

EDN: IELMLB

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55



Научная статья

УДК 631.171



Подтверждение адекватности вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке

Виктор Геннадьевич Хамуев,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: victor250476@yandex.ru;

Станислав Александрович Герасименко,
младший научный сотрудник,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;
Сергей Игоревич Борзенко,
младший научный сотрудник,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. При математическом моделировании процесса сепарации в гравитационной колонке зачастую не учитывается коэффициент вибрации прутков при движении семян и примеси по криволинейной поверхности гравитационной гребенки. Это, в свою очередь, влияет на качество разделения. Важно отметить, что коэффициент вибрации напрямую зависит от конструктивных параметров прутков гребенки в гравитационной колонке. (*Цель исследования*) Экспериментальное подтверждение теоретических результатов вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке. (*Материалы и методы*) Для лабораторных исследований разработан макетный образец гравитационной колонки с единичной гребенкой. Определяли эффективную длину прутков гребенки, диаметр сечения прутка, угол наклона гребенки. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что из условия самоочищаемости гребенок коэффициент сепарации составляет $\mu = 3,6$ метра в минус первой степени. При вибрации прутков функции изгибающего момента со значениями вертикальных и горизонтальных коэффициентов $a = -30$, $b = -31,9$ и $\tilde{a} = -0,58$, $\tilde{b} = -1,47$ паскаля в минус первой степени на метр в минус первой степени достигается довольно высокая статистическая корреляция между разработанной математической моделью и экспериментальными значениями (коэффициент детерминации 0,96). Определены эффективная длина прутков в диапазоне от 125 до 150 миллиметров гребенки, диаметр сечения прутков 1,5 миллиметра. (*Выводы*) Экспериментально подтверждены результаты вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке. Дальнейшие пути интенсификации процесса сепарации направлены на поиск нового конструктивного решения формы прутков гребенки.

Ключевые слова: семена сои, очистка семян, сортировка семян, сепарация семян, гравитационная колонка, вероятностная математическая модель.

■ **Для цитирования:** Хамуев В.Г., Герасименко С.А., Борзенко С.И. Подтверждение адекватности вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 49-55. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55. EDN: IELMLB.

Scientific article

Validation of a Probabilistic Mathematical Model for Soybean Seed Separation in a Gravity Column

Viktor G. Khamuev,
Ph.D.(Eng), leading researcher,
e-mail: victor250476@yandex.ru;
Stanislav A. Gerasimenko,
junior researcher,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Sergey I. Borzenko
junior researcher,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In mathematical models of the separation process in a gravity column, the coefficient of bar vibration is frequently disregarded as seeds and impurities move along the curved surface of the gravity column, which, in turn, affects the quality of separation. It is important to note that the vibration coefficient directly depends on the design parameters of the comb bars in the

gravity column. (*Research purpose*) The research aims to experimentally validate the theoretical findings from a probabilistic mathematical model elucidating the process of soybean seed separation within a gravity column. (*Materials and methods*) For laboratory research, a gravity column prototype with a single comb was developed. Parameters such as the effective length of the comb bars, the cross-sectional diameter of the bar, and the comb angle inclination were determined. (*Results and discussion*) It was found out that, under the condition of self-cleaning combs, the separation coefficient $\mu = 3.6$ meters to the power of negative one. During bar vibration, the functions of the bending moment with vertical coefficients $a = -30$, $b = -31.9$, and horizontal coefficients $\tilde{a} = -0.58$, $\tilde{b} = -1.47$ Pascal to the power of negative one per meter to the power of negative one, yield a fairly high statistical correlation between the developed mathematical model and experimental values (coefficient of determination 0.96). The effective length of the bars was determined to be within the range from 125 to 150 millimeters of the comb, with a cross-sectional diameter of the bars measuring 1.5 millimeters. (*Conclusions*) Experimental validation of the probabilistic mathematical model regarding the process of soybean seed separation in the gravity column was conducted. Further ways to intensify the separation process are aimed at finding a new design solution for the shape of the comb bars.

