

Информация об авторах

Темасова Галина Николаевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>, e-mail: temasova@rgau-msha.ru

Леонов Олег Альбертович, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, e-mail: oaleonov@rgau-msha.ru

Самордин Андрей Николаевич, соискатель ученой степени кандидата наук кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (Российская Федерация, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), e-mail: samordin@rgau-msha.ru

Леонов Дмитрий Олегович, студент магистратуры по направлению стандартизация и метрология, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (Российская Федерация, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), e-mail: msau.l@yandex.ru

Author's Information

Temasova Galina Nikolaevna, Ph.D. of Economy sciences, Associate Professor of the Department of Metrology, Standardization and Quality Management of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, 127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0555-2758>, e-mail: temasova@rgau-msha.ru

Leonov Oleg Albertovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Metrology, Standardization and Quality Management of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, 127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>, e-mail: oaleonov@rgau-msha.ru

Samordin Andrey Nikolaevich, applicant for the degree of candidate of sciences, Senior Lecturer of the Department of Metrology, Standardization and Quality Management of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, 127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49), e-mail: samordin@rgau-msha.ru

Leonov Dmitriy Olegovich, 2nd year Master's degree student in standardization and Metrology of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, 127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49), e-mail: msau.l@yandex.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56

DEVELOPMENT OF A PROBABILISTIC MATHEMATICAL MODEL OF THE SOYBEAN SEED SEPARATION PROCESS IN A GRAVITY COLUMN

V. G. Khamuev, S. A. Gerasimenko

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
Moscow, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: stanislav.mkm@gmail.com

Received 25.09.2023

Submitted 26.10.2023

The research was carried out within the framework of the state task FGUN-2022-0007 "To develop innovative complexes of machines with robotic elements for breeding and seed production of cereals, legumes, and mass crops using electrophysical methods of exposure" for 2022–2024. Funding was allocated by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Summary

The article presents research on the development of a probabilistic mathematical model of the soybean seed separation process in a gravity column. As a result, a mathematical model was obtained describing the separation process on concave curved surfaces (combs), taking into account the geometric characteristics of the combs and columns and the effect of the vibration coefficient of the comb bars

on the effectiveness of the process. Empirically, from the self-cleaning condition of the combs, it was found that with the separation coefficient, as well as the vertical and horizontal coefficients of the bending moment function when the rods vibrate, a fairly high statistical correlation is achieved between the developed mathematical model and experimental values.

Abstract

Introduction. One of the important problems in the agro-industrial complex of agriculture is still the post-harvest processing of grain and the preparation of high-quality seeds. Grain cleaning machines with a sieve mill do not provide the proper quality of seed cleaning in one pass since, during operation, the holes of the sieves are clogged, which leads to a decrease in the quality of cleaning. Soybean seeds are easily injured during cleaning on a grain cleaning machine with a rolling mill, as a result of which the seeds split into cotyledons and damage the embryo (embryo). As a result, the development of a grain cleaning machine free of the above disadvantages is required. Such a device can be a gravity column in which soybean seeds are not injured and there is no clogging of the sieves. **Object.** The object of the study is to determine the regularities of the process of interaction of soybean seeds and impurities with the working surfaces of the gravity separation machine. **Materials and methods.** The research was carried out at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM. A mathematical model has been developed in which the influence of the geometric dimensions of the gravity column is empirically taken into account. **Results and conclusions.** A mock-up sample of a gravity column was developed, where the separation coefficient $\mu = 3.6 \text{ m}^{-1}$, as well as the vertical and horizontal coefficients of the bending moment function during the vibration of the rods, equal to $a = -30 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$, $b = -31.9 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$, were determined empirically from the condition of self-cleaning of the combs, $a = -0.58 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$, $b = -1.47 \text{ Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$. A fairly good statistical correlation is achieved between the developed mathematical model and experimental values with a coefficient of determination equal to 0.996 and 0.998, respectively.

