



Харченко С. А.

Тищенко Л. Н.

Харьковский
национальный
технический
университет
сельского хозяйства
им. Петра Василенко

УДК 631.362:53

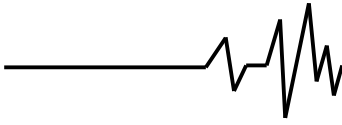
АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ПУЗЫРЬКОВОЙ ПСЕВДОЖИДКОСТИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СЕПАРИРУЕМУЮ ЗЕРНОВУЮ СМЕСЬ

Предложен алгоритм расчета коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдожидкости, получены закономерности изменения коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной зерновой смеси.

The algorithm of calculation of coefficient of dynamic viscosity of bubble pseudoliquid is offered, conformities to law of change of coefficient to dynamic viscosity of the bubble pseudocondensated corn mixture are got.

При гидродинамическом подходе к исследованию движения зерновой смеси (ЗС) по виброрешету, последняя моделируется некоторой вязкой несжимаемой псевдожидкостью [1]. В этом случае процесс движения ЗС, с математической точки зрения, описывается решением краевой задачи для уравнений Навье - Стокса вязкой несжимаемой жидкости [1, 2]. При таком подходе одной из центральных проблем является разработка алгоритмов идентификации значений эффективного коэффициента динамической вязкости. Так как, этот коэффициент входит в соответствующие уравнения Навье - Стокса и его величина определяет вклад сил вязкости в процесс движения ЗС (псевдожидкости) по виброрешету. Для решения этой проблемы предложен ряд теоретических и экспериментальных подходов [3-10]. В первых работах [3, 4], посвященных этой проблеме, для определения эффективного коэффициента динамической вязкости разработаны расчетно-экспериментальные методики, которые являются приближенными и имеют ограниченную область применимости. Некоторое развитие результаты этих работ получили в [5 - 7]. Авторы работ [1, 8, 9]

предприняли попытки чисто теоретического вычисления эффективного коэффициента динамической вязкости. В основе этих работ лежит идея установления связи между коэффициентом динамической (сдвиговой) вязкости и коэффициентом внутреннего сухого трения в ЗС. Последний может быть определен достаточно просто экспериментально. Однако, следует указать, что в [1, 8, 9] использовалось уравнение движения сферической частицы в псевдожидкости (слой ЗС), которое не учитывает ряд сил, действующих на частицу, в частности, давление в псевдожидкости в окрестности частицы. Следует также отметить работу [10], где проблема идентификации коэффициента динамической вязкости формируется и исследуется как малопараметрическая обратная задача гидродинамики. При решении этой задачи авторами [10], априори, предполагалось, что коэффициент кинематической вязкости линейно зависит от координаты перпендикулярной направлению потока ЗС. По-видимому, такое предположение является слишком ограничительным и требует соответствующего обоснования. Поскольку, в работах [1, 8, 9] было установлено, что



функциональная зависимость коэффициента динамической вязкости от координат является нелинейной. Из приведенного краткого обзора имеющихся результатов исследований, следует, что проблема идентификации характеристик псевдовязкости ЗС, движущихся на виброрешетах, от своего окончательного решения далека.

Процесс сепарирования ЗС включает в себя не только движение и просеивание ее частиц через решетчатые отверстия, но и забивание, очистку последних от застрявших зерен. Интенсивность и качество очистки отверстий, просеивание в них зерен определяют и интенсивность появления-движения пор-пузырьков. Моделирование сепарирования ЗС пузырьковой псевдожидкостью позволяет учесть интегрально протекание взаимосвязанных процессов сегрегации, просеивания, забивания и очистки решетчатых отверстий.

Разработаем теоретический метод определения эффективного коэффициента динамической вязкости зернового слоя (пузырьковой псевдожидкости), движущегося на плоском виброрешете, совершающем гармонические колебания в своей плоскости. В отличие от известных теоретических подходов [2, 8 - 10], предлагаемый метод основан на использовании уравнения движения твердой частицы сферической формы в вязкой несжимаемой жидкости с учетом силы сопротивления, градиента давления жидкости окружающей частицу и силы, ускоряющей присоединенную массу частицы относительно жидкости. Это уравнение было получено в [11, 12], где проведен анализ движения малой твердой частицы, взвешенной в турбулентном потоке жидкости. С помощью решения этого уравнения в стоковском приближении и принципа эквивалентности импульсов сил сопротивления движению частиц в различных средах [8], ниже получена функциональная зависимость эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдооживленной ЗС от параметров вибраций решета и механико-технологических характеристик зерновой смеси. Изложим основные этапы построения этой функциональной зависимости.