Keywords: soybean seeds, seed cleaning, seed sorting, seed separation, gravity column, probabilistic mathematical model.

■ **For citation:** Khamuev V.G., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I. Validation of a probabilistic mathematical model for soybean seed separation in a gravity column. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 49-55 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-49-55. EDN: IELMLB.

Актуальным в сельскохозяйственном производстве является разработка способов повышения качества и уменьшения потерь семян в процессе послеуборочной обработки [1], в частности при сепарации. При математическом моделировании процесса сепарации в гравитационной колонке зачастую не учитывается коэффициент вибрации прутков при движении семян и примеси по криволинейной поверхности гравитационной гребенки [2]. Это обстоятельство в свою очередь влияет на качество разделения исходного материала [3, 4]. Важно отметить, что коэффициент вибрации прутков напрямую зависит от конструктивных параметров прутков гребенки в гравитационной колонке [5, 6].

Цель исследования – сравнение теоретических и экспериментальных результатов вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке.

Материалы и методы. Исследования проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Для проведения опыта была разработана лабораторная установка гравитационной колонки прямоугольного сечения 84×345 мм высотой 600 мм с единичной гребенкой (рис. 1). Три стенки колонки изготовлены из ДСП, а четвертая из прозрачного органического стекла для наблюдения за процессом сепарации. Гребенка представляет собой консольно-закрепленные с одной стороны на общей поверхности в ряд металлические прутки. На раме из стальных уголков крепятся приемный бункер, а в нижней части колонки установлено устройство для вывода фракций. На приемном бункере объемом 5 дм^3 имеется заслонка для регулировки подачи материала в колонку.

Исходный материал самотеком движется вниз по гребенке. Частицы, размер которых $z < w - d$ (рис. 2), проходят через зазоры между прутками и выводятся

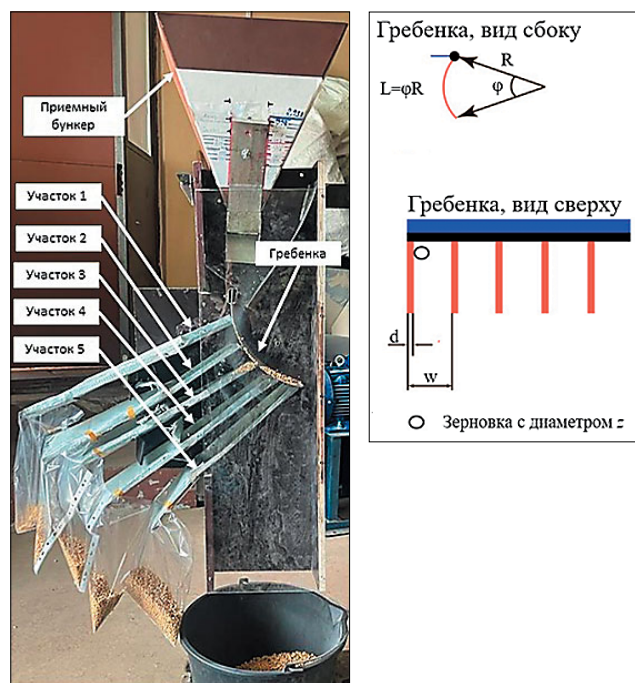


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки с гравитационной гребенкой для сепарации семян (слева); вид гребенки и прутка (справа)

Fig. 1. General view of the experimental installation with a gravity comb (left); view of the comb and a single bar (right)

ся в фракцию «проход», а крупные размером $z > w - d$, скользя по гребенке, опускаются в приемник материала (фракция «сход»).

Длина прутков гребенки L влияет на качество разделения по толщине частиц. Расстояние на конце гребенки относительно ее верхней части между прутками увеличивается под давлением движущегося материала. По этой причине гребенка условно разделена на пять равных участков, под каждым установлен контейнер для оценки качества разде-

ления по всей длине прутков в зависимости от их длины и толщины (диаметра сечения), угла наклона гребенки и производительности.