Key words: soybean seeds, seed purification, seed sorting, seed separation, gravity columns.

Citation. Khamuev V. G., Gerasimenko S. A. Development of a probabilistic mathematical model of the soybean seed separation process in a gravity column. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023. 4(72). 555-566. (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.

Author's contribution. All the authors of this study participated in the planning, execution or analysis of this study. All the authors of this article have read and approved the submitted final version.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.3

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ СЕМЯН СОИ В ГРАВИТАЦИОННОЙ КОЛОНКЕ

В. Г. Хамуев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

С. А. Герасименко, младший научный сотрудник

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
г. Москва, Российская Федерация

*Исследования проведены в рамках выполнения государственного задания FGUN-2022-0007
«Разработать инновационные комплексы машин с элементами роботизации для селекции
и семеноводства зерновых, зернобобовых и масличных культур с применением
электрофизических методов воздействия» на 2022-2024 гг. финансирование выделено
Министерством науки и высшего образования Российской Федерации*

Актуальность. Одной из важных проблем в агропромышленном комплексе сельского хозяйства по-прежнему остается послеуборочная обработка зерна и подготовка качественных семян. Зерноочистительные машины с решетным станом не обеспечивают должного качества очистки семян за один проход, так как во время работы отверстия решет забиваются, что приводит к снижению качества очистки. Семена сои легко травмируются при очистке на зерноочистительной машине с решетным станом в следствии чего семена раскалываются на семядоли или повреждаются

зародыш (эмбрион). Поэтому требуется разработка зерноочистительной машины свободной от вышеописанных недостатков. Таким устройством может быть гравитационная колонка в которой семена сои не травмируются, а забиваемость гребенок отсутствует. **Объект.** Объектом исследования являются закономерности процесса взаимодействия семян сои и примеси с рабочими поверхностями гравитационной сепарирующей машины **Материалы и методы.** Исследования проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Разработана математическая модель, в которой эмпирически учитывается влияние геометрических размеров гравитационной колонки. **Результаты и выводы.** Разработали макетный образец гравитационной колонки, где были определены эмпирическим путём из условия самоочищаемости гребёнок коэффициент сепарации $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, а также вертикальных и горизонтальных коэффициентах функции изгибающего момента при вибрации прутков, равных $a = -30 \text{ Па}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $b = -31,9 \text{ Па}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\tilde{a} = -0,58 \text{ Па}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\tilde{b} = -1,47 \text{ Па}^{-1} \text{ м}^{-1}$ достигается довольно высокая статистическая корреляция между разработанной математической моделью и экспериментальными значениями с коэффициентом детерминации равным 0,996 и 0,998 соответственно.

Ключевые слова: семена сои, очистка семян, сортировка семян, сепарация семян, гравитационные колонки.

Цитирование. Хамуев В. Г., Герасименко С. А. Разработка вероятностной математической модели процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке. *Известия НВ АУК*. 2023. 4(72). 555-566. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-56.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. К настоящему времени разработано большое количество зерноочистительной техники, предназначенной для определённых этапов очистки [1-4]. В нашей стране послеуборочная обработка сои происходит на типичных зерноочистительных агрегатах и комплексах, на поточных линиях, укомплектованных различными типами зерноочистительных машин [5, 6].

В хозяйствах для очистки и сортировки семян сои обычно используют любые имеющиеся в хозяйстве машины [7-10]. Однако высокое качество доработки способна обеспечить не каждая машина, поскольку не вся зерноочистительная техника рассчитана на очистку семян сои. Соевый ворох содержит, в основном, тяжело отделяемые примеси: дефектные, битые вдоль и поперек семена и семена сорняков. Для их удаления нужны высокие скорости воздушного потока, точный подбор сит и тщательное соблюдение определенной последовательности в выполнении технологических операций. Кроме того, соя легко травмируется рабочими органами машин с решетным станом [11].