Пусть слой ЗС толщиной h (некоторое среднее значение) движется по плоскому виброрешету, которое наклонено к горизонту под углом θ и совершает гармонические колебания вдоль оси X с амплитудой A и круговой частотой ω (плоскость виброрешета совпадает с плоскостью XZ). Естественно

предположить, что вектор скорости пузырьковой псевдожидкости, моделирующей ЗС, параллелен оси X и его величина изменяется во времени по закону:

$$U = A\omega \cos \omega t. \quad (1.1)$$

Рассмотрим твердую частицу сферической формы, полностью погруженную в пузырьковую псевдожидкость. Если предположить, что траектория движения частицы почти совпадает с линией тока пузырьковой псевдожидкости, то, согласно [11, 12], уравнение движения частицы в пузырьковой псевдожидкости с плотностью ρ и коэффициентом динамической вязкости μ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \rho_p \frac{dU_p}{dt} = \rho_p f_1 (U - U_p) - \frac{\partial P}{\partial x} + \\ + \frac{1}{2} \rho \frac{d}{dt} (U - U_p) + \\ + \frac{9}{2a} \sqrt{\frac{\rho \mu}{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (U - U_p) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} + F. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь, a и ρ_p - радиус и плотность сферической частицы, U и U_p - скорость псевдожидкости (см. (1.1)) и частицы, P - давление в пузырьковой псевдожидкости в окрестности частицы, $F = \rho_p g \sin \theta$ - сила, выражающая действие гравитационного поля Земли, g - ускорение свободного падения, f_1 - коэффициент связанный с силой сопротивления (см. [12]):

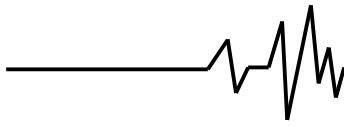
$$f_1 = \frac{3}{8} C(\text{Re}) \frac{\rho}{2\rho_p} |U - U_p|, \quad (1.3)$$

где $C = C(\text{Re})$ - коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса Re .

В дальнейшем будем полагать, что движение частицы происходит в стоковском режиме, тогда, согласно [12],

$$f_1 = \frac{9\mu}{2a^2 \rho_p}. \quad (1.4)$$

Интегральный член в (1.2) описывает мгновенное гидродинамическое сопротивление. Он существенен лишь в том случае, когда, во-первых, частица приобретает большое ускорение, и, во-вторых, плотность ρ псевдожидкости того же порядка, что и плотность ρ_p частицы или превосходит ее. В нашем случае ЗС выполняется неравенство



$\rho_p > \rho$ [1, 8]. Кроме того, частица находится в стоковском режиме движения. Поэтому, интегральным членом в (1.2) можно пренебречь.

Введем еще одно допущение, связанное с градиентом давления. Согласно [12], градиент давления можно представить в виде:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{dU}{dt} - \mu \Delta U, \quad (1.5)$$

где Δ - оператор Лапласа.

Поскольку из (1.1) следует, что $\Delta U = 0$, то формула (1.5) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho A \omega^2 \sin \omega t. \quad (1.6)$$

Далее, удобно ввести относительную скорость частицы:

$$V = U_p - U. \quad (1.7)$$

Тогда, учитывая сделанные допущения, уравнения (1.2), после ряда преобразований, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \Phi V = & \frac{2(\rho_p - \rho)}{\rho + 2\rho_p} A \omega^2 \sin \omega t + \\ & + \frac{2\rho_p g \sin \theta}{\rho + 2\rho_p}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где $\Phi = 9\mu / a^2(\rho + 2\rho_p)$.