В гравитационную колонку устанавливали поочередно гребенки с зазорами 4 и 6 мм, прутки диаметром сечения 1, 2, 3 мм, также в опытах варьировали наклон гребенки 0° (минимальный), 20° (средний), 40° (максимальный) и удельную зерновую нагрузку 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч). Площадь сепарирующей (рабочей) поверхности гребенок 215 см², длина прутков 253 мм.

Качество разделения оценивали по показателю полноты выделения ϵ [7]. Для этого массу, накопленную в каждом из пяти участков фракции «проход» при каждом варианте опыта, взвешивали на лабораторных весах [8], разделяли с помощью лабораторных решет с продолговатыми отверстиями. Далее составляли системы уравнений и вычисляли методом наименьших квадратов наиболее подходящие эмпирические коэффициенты [9, 10]. Продолговатые отверстия 4 мм в решетке соответствовали зазору между прутками гребенки 4 мм, в решетке с отверстиями 6 мм – зазору 6 мм.

Пробу исходного материала сои массой 5 кг предварительно разделяли на решетке с продолговатыми отверстиями 4 и 6 мм. Массы фракций «сход» и «проход» взвешивали на лабораторных весах. Масса «схода» на решетке 4 мм составила 4455,8 г, «прохода» – 554,2 г, на решетке 6 мм соответственно 254,3 и 4745,7 г.

Гребенку с зазором 4 мм и диаметром сечения прутка 1 мм устанавливали под углом 0° и засыпали исходный материал в колонку при удельной зерновой нагрузке 2,32 кг/(см²·ч). Затем накопленный в каждом из пяти контейнеров материал пропускали через решетку с отверстиями 4 мм, чтобы определить полноту выделения материала на каждом участке гребенки.

Далее материал смешивали, засыпали в колонку, увеличивали зерновую нагрузку до 7,61 кг/(см²·ч) и накопленный в каждом контейнере снова материал пропускали через решетку 4 мм. Снова смешивали, засыпали в колонку при нагрузке 11,95 кг/(см²·ч) и материал из каждого контейнера пропускали через решетку 4 мм.

Аналогично, при наклоне гребенки 20° пропускали материал при нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч), подсчитывали полученные фракции, смешивали, подавали в колонку при наклоне гребенки 40° и пропускали материал при трех режимах нагрузки. Устанавливали гребенку с зазором 6 мм и диаметром прутка 1 мм, повторяли опыт при углах наклона гребенки 0, 20, 40° и нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно.

Устанавливали гребенку с зазором 4 мм и диаметром прутка 2 мм повторяли опыт при углах на-

клона гребенки 0, 20, 40° и нагрузках 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно. Используя гребенку с зазором 6 мм и диаметром прутка 2 мм, повторяли опыт при углах наклона гребенки 0, 20, 40° и удельной зерновой нагрузке 2,32, 7,61 и 11,95 кг/(см²·ч).

Далее устанавливали гребенку с зазором 4 мм и диаметром прутка 3 мм и повторяли опыт при наклоне гребенки 0, 20, 40° и нагрузке 2,32, 7,61, 11,95 кг/(см²·ч) соответственно. Так же повторяли опыт при гребенке с зазором между прутьями сечением 6 мм (рис. 2).

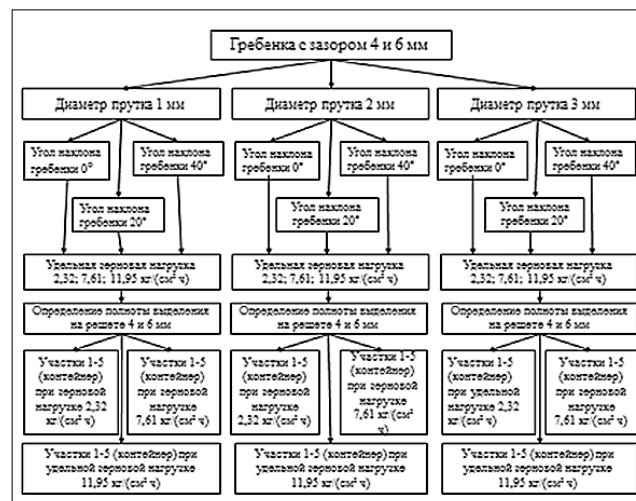


Рис. 2. Схема опытов при гребенке с зазором между прутьями 4 и 6 мм

Fig. 2. Diagram of experiments with combs having gaps of 4 and 6 mm

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В проведенном ранее исследовании [11] при разработке вероятностной математической модели было получено неравенство (1), в котором обратный переход в неравенство (2) происходит при стремлении жесткости на изгиб к бесконечности [12].

