$\frac{d\eta}{\eta} = -\frac{c}{1 - \lambda x} dx; \quad \xi d\xi = \frac{g_1}{\eta^2} dx.$$

Интегрированием первого из них находим

$$\eta = (1 - \lambda x)^{c/\lambda}.$$

Интегрирование второго, после подстановки в него найденного η , даёт с точностью до произвольной постоянной c_1 , выражение

$$\xi^2 = \frac{2g_1}{2c - \lambda} (1 - \lambda x)^{1 - 2c/\lambda} + c_1.$$

Таким образом, общим решением уравнения (6) является

$$u(x) = \left[\frac{2g_1}{2c - \lambda} (1 - \lambda x) + c_1 (1 - \lambda x)^{2c/\lambda} \right]^{1/2}.$$

Начальное условие (7) удовлетворяется, когда

$$c_1 = u_0^2 - \frac{2g_1}{2c - \lambda}.$$

Поэтому распределение усреднённой скорости потока смеси по длине решета описывается выражением:

$$u(x) = \left[\left(u_0^2 - \frac{2g_1}{2c - \lambda} \right) (1 - \lambda x)^{2c/\lambda} + \frac{2g_1}{2c - \lambda} (1 - \lambda x) \right]^{1/2}. \quad (8)$$

От него также зависит изменение толщины движущегося слоя смеси вдоль рабочей поверхности, ибо

$$h(x) = \frac{h_0 u_0 - \nu x}{u(x)}. \quad (9)$$

Если известна скорость ν , то используя её, легко определить удельные (приходящиеся на единицу ширины) производительности решета по сходовой $\bar{Q}_c$ и по проходовой $\bar{Q}_n$ фракциям. Для вычисления их из (5) получаем

$$\bar{Q}_n = \nu L; \quad \bar{Q}_c = u_0 h_0 - \bar{Q}_n.$$

Здесь L - длина рабочей поверхности решета.

На практике ν может быть неизвестным, но по результатам сепарирования известно отношение

$$\chi = \frac{\bar{Q}_c}{\bar{Q}_n} = \frac{u_0 h_0}{\nu L} - 1.$$

Тогда

$$\nu = \frac{u_0 h_0}{L(\chi + 1)}$$

и это ν можно использовать для расчёта $u(x)$ и $h(x)$.

Численные результаты и выводы. Расчёты проведены для слоя зерновой смеси пшеницы, у которой [9]: $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$; $f = 0,47$; $r_0 = 0,001825 \text{ м}$; $M = 0,00004 \text{ кг}$; $\theta = 8^\circ$; $L = 0,79 \text{ м}$; $u_0 = 0,3 \text{ м/с}$. Рассматривали два режима колебаний решета с амплитудой $A^* = 0,0075 \text{ м}$. В первом режиме колебаний $\omega = 41,86 \text{ с}^{-1}$, а во втором $\omega = 52,33 \text{ с}^{-1}$. Начальную высоту слоя h_0 задавали равной $0,006 \text{ м}$. Рассматривали три значения $\chi = 3, 4, 5$.

Рассчитанные для них графики $u(x)$ и $h(x)$ обозначены соответственно цифрами 1, 2, 3 на рис. 2 и 3.

Результаты на рис. 2 получены при $\omega = 41,86 \text{ с}^{-1}$. Графики $u(x)$ имеют экстремум. На начальном участке рабочей плоскости усреднённая скорость потока смеси несколько возрастает, а затем – убывает.

Интенсивность убывания $u(x)$ и $h(x)$ увеличивается с уменьшением значения χ , когда в смеси выше процент отделяющейся фракции. Именно отделением части смеси через отверстия в решете объясняется одновременное уменьшение $u(x)$ и $h(x)$.

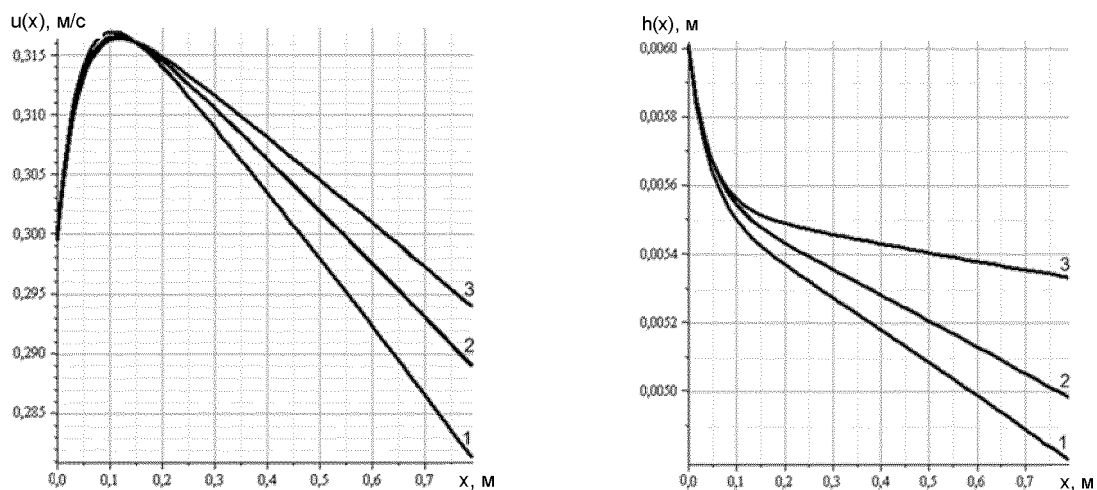


Рисунок 2 – Зависимости $u(x)$ и $h(x)$ при $\omega = 41,86 \text{ с}^{-1}$ и различных χ :
 $1 - \chi = 3$; $2 - \chi = 4$; $3 - \chi = 5$

Графики на рис. 3 получены при $\omega = 52,33 \text{ с}^{-1}$. Характер зависимостей $u(x)$ и $h(x)$ остался таким, как и на рис. 2, но увеличились экстремальные значения $u(x)$.