Уравнение (1.8) - линейное неоднородное уравнение первого порядка. Следовательно, согласно [13, 14], его общее решение является суперпозицией частного решения и общего решения однородного уравнения. Частное решение уравнения (1.8) будем искать в виде:

$$V_1 = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t. \quad (1.9)$$

Подставляя (1.9) в (1.8), можно определить неизвестные константы A_0, A_1, A_2 :

$$A_0 = \frac{2\rho_p g \sin \theta}{\Phi(\rho + 2\rho_p)}, \quad A_1 = \frac{\Phi B}{\omega^2 + \Phi^2}, \quad (1.10)$$

$$A_2 = \frac{\omega B}{\omega^2 + \Phi^2},$$

где $B = \frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2}{\rho + 2\rho_p}$.

Общее решение однородного уравнения, соответствующего уравнению (1.8), имеет вид:

$$V_2 = A_3 e^{-\Phi t}, \quad (1.11)$$

где A_3 - произвольная постоянная величина.

Итак, общее решение уравнения (1.8) можно представить следующим образом:

$$V = A_3 e^{-\Phi t} + A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t. \quad (1.12)$$

Здесь коэффициенты A_0, A_1 и A_2 определяются согласно (1.10).

Относительную скорость частицы (1.12) можно записать в более компактном виде:

$$V = A_3 e^{-\Phi t} + A_0 + H \sin(\omega t - \varphi), \quad (1.13)$$

где

$$H = \frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2}{(\rho + 2\rho_p)\sqrt{\omega^2 + \Phi^2}}, \quad (1.14)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega}{\Phi}\right).$$

При больших временах ($t \rightarrow \infty$) экспоненциальный член в (1.13) можно опустить, поскольку величина $\Phi > 0$. Тогда, окончательно получаем следующее выражение для относительной скорости частицы, погруженной в пузырьковой псевдожидкости:

$$\begin{aligned} V = & \frac{2\rho_p g \sin \theta}{\Phi(\rho + 2\rho_p)} + \\ & + \frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2}{(\rho + 2\rho_p)\sqrt{\omega^2 + \Phi^2}} \sin(\omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (1.15)$$

где $\Phi = 9\mu / a^2(\rho + 2\rho_p)$, а величина фазы φ определяется по формуле (1.14).

Следует отметить, что задача о движении сферической частицы в псевдосжиженной ЗС исследовалась в [8]. Однако, в отличие от [8], учет градиента давления приводит к тому, что амплитуда относительной скорости существенным образом зависит от разности плотностей псевдосжиженной ЗС и частицы. Как покажем ниже, такое поведение амплитуды относительной скорости играет решающую роль при получении расчетной формулы для эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС.

Следующим шагом в определении функциональной зависимости эффективного коэффициента динамической вязкости от физико-механических свойств ЗС и параметров вибраций решета является использование принципа эквивалентности импульсов сил сопротивления движению частицы в различных средах. Такой подход был применен в [15]. Следуя этой работе, рассчитаем импульсы сил сопротивления движению частицы на одном полупериоде колебаний. Согласно уравнению



(1.2), силу сопротивления псевдожидкости можно представить в виде:

$$F_c = V_p \rho_p f_1 V, \quad (1.16)$$

где $V_p = 4\pi a^3 / 3$ - объем сферической частицы, а V - относительная скорость частицы (см. (1.15)).

Тогда импульс силы за полупериод колебаний π / ω равен:

$$I_c = 6\pi a \mu \int_{\phi/\omega}^{\pi/\omega + \phi/\omega} V(t) dt = 6\pi a \mu \left[\frac{2\rho_p g \sin \theta \pi}{\Phi(\rho + 2\rho_p)\omega} + \frac{4(\rho_p - \rho)A\omega^2}{(\rho + 2\rho_p)\sqrt{\Phi^2 + \omega^2}} \right] \quad (1.17)$$

С другой стороны, при перемещении частицы в вибрирующей зерновой смеси на нее действует сила сухого трения F_{mp} . Импульс этой силы за время π / ω можно определить следующим образом:

$$I_{mp} = F_{mp} \frac{\pi}{\omega}. \quad (1.18)$$

В соответствии с принципом эквивалентности (см. [15]) приравниваем импульсы сил I_c и I_{mp} . Тогда получим:

$$\frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2 \Phi}{\pi \sqrt{\Phi^2 + \omega^2}} = \frac{F_{mp}}{V_p} - \rho_p g \sin \theta. \quad (1.19)$$

Равенство (1.19), при известной силе трения F_{mp} , является уравнением относительно величины $\Phi = 9\mu / a^2(\rho + 2\rho_p)$, а, следовательно, и относительно коэффициента динамической вязкости μ .