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w}\right) \left(1 - e^{-\left(\mu(L-z) + \frac{a(L-z)^4}{4EJL} + \frac{b(L-z)^5}{5EJL^2}\right)}\right)\right)^N < \delta, (1)$$

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w}\right) (1 - e^{-\mu L_{эфф}})\right)^N < \delta. (2)$$

Для условия (1) эмпирические параметры (μ , a , b) были найдены при натурном эксперименте с одиночной гребенкой длиной $L = 0,25$ м. Через каждые отрезки 0,025 м (фактически $L_{i+1} - L_i$, где $i = 1-9$) вдоль длины гребенки собирали просеявшийся (прошедший через гребенку) материал. При этом расстояние между прутками гребенки было 0,004 м, диаметр прутка $d = 0,002$ м (период $w = 0,006$ м). Гребенка была изготовлена из стали 65Г (модуль нормальной упругости E выбран равным 215 ГПа), по форме прутья гребенки представляли собой дугу окружности [13]. Схематично вид сбоку конструк-

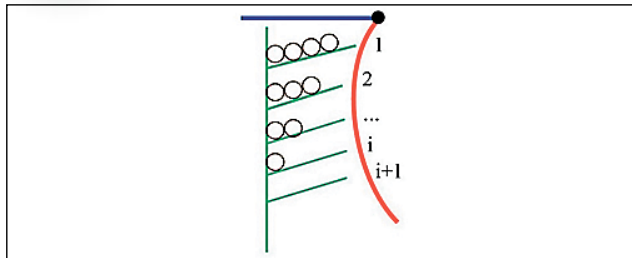


Рис. 3. Схема гребенки (вид сбоку)

Fig. 3. Side view of a single comb

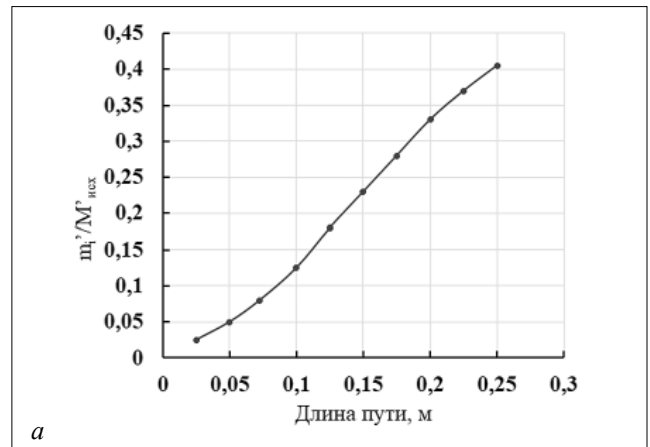
ции изображен на рисунке 3. Красным цветом отмечена гребенка, фиолетовым – консольное закрепление, зеленым – схематическое представление контейнеров для сборки просеянного, черные круги – просеянный материал. Нумерация отрезков 1, 2, i , $i+1$ соответствует нумерации контейнеров.