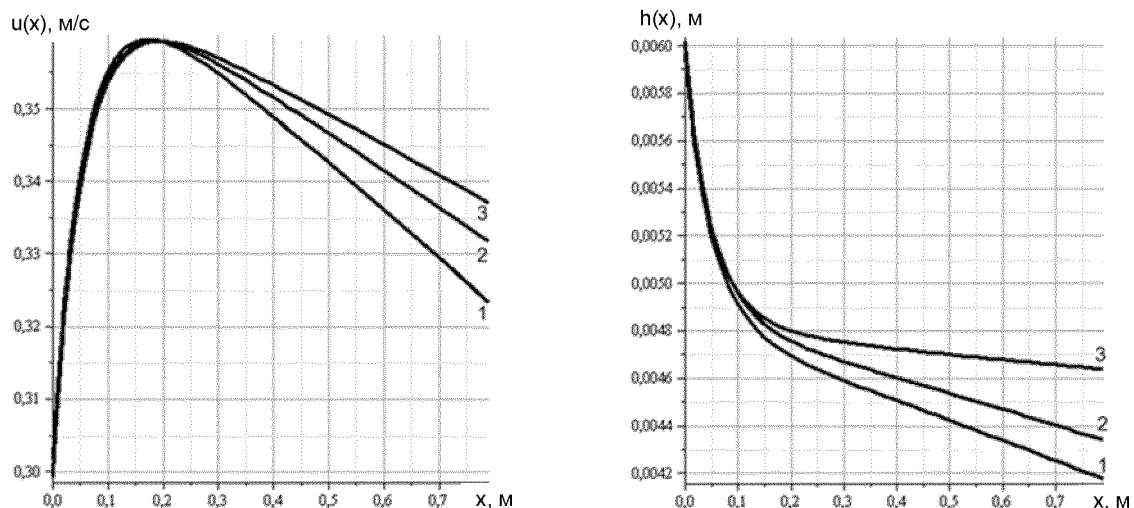


Рисунок 3 – Зависимости $u(x)$ и $h(x)$ при $\omega = 52,33 \text{ с}^{-1}$ и различных χ :
 $1 - \chi = 3$; $2 - \chi = 4$; $3 - \chi = 5$

Если на рис. 2 $u(L) < u_0$, то на рис. 3 имеем обратное, что объясняется уменьшением вибровязкости, а следовательно, увеличением текучести смеси вследствие возрастания частоты продольных колебаний решета.

Выводы. Проведённое исследование показало, что полученные расчётные формулы приводят к результатам, которые согласуются с физическими представлениями о рассматриваемом процессе сепарирования смеси. Они позволяют учитывать влияние на скорость потока слоя зерна отделения части смеси на рабочей поверхности решета, что исключено когда для расчёта движения слоя используется теория виброперемещения отдельной его частицы.

Список литературы

1. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. – М.: Наука, 1964. – 410 с.
2. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борыкин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1980. – 304с.
3. Заика П.М. Вибрационное перемещение твёрдых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. – Киев: УСХА, 1998. – 625с.
4. Манчинский Ю.О., Бакум Н.В., Горбатовский О.М., Кравцов М.М. Математична модель руху компонентів насіннєвих сумішей по робочій площині // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2008. – Вип. 92. – С. 156 – 162.
5. Тараймович І.В., Дідух В.Ф., Дударев І.М. Дослідження процесу сепарації вороху насіння льону на коливальному решеті // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 75. – Т.1 – С. 134 – 141.
6. Белов М.И., Романенко В.Н., Славкин В.И. Математическая модель движения частицы по решетку очистки // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2008. - № 8. – С. 33 – 36.
7. Листопад Г.Е. Вибросепарация зерновых смесей. – Волгоград.: Волгоградское книжное издательство, 1963. – 118 с.
8. Захаров Н.М. Об аналогии вибрируемого слоя с вязкой жидкостью // Доклады МИИСП. М.: МИИСП, 1966. – Т.3. – Вып. 1 – С. 201 – 209.
9. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна. – Харьков: Основа, 2004 – 224 с.
10. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П. Решения упрощённых уравнений гидродинамики при моделировании движения зерновой смеси по наклонному плоскому решету // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 74. – С. 306 – 312.
11. Тищенко Л.Н., Кучеренко С.И., Ольшанский В.П., Зайцев О.Б. Модель однослойного движения зерновой смеси по наклонному рифлёному решету // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 74. – С. 28 – 39.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. – 712 с.
14. Альтшуль А.Д., Киселёв П.Т. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.

Л. Тищенко, В. Ольшанський, С. Ольшанський

Визначення швидкості зернової суміші при решітному вібросепаруванні

Виходячи зі спрощеного рівняння гідродинаміки, виведено формули для обчислення середньої швидкості та продуктивності решітного вібросепарування зернової суміші, коли плоске нахилене решето здійснює коливання в своїй площині. Визначено закономірність зменшення товщини зернового шару по довжині решета, яка виникає внаслідок зміни швидкості потоку та відділення прохідової фракції на перфорованій поверхні від зернової суміші, що рухається.

L.Tishchenko, V.Olshansky, S.Olshansky,

Definition of speed of a grain mix at recounting separation

Proceeding from the simplified equation of hydrodynamics, the formulas for calculations of average transportation and productivity of separation of a grain mix are deduced, when flat inclined sieve makes of fluctuation in the plane. The change of thickness of a grain layer on length a sieve arising owing to change of velocity of a flow and branch passing of a fraction on the punched surface from driven grain weight is determined.

Одержано 12.09.09