Далее, если воспользоваться результатами работы [15], то можно получить следующее представление для силы сухого трения:

$$F_{mp} = \xi f \rho (\pi a)^2 g \cos \theta (h - y), \quad (1.20)$$

где f - коэффициент внутреннего сухого трения в зерновой смеси, $0 < \xi < 1$ - множитель, учитывающий пузырчатость ЗС, y - расстояние от центра сферической частицы до плоскости виброрешета.

Подставляя (1.20) в (1.19) имеем:

$$\frac{\bar{A}\Phi}{\sqrt{\Phi^2 + \omega^2}} = \bar{B}. \quad (1.21)$$

Здесь

$$\bar{A} = \frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2}{\pi}, \quad (1.22)$$

$$\bar{B} = \frac{3\xi f \rho \pi g \cos \theta (h - y)}{4a} - \rho_p g \sin \theta.$$

Очевидно, что условие разрешимости уравнения (1.21) относительно Φ выражается неравенством $\bar{B} \geq 0$, или

$$y \leq \bar{y}, \quad (1.23)$$

где величина \bar{y} выражается через параметры ЗС и имеет вид:

$$\bar{y} = h - \frac{4a\rho_p \text{tg} \theta}{3\xi f \rho \pi}. \quad (1.24)$$

Как вытекает из (1.21), при $y = \bar{y}$ величина $\Phi = 0$ и, следовательно, $\mu = 0$. Это значение координаты \bar{y} можно интерпретировать как некоторую эффективную толщину пузырькового псевдосжиженного зернового слоя. При $y \geq \bar{y}$ следует полагать, что коэффициент динамической вязкости $\mu \equiv 0$. В физическом отношении при $y = \bar{y}$ величина силы сухого трения совпадает с величиной проекции силы тяжести на направление движения частицы.

Учитывая ограничение (1.23), из (1.21) получаем формулу для расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС:

$$\mu = \frac{a^2(\rho + 2\rho_p)\bar{B}\omega}{9\sqrt{\bar{A}^2 - \bar{B}^2}}. \quad (1.25)$$

Здесь величины \bar{A} и \bar{B} определяются по формуле (1.22). Формула (1.25) применима, когда эти величины удовлетворяют неравенству:

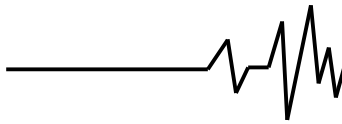
$$\bar{A} > \bar{B}. \quad (1.26)$$

Очевидно, что это неравенство заведомо будет выполняться, если толщина (средняя) слоя ЗС удовлетворяет неравенству:

$$\frac{h}{2a} < \frac{4(\rho_p - \rho)A\omega^2}{3\xi f \rho \pi^2 g}. \quad (1.27)$$

Таким образом, неравенства (1.23) и (1.27) определяют область изменения значений параметров, при которых применима формула (1.25) для расчета коэффициента динамической вязкости пузырькового псевдооживленного зернового слоя.

В частности, из (1.26) можно определить максимальное значение толщины h_{\max} зернового слоя, при котором коэффициент



динамической вязкости обращается в бесконечность. Это значение h_{\max} определяется из уравнения:

$$\bar{A} = \max \bar{B}.$$

Действительно, из (1.22) имеем:

$$\max \bar{B} = \frac{3\xi f g \pi \rho \cos \theta (h-a)}{4a} - \rho_p g \sin \theta,$$

$$\bar{A} = \frac{2(\rho_p - \rho) A \omega^2}{\pi}.$$

Подставляя эти значения \bar{A} и $\max \bar{B}$ в исходное уравнение, получаем:

$$h_{\max} = a \left[1 + \frac{4}{3\xi f g \pi \cos \theta} \times \left(\frac{2(\rho_p - \rho) A \omega^2}{\pi} + \rho_p g \sin \theta \right) \right]. \quad (1.28)$$

С помощью (1.28) можно рассчитать максимально возможную эффективную толщину пузырькового псевдосжиженного зернового слоя. Для этого достаточно подставить (1.28) в (1.24), тогда находим:

$$\bar{y}_{\max} = a \left(1 + \frac{8(\rho_p - \rho) A \omega^2}{3\pi^2 \xi f g \cos \theta} \right).$$

Как уже было отмечено выше, при значениях координаты $y \geq \bar{y}_{\max}$ коэффициент динамической вязкости обращается в ноль.