Следует отметить, что в просеянном материале были как мелкие примеси, так и семена сои. Относительное число семян увеличивалось по мере приближения к свободному краю прутка, что может являться следствием все большего увеличения амплитуды колебаний прутьев гребенки [14, 15]. Это требует отдельного модельного рассмотрения уменьшения числа примесей (характерный размер от 0 до 0,003 м со средним значением около 0,0015 м) и числа зерен (размер 0,004-0,008 м со средним значением 0,006 м). Дополнительное просеивание через решетку с калибровочными отверстиями тестовой исходной массы $M_{исх} = 3,107$ кг позволило определить исходную массу примеси ($M'_{исх} = 0,146$ кг) и оставшуюся исходную массу зерен ($M''_{исх} = 2,962$ кг). После этого подсчитывали накопившую массу просеявшейся примеси (m'_i) и просеявшегося зерна (m''_i) при прохождении расстояния (отрезков) по гребенке по отношению к исходным массам $M'_{исх}$ и $M''_{исх}$, т.е. $m'_i/M'_{исх}$ и $m''_i/M''_{исх}$ (рис. 4).

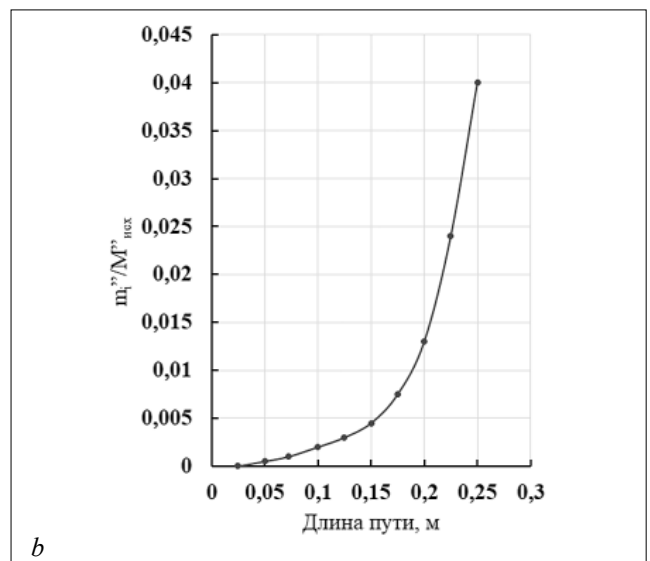
Как видно, зависимость изменения $m'_i/M'_{исх}$ от длины пройденного пути близка к прямой, но вблизи краев отмечаются наибольшие отклонения (рис. 4а). При этом точка перегиба располагается около 0,13-0,14 м, а после нее происходит изменение выпуклости функции, что соответствует началу уменьшения скорости просеивания примеси: до точки перегиба производная функции (скорость просеивания примеси) растет, после нее начинает уменьшаться [16].

Для сопоставления с модельным подходом была рассмотрена преобразованная зависимость, происходящая из зависимости при $N = 1$ с учетом равенства (1), а также того, что $L - z \approx L$:

$$m'_i/M'_{исх} = P_x P_y = \left(\frac{w-d-z}{w} \right) \times \left(1 - e^{\left(-\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2} \right)} \right), \quad (3)$$



a



b

Рис. 4. Зависимость накопившейся зерновой массы от длины пройденного пути: а – просеявшейся примеси $m'_i/M'_{исх}$; б – просеявшегося зерна $m''_i/M''_{исх}$

Fig. 4. Dependence of the accumulated grain mass on the length of the traveled path: а – sifted impurity $m'_i/M'_{исх}$; б – sifted grain $m''_i/M''_{исх}$

$$\ln \left(1 - \frac{m'_i}{M'_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z} \right) \right) = -\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2}. \quad (4)$$

Введем условные обозначения для левой и правой частей соответственно:

$$LP = \ln \left(1 - \frac{m'_i}{M'_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z} \right) \right);$$

$$RP = -\mu(L_i) + \frac{a(L_i)^4}{4EJL} + \frac{b(L_i)^5}{5EJL^2}.$$

На рисунке 5 представлено сравнение экспериментальных данных с аппроксимированной полиномиальной зависимостью вида RP с подобранными методом наименьших квадратов параметрами a и b .