Исследованию процесса сепарации на гравитационном решете посвящены работы ученых: Зюлин А. Н., А. А. Стрелков, Ямпиллов С. С., Балданов В. Б., Одиноких А. А., Шацкий В. П. и др. [12]. Многие математические модели, описывающие процесс сепарации на вогнутом гравитационном решете, не учитывают коэффициент вибрации прутков, толщину прутков, количество гребенок при минимальной высоте колонки. Поэтому необходимо разработать математическую модель процесса сепарации с учетом вышеописанных параметров. Целью исследования является повышение эффективности очистки и сортировки семян сои в селекции и семеноводстве гравитационной сепарирующей машиной за счет определения коэффициента сепарации и вертикальных и горизонтальных коэффициентах функции изгибающего момента при вибрации прутков.

Материалы и методы. Объектом исследования является закономерности процесса взаимодействия семян сои и примеси с рабочими поверхностями гравитационной сепарирующей машины. Задача описания движения частиц по пруткам гребенки связа-

на с необходимостью учета целого ряда параметров при данном движении. К ним, в частности, можно отнести характер движения (поступательный, вращательный, прыжковый), взаимодействие частиц между собой (относительное движение частиц между собой), взаимодействие частиц с прутками гребенки (относительное движение частиц и прутков), собственное движение прутков, форма и размеры прутков гребенки. Подбор рациональных условий приводит к необходимости выделения наиболее существенных параметров и абстрагирования от менее существенных при определенных скоростях течения потока частиц, толщине слоя, относительных размеров частиц. Всё это приводит к модельному рассмотрению движения потока частиц.

Можно выделить два принципиально разных подхода к решению такого рода задач. Первый подход включает рассмотрение уравнений движения для элемента массы (или в частном случае единичного зерна) по пруткам гребенки [13, 14]. При этом элемент массы рассматривается как материальная точка, на которую действуют силы: гравитационная, сила реакции опоры и сила трения. Характер рассматриваемого движения может быть, как в целом поступательный [13], так и с учетом вращения для случая частиц с относительно простой формой: сферической и эллипсоидальной с изменением общей массы. При этом закон изменения массы является, строго говоря, отступлением в сторону эмпирического закона, основанного на вероятностных закономерностях. Одним из преимуществ такого подхода является возможность привести результат в отдельных случаях к аналитической форме, а также получить явную зависимость, например, для формы прутьев гребенки [13], оценку характерных времён прохода гребенки и зависимости от углов установки для случая плоской гребенки. Такой подход может достаточно хорошо описывать движение относительно слабо взаимодействующих зерен.

При этом, во-первых, на поток зерен накладываются ограничения по числу слоёв, что ограничивает общую скорость сепарирования установки с подобранными таким методом параметрами. К тому же сами по себе гребенки работают в режиме неполной загрузки. Во-вторых, в уравнениях движения одиночной частицы – зерна зачастую используется сила сопротивления движения (сила сухого трения $F = \mu_{\text{тр}} N_{\text{оп}}$, где $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения, $N_{\text{оп}}$ – реакция опоры), характерная только для движения по пруткам одиночного зерна и к тому же без учета влияния давления вышележащих слоёв. Имеется в виду, что данная сила уже не применима к следующему, более высоко лежащему слою (требуется модификация силы сопротивления). Также на практике сила реакции опоры подразумевает учет дополнительной прижимной силы, возникающей вследствие давления выше лежащих слоёв. В-третьих, различия с экспериментом могут возникать из-за более сложного характера движения, чем просто поступательное (скачкообразное движение, вращение, отсутствие учета собственного колебательного движения прутков, пролет частицы и пр.). Попытка учета более сложного движения элемента массы приводит к необходимости введения дополнительных эмпирических параметров, что с одной стороны усложняет модель, делая её более громоздкой. С другой стороны, это приводит к необходимости проведения дополнительного эксперимента, направленного на определение введенных эмпирических параметров, переносимость которых от одной установки к другой будет требовать подтверждения.