Из (1.28) следует, что h_{\max} и y_{\max} прямо пропорциональны разности плотностей частицы и псевдосжиженной ЗС амплитуде A и квадрату частоты ω вибраций решета и обратно пропорциональны коэффициенту внутреннего сухого трения в ЗС.

Как следует из (1.25), коэффициент динамической вязкости зависит от координаты y , которая изменяется вдоль оси перпендикулярной плоскости виброрешета. Для практических приложений представляет интерес усредненное значение коэффициента динамической вязкости. Поскольку, в этом случае построение решения уравнения Навье-Стокса для моделирования движения пузырькового псевдосжиженного зернового слоя значительно упрощается.

Далее получим формулу для расчета усредненного по толщине зернового слоя значения коэффициента динамической вязкости. Учитывая ограничение (1.23) искомый коэффициент μ_{cp} можно представить в виде следующего интеграла:

$$\mu_{cp} = \frac{1}{\bar{y}-a} \int_a^{\bar{y}} \mu(y) dy. \quad (1.29)$$

Подставляя (1.25) в (1.29) имеем:

$$\mu_{cp} = \frac{a^2(\rho + 2\rho_p)}{9(\pi - a)} \int_a^{\bar{y}} \frac{\bar{B}}{\sqrt{A^2 - \bar{B}^2}} dy. \quad (1.30)$$

Из (1.22) следует, что параметр \bar{B} линейно зависит от координаты y и имеет вид:

$$\bar{B} = B_1(h-y) - B_2, \quad (1.31)$$

где $B_1 = \frac{3\xi f g \pi \rho \cos \theta}{4a}$, $B_2 = \rho_p g \sin \theta$.

Очевидно, что интеграл в (1.30) вычисляется в аналитическом виде. Действительно, имеем:

$$\frac{\bar{B}}{\sqrt{A^2 - \bar{B}^2}} = \frac{1}{B_1} \frac{d}{dy} \sqrt{A^2 - \bar{B}^2}. \quad (1.32)$$

Подставляя (1.32) в (1.30), окончательно получаем:

$$\mu_{cp} = \frac{a^2(\rho + 2\rho_p)\omega}{9(\bar{y}-a)B_1} \left(\bar{A} - \sqrt{A^2 - D^2} \right). \quad (1.33)$$

Здесь

$$\bar{y} = h - \frac{4a\rho_p \operatorname{tg} \theta}{3\xi f g \pi}, \quad \bar{A} = \frac{2(\rho_p - \rho) A \omega^2}{\pi},$$

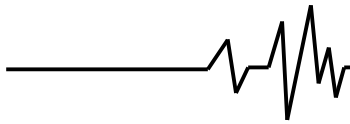
$$D = \frac{3\xi f g \pi \rho \cos \theta (h-a)}{4a} - \rho_p g \sin \theta,$$

$$B_1 = \frac{3\xi f g \pi \rho \cos \theta}{4a}.$$

Итак, зная усредненные значения физико-механических свойств ЗС и конструктивно-кинематические параметры вибрирующего решета, по формуле (1.33) можно рассчитать усредненный коэффициент динамической вязкости пузырькового псевдосжиженного зернового слоя.

Таким образом, разработан алгоритм расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС, находящейся на плоском виброрешете, совершающего гармонические продольные колебания.

Проанализируем результаты коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС. Расчеты проводили для слоя пшеницы со следующими физико-механическими свойствами [16]: $\rho_p = 1572 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$, $a = 0,001825 \text{ м}$, $h = 0,004 (0,006) \text{ м}$. Угол наклона виброрешета к горизонту составлял $\theta = 8^\circ$, а амплитуда и



частота колебаний, соответственно, $A = 0,0075$ м и $\omega = 75$ с⁻¹. Коэффициент внутреннего сухого трения изменялся на интервале $0,3 \leq f \leq 0,55$, а коэффициент, учитывающий поправку на пузырчатость зерновой смеси $\xi = 0,7$.