Зависимость LP от длины пути L_i имеет нелинейный характер. Диапазон линейности отмечает-

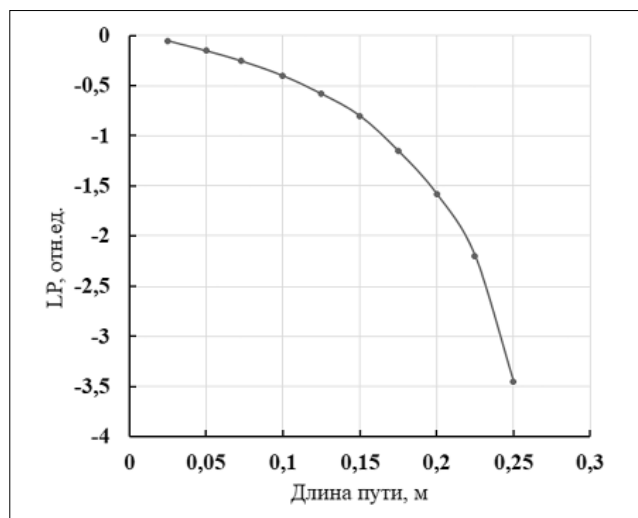


Рис. 5. Зависимость величины $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z}\right)\right)$ от длины пути L_i

Fig. 5. The dependence of $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}} \left(\frac{w}{w-d-z}\right)\right)$ on the path length L_i

ся примерно до 0,14 м. После начинаются существенные отклонения, которые, по-видимому, связаны с нарастающим влиянием колебаний решет (отклонение от статического случая, который соответствует линейной зависимости).

При этом значения определенных величин параметров $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, $a = -30 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $b = -31,9 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Достигается довольно хорошая статистическая корреляция между предсказываемым теорией зависимостью вида (4) и экспериментальными значениями, что подтверждается близким к единице значением скорректированного коэффициента детерминации, равным 0,96.

Как упоминалось выше, помимо просеивания примеси по мере удаления от точки закрепления гребенки из-за нарастающей амплитуды колебаний прутков отмечалось также просеивание зерен. Это является негативным фактором, приводящим к потере зерна [17]. Выбор оптимальных параметров установки, прежде всего за счет длины гребенки, может снизить такого рода потери. На рисунке 4б резкое увеличение начинается после 0,125-0,15 м. Качественно схожим образом с примесями можно объяснить и данную зависимость $(m_i''/M''_{исх}(L_i))$. Для этого по аналогии рассмотрим изменение массы по мере прохождения вдоль прутка. Считая, что в статическом варианте прохода сквозь прутья решетки не должно быть, будем рассматривать изменение массы зерен только зависящими от амплитуды колебаний, что приводит к уравнению:

$$dM = M \left(\frac{1}{EJ} \left(\frac{\tilde{a}L^2}{1} \left(\frac{y}{L} \right)^3 + \frac{\tilde{b}L^2}{2} \left(\frac{y}{L} \right)^4 \right) \right) dy. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5), получаем величину массы зерна, которая остается на гребенке

$$M = M_0 e^{\left(\frac{\tilde{a}y^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}y^5}{5EJL^2} \right)}, \text{ где } y \in (0, L). \quad (6)$$

Соответственно доля просеявшегося зерна $m_i''/M''_{исх}$, попадающего в первые контейнеры i за путь L_i

$$m_i''/M''_{исх}(L_i) = P = (1 - M/M_0) = 1 - e^{\left(\frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2} \right)}. \quad (7)$$

Как и в случае примеси для проверки эта зависимость модифицирована в следующий вид:

$$LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right) = \frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2}. \quad (8)$$

Представленная на рисунке 6 зависимость имеет явно выраженный нелинейный характер и хорошо согласуется с зависимостью вида

$$\frac{\tilde{a}(L_i)^4}{4EJL} + \frac{\tilde{b}(L_i)^5}{5EJL^2}.$$

Диапазон слабого отклонения от нуля по оси ординат простирается примерно до 0,125 м. После 0,15 м начинаются существенные отклонения, связанные, по-видимому, с нарастающим влиянием колебаний решет (отклонение от статического случая, который соответствует линейной зависимости).