Альтернативным подходом является нижеследующий. Процесс просеивания или непрохода сквозь прутки решета является случайным. Соответственно отношение, например, числа просеявшихся частиц к общему числу частиц, взятому по массе можно рассматривать как вероятность события просеивания. Аналогичным образом обстоят дела с непроходом (непросеиванием). Соответствующий подход можно рассматривать как вероятностное описание движения элементов массы (зерен). Рассмотрение просеи-

ваний или непроходов сквозь прутки гребенки, будучи проанализированным в течении продолжительного временного интервала и/или просеивания больших объемов, позволяет нивелировать отклонения, связанные с единичными случайными событиями просеиваний или непроходов. Это позволяет перейти от рассмотрения дискретной функции изменения числа частиц к непрерывно изменяющейся функции (например, массы зерен и примеси). При этом в многоступенчатых системах, состоящих из нескольких одинаковых гребенок, свести фактически к рассмотрению поведение для одиночной гребенки. Это позволяет связать рекуррентно число частиц, просеявшихся и не прошедших при прохождении определенной гребенки с числом частиц после прохождения предыдущей гребенки. Данное рассмотрение потока частиц позволяет абстрагироваться от всей сложности движения отдельных зерен и вороха (примеси) и перейти к практически важным параметрам. При этом можно разделять случаи полной и частичной загрузки решет, вводя соответствующие параметры. В работах Стрелкова А. А. и Балданова В. Б. предлагались модели сепарации, построенные на вероятностном описании сложного движения элементов массы. При этом получающаяся просеиваемость, зависящая в общем случае от множества параметров сепаратора, сводилась к некоторой более простой функции. Зависимость прохождения мелкой фракции от геометрических размеров учитывалась неявно, путем введения таких эмпирических параметров, как, например, коэффициент сепарации, или набор параметров, характеризующих пропускную способность решета, вероятность частицы остаться (или просеяться) и вероятность мелкой частицы просеяться из слоя зерна. Недостатком данного подхода является неявная зависимость эмпирически определенных параметров от геометрических размеров сепарирующей установки. Решение данной проблемы может быть связано с постановкой натурного эксперимента, из которого данные параметры могут быть определены. А также путем учета параметров методом последовательных приближений. Суть данного подхода заключается в постепенном уточнении до необходимого уровня соответствия путем введения дополнительных параметров, влияющих на изменение массы просеивания в результате прохождения потока частиц вдоль прутьев гребенки.

Результаты и обсуждение. Была построена математическая модель, в которой в том числе эмпирически учитывается влияние геометрических размеров сепаратора. Для данной модели были учтены следующие геометрические параметры:

- 1) длина дуги прутка (через центральный угол и радиус прутка),
- 2) диаметр прутка,
- 3) период прутков (расстояние между прутками гребенки),
- 4) количество гребенок при минимальной глубине канала,
- 5) диаметр мелкой фракции (приближение сферической формы).

Рассматривается система, состоящая из двух типов частиц. Первый тип частиц условно называется мелкая фракция, второй тип частиц – крупная фракция. Рассматривается движение потока, состоящего из двух таких фракций с частичным просеиванием мелкой фракции, где вероятность события просеивания мелкой фракции является функцией таких параметров сепаратора, как, в том числе, длина прутков гребенки (L), расстояние между прутками гребенки (w), диаметр прутка (d). В свою очередь, длина прутка гребенки с формой дуги окружности (рисунок 1) может быть выражена через радиус (R), а также центральный угол (φ) по формуле (1), высота одиночной гребенки h выражается по формуле (2), а полная высота, состоящая из N гребенок по формуле (3).

$$L = \varphi R \quad (1)$$

где, L – длина прутков гребенки, мм; φ – центральный угол, гр.; R – радиус окружности, мм.

$$h=2R\sin(\varphi/2), \quad (2)$$

где, h – высота одной гребенки, мм.

$$H=Nh=2NR\sin(\varphi/2), \quad (3)$$

где, N – число гребенок.