На рис. 1 представлены результаты расчетов зависимости коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС от величины y - расстояния до плоскости виброрешета. Расчеты проводили при значениях коэффициента внутреннего сухого трения $f = 0,3; 0,4; 0,55$ и толщинах зернового слоя $h = 0,004$ (0,006) м. Амплитуда и частота колебаний решета составляла, соответственно $A = 0,0075$ м, $\omega = 75$ с⁻¹.

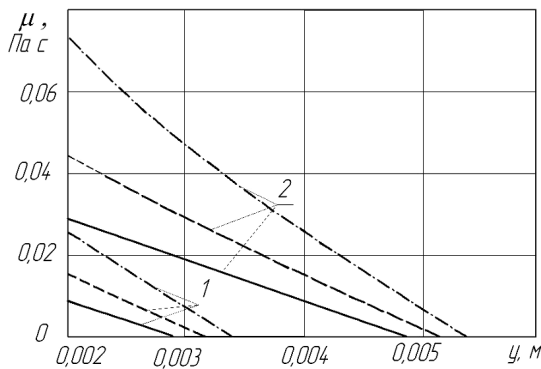


Рис. 1. Зависимости коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдосжиженной ЗС от расстояния до плоскости виброрешета, при: 1 – $h=0,004$ м; 2 - $h=0,006$ м; — — — — — $f = 0,3$; - - - - - $f = 0,4$; - · - · - $f = 0,55$ ($A=0,0075$ м; $\omega = 75$ с⁻¹; $\xi = 0,7$; $\rho_p = 1572$ кг/м³; $\theta = 8^\circ$; $a = 0,001825$ м; $\rho = 750$ кг/м³)

Как видно из рис.1, коэффициент динамической вязкости почти линейно зависит от координаты y . Причем, при эффективных значениях толщины зернового слоя, определяемых по формуле (1.24):

$$\bar{y} = h - \frac{4a\rho_p \operatorname{tg}\theta}{3\xi f \rho}$$

коэффициент динамической вязкости $\mu = 0$.

Такая зависимость коэффициента динамической вязкости от координат, позволяет сформулировать малопараметрическую обратную задачу, как,

например, это сделано в работе [10]. По сути, результаты, представленные на рис. 1, являются обоснованием, сделанного в [10] допущения о линейной зависимости коэффициента динамической вязкости от координаты y , перпендикулярной направлению зернового потока.

Представление о том, как коэффициент динамической вязкости зависит от коэффициента внутреннего сухого трения, дает рис. 2.

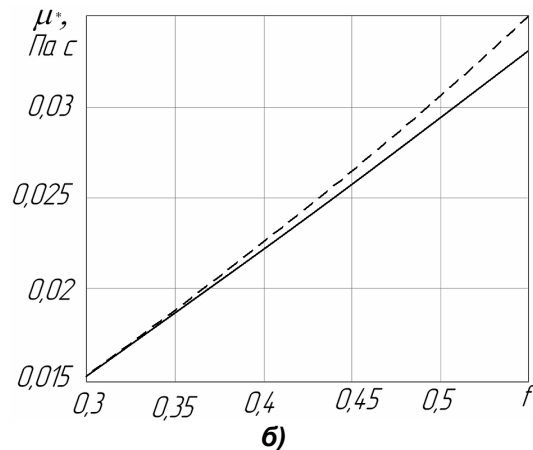
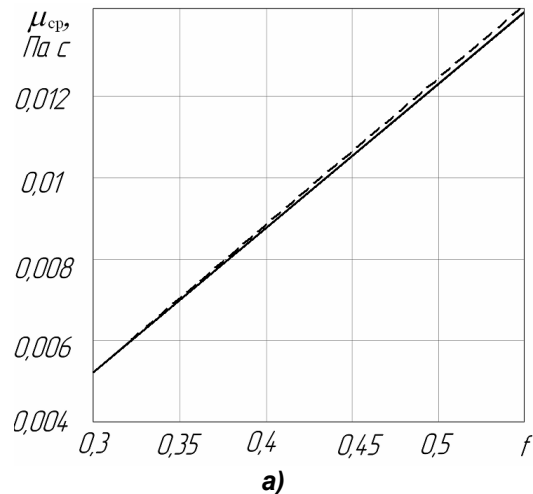
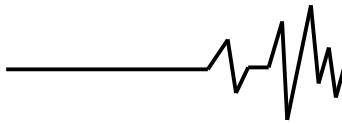