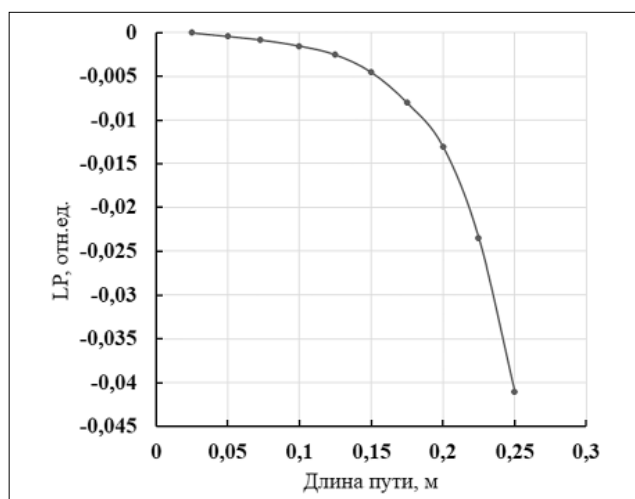


Рис. 6. Зависимость величины $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right)$ от длины пути L_i

Fig. 6. Dependence of the value $LP = \ln\left(1 - \frac{m_i''}{M''_{исх}}\right)$ on the path length L_i

Выводы. Данный подход к определению оптимальных параметров гравитационной колонки позволяет учитывать нарастающую амплитуду колебаний прутков как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении в нижней части рабочей поверхности гребенки. Определена эффективная длина изготовленной из стали 65Г прутков гребенки в диапазоне от 125 до 150 мм при оптимальном диаметре сечения 1,5 мм. Значения определенных величин параметров $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, $a = -3053 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, b

$= -31,9 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\tilde{a} = -0,58 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\tilde{b} = -1,47 \text{ Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. При этом достигается довольно хорошая статистическая корреляция между предсказываемым теорией зависимостью и экспериментальными значениями, что подтверждается близким к единице значением скорректированного коэффициента детерминации, равным 0,96.

Дальнейшие пути интенсификации процесса сепарации направлены на новое конструктивное решение формы прутков гребенки, при которых процесс сепарации и калибровки семян будет осуществляться не только по их толщине, но также длине, ширине и другим формам семян.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Интенсивные машинные технологии и техника нового поколения для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2017. N7. С. 2-6. EDN: ZBMMSL.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4 (298). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
- Спирина Н.Г., Попов А.Е., Шацкий В.П. О форме решета гравитационных сепараторов // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016. N1-4. С. 125-128. EDN: VKNGOP.
- Леканов С.В., Стрикунов Н.И., Куницын Р.А. Совершенствование технологии очистки семян зерновых и технических культур // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021. N7 (201). С. 110-116. EDN: BWLLBP.
- Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A. et al. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clear. *Transactions of the ASABE*. 2020. N60 (5). 1751-1758. DOI: 10.13031/trans.12110.
- Gievskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P. et al. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2017. N327 (4). 042035. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042035.
- Малюков С.В., Князев А.В., Аксенов А.А. и др. Обзор конструкций машин для обескряливания, очистки и сортировки семян // *Воронежский научно-технический вестник*. 2019. Т. 2. N2 (28). С. 61-72. EDN: VUMXUB.
- Кабашов В.Ю., Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Экспериментальное исследование зерноочистительной машины с решетным станом продольно-поперечного колебания // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2019. N2 (50). С. 115-120. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-115-120.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Разработка вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2023. N4(72). С. 555-566. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Обоснование основных параметров гравитационной колонки при очистке семян сои // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2022. N3(67). С. 574-583. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-65.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 27-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32.
- Zhe Qu, Qi Lu, Haihao Shao et al. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*. 2024. 14. DOI: 671. 10.3390/agriculture14050671.
- Ефимов Д.С., Кротова О.Е., Челбин С.М. Сравнительная эффективность аспирационного оборудования при пылезачисте элеваторных комплексов вместимостью 20000 тонн // *Современная наука и инновации*. 2022. N3(39). С. 128-139. DOI: 10.37493/2307-910X.2022.3.11.
- Panasiewicz M., Mazur J., Zawislak K., Kulig R., Łysiak G. the process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. 12. 7566. DOI: 10.3390/su12187566.
- Галкин В.Д., Хандриков В.А., Федосеев А.Ф. и др. Исследование процесса разделения семян на пневмосортировальном столе с усовершенствованным рабочим процессом // *Пермский аграрный вестник*. 2023. N1(41). С. 4-12. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_4.
- Badredinov I., Mudarisov S., Tuktarov M. et al. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17. 529-534. DOI: 10.5937/jaes17-22640.