Рис. 2. Зависимости коэффициентов динамической вязкости ЗС от коэффициента внутреннего сухого трения, при: а) $h=0,004$ м; б) $h=0,006$ м; — — — — — $\mu^*(f)$; - - - - - $\mu_{cp}(f)$ ($A=0,0075$ м; $\omega = 75$ с⁻¹; $\xi = 0,7$; $\rho_p = 1572$ кг/м³, $\rho = 750$ кг/м³, $a = 0,001825$ м, $\theta = 8^\circ$)

На рис.2 при различных значениях толщины сепарируемого зернового слоя показаны зависимости среднего значения



коэффициента динамической вязкости μ_{cp} и коэффициента динамической вязкости μ^* при

$$y = \frac{\bar{y} + a}{2}, \text{ т.е. в точке, соответствующей}$$

середине эффективной толщине зернового слоя. Обращает внимание тот факт, что при повышении толщины зернового слоя разность $\mu_{cp} - \mu^*$ начинает увеличиваться (на 0,004 Па с) с ростом коэффициента внутреннего трения. Это обстоятельство следует учитывать при моделировании движения ЗС с помощью усредненного значения коэффициента динамической вязкости.

Представляет практический и теоретический интерес исследование зависимости эффективной толщины зернового слоя от коэффициента внутреннего сухого трения. Поскольку значение эффективной толщины зернового слоя (см. формулы (1.23) (1.24)) ограничивает область значений параметров, при которых возможно применение формулы (1.21) для расчета коэффициента динамической вязкости. На рис. 3 представлены результаты таких исследований.

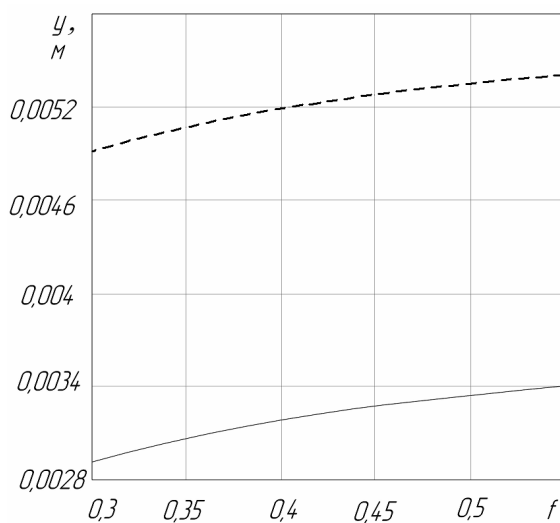


Рис. 3. Зависимости эффективной толщины зернового слоя от коэффициента внутреннего сухого трения, при: — $h=0,004\text{ м}$; - - - $h=0,006\text{ м}$ ($\xi = 0,7$; $A = 0,0075\text{ м}$; $\omega = 75\text{ с}^{-1}$; $\rho_p = 1572\text{ кг/м}^3$, $\rho = 750\text{ кг/м}^3$, $a = 0,001825\text{ м}$, $\theta = 8^\circ$)

Как видно, эффективная толщина зернового слоя слабо зависит от

коэффициента внутреннего сухого трения. Так, изменение коэффициента внутреннего сухого трения почти в два раза (до $f=0,6$) приводит к незначительному изменению эффективной толщины зернового слоя $\Delta\bar{y} \sim 0,0005\text{ м}$.

Наряду с эффективной толщиной зернового слоя, для предложенного алгоритма расчета коэффициента динамической вязкости, большую роль играет величина максимального значения толщины зернового слоя h_{max} (см. формула (1.28)). Поскольку, при толщинах зернового слоя $h \rightarrow h_{max}$ коэффициент динамической вязкости стремится к бесконечности. По сути, величина h_{max} определяет границу применимости формулы (1.25).

На рис. 4 изображена зависимость $h_{max} = h_{max}(f)$, где f - коэффициент внутреннего сухого трения. Любопытно отметить, что при малых углах наклона виброрешета к горизонту максимальная толщина зернового слоя практически совпадает с эффективной толщиной зернового слоя.

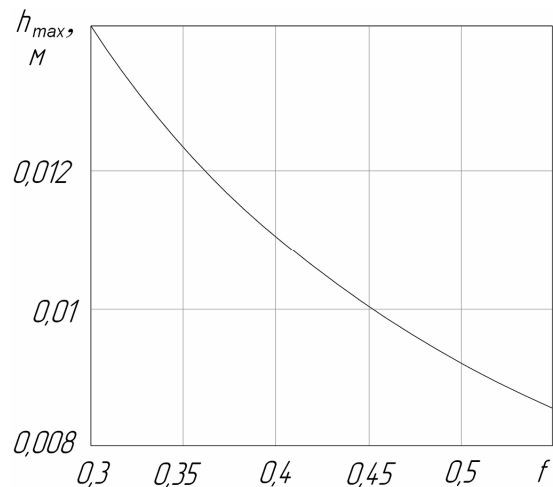
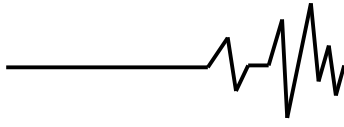


Рис. 4. Зависимость максимальной толщины зернового слоя от коэффициента внутреннего сухого трения ($\xi = 0,7$; $A = 0,0075\text{ м}$; $\omega = 75\text{ с}^{-1}$; $\rho_p = 1572\text{ кг/м}^3$, $\rho = 750\text{ кг/м}^3$, $a = 0,001825\text{ м}$, $\theta = 8^\circ$)

Таким образом, предложенный алгоритм расчета коэффициента динамической вязкости является основой для моделирования процесса сепарирования ЗС с помощью краевых задач для уравнений Навье – Стокса.

**Література**

1. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Гидродинамика сепарирования зерна. - Харьков: "Місьдрук", 2010. - 174 с.
2. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Колебания зерновых потоков на виброрешетках - Харьков: "Місьдрук", 2012. - 267 с.
3. Захаров Н.М. Об аналогии вибрируемого слоя с вязкой жидкостью / Н.М. Захаров // Доклады МИИСП. - М., 1966.- Т.3, Вып. 1. – С. 201-210.
4. Кошлов О.Н. Исследование вибровязких свойств сыпучих сельскохозяйственных материалов / О.Н. Кошлов // Автореферат диссертации кандидата технических наук: РИСХМ. - Ростов на Дону, 1966. – 20 с.
5. Захаров Н.М. О движении слоя зерна и силах внутреннего трения при вибрационном перемещении / Н.М. Захаров // Вестник сельскохозяйственной науки.- М.: Колос, 1968.- № 5.- С.70 – 75.
6. Злочевский В.П. Моделирование движения зернового материала на сепараторах со сложным движением рабочих органов / В.П. Злочевский, А.В. Баранов, С.В. Тарасевич // Материалы XII Международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири" – Томск: ТГУ, 2006.- С. 139 - 141.
7. Тарасевич С.В. Обоснование параметров сепараторов с вибрационно-качающейся решетной поверхностью для зерновых материалов / С.В. Тарасевич. Автореферат диссертации кандидата технических наук 05.20.01 / Алт – Барнаул, 2008. - Т. 14.- 27 с.
8. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна. - Харьков: Основа, 2004.- 224 с.
9. Тищенко Л.Н. Виброрешетная сепарация зерновых смесей / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. - Харьков: "Місьдрук", 2011. - 280 с.
10. Тищенко Л.Н. Идентификация характеристик псевдовязкости зерновой смеси, движущейся на плоском виброрешете / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, Р.Н. Карнадуд, С.В. Ольшанский // Вісник ХНТУСГ «Механізація сільськогосподарського виробництва». – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С.50-57.
11. Tcken C.M., Dissertation, Delft, Martinus Nijhoff, The Hague (1947).
12. Соу С. Гидродинамика многофазных систем.- М.: Мир, 1971.- 602 с.
13. Бидерман В.П. Теория механических колебаний.- М.: Высшая школа, 1980.- 408с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.- М.: Наука, 1970.- 720с.
15. Тищенко Л.Н. Сравнение двух способов определения коэффициента вязкости псевдосжиженной зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании / Л.Н. Тищенко, Ф.М. Абдуева, В.П. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2008. - №1 (50). – С.96-100.
16. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, И.А. Борискин.- М.: Колос, 1980.- 304с.