REFERENCES

- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Intensive machine

- technologies and new generation machinery for manufacturing main groups of agricultural produce. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017. N7. 2-6 (In Russian). EDN: ZBMMSL.
3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N 4 (298). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
 4. Spirina N.G., Popov A.E., Shatsky V.P. On the shape of gravity separator sieves. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2016. N1-4. 125-128 (In Russian). EDN: VKNGOP.
 5. Lekanov S.V., Strikunov N.I., Kunitsyn R.A. Improving the technology of cleaning seeds of grain and industrial crops. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2021. N7 (201). 110-116 (In Russian). EDN: BWLLBP.
 6. Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A. et al. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clear. *Transactions of the ASABE*. 2020. N60 (5). 1751-1758 (In English). DOI: 10.13031/trans.12110.
 7. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2017. N327 (4). 042035 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042035.
 8. Malyukov S.V., Knyazev A.V., Aksenov A.A. et al. Design review of machines for de-spraying, cleaning and sorting of seeds. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2019. Vol. 2. No. 2 (28). 61-72 (In Russian). EDN: VUMXUB.
 9. Kabashov V., Tuktarov M., Baynazarov V. Experimental study of grain cleaner with a longitudinal-transverse vibration sieve pan. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2019. N2 (50). 115-120 (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-115-120.
 10. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Development of a probabilistic mathematical model of the soybean seed separation process in a gravity column. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. 4(72). 555-566 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.
 11. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Substantiation of the main parameters of a gravity column when cleaning soybean seeds. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2022. N3(67). 574-583 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-65.
 12. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Substantiation of the design and layout scheme for the gravity-pneumatic soybean seed cleaner. *Agricultural Machinery and Technology*. 2022. Vol. 16. N3. 27-32 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-27-32.
 13. Zhe Qu, Qi Lu, Haihao Shao et al. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*. 2024. 14. 671 (In English). DOI: 10.3390/agriculture14050671.
 14. Efimov D.S., Krotova O.E., Chelbin S.M. et al. The comparative efficiency of aspiration equipment for dust protection of elevator complexes with a capacity of 20,000 tons. *Modern Science and Innovations*. 2022. N3(39). 128-139 (In Russian). DOI: 10.37493/2307-910X.2022.3.11.
 15. Panasiewicz M., Mazur J., Zawi'slak K. et al. The process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. N12. 7566 (In English). DOI: 10.3390/sul2187566.
 16. Galkin V.D., Khandrikov V.A., Fedoseev A.F. et al. Investigation of the seed separation process on a pneumatic sorting table with an improved workflow. *Perm Agrarian Journal*. 2023. N1 (41). 4-12 (In Russian). DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_4.
 17. Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M., Dick E., Arslanbekova S. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17. 529-534 (In English). DOI: 10.5937/jaes17-22640.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Хамуев В.Г. – научное руководство, обобщение данных литературы, итоговая переработка статьи;
 Герасименко С.А. – проведение опыта, обработка данных опыта, составление начального варианта статьи, литературный анализ, формирование общих выводов, доработка текста;
 Борзенко С.И. – проведение опыта, литературный анализ.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант

Coauthors' contribution:

Khamuev V.G. – scientific supervision, literature review, final revision of the manuscript;
 Gerasimenko S.A. – conducting the experiment, processing experimental data, drafting the manuscript, literature review, formulation of general conclusions, manuscript revision;
 Borzenko S.I. – conducting the experiment, literature review.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2024

27.05.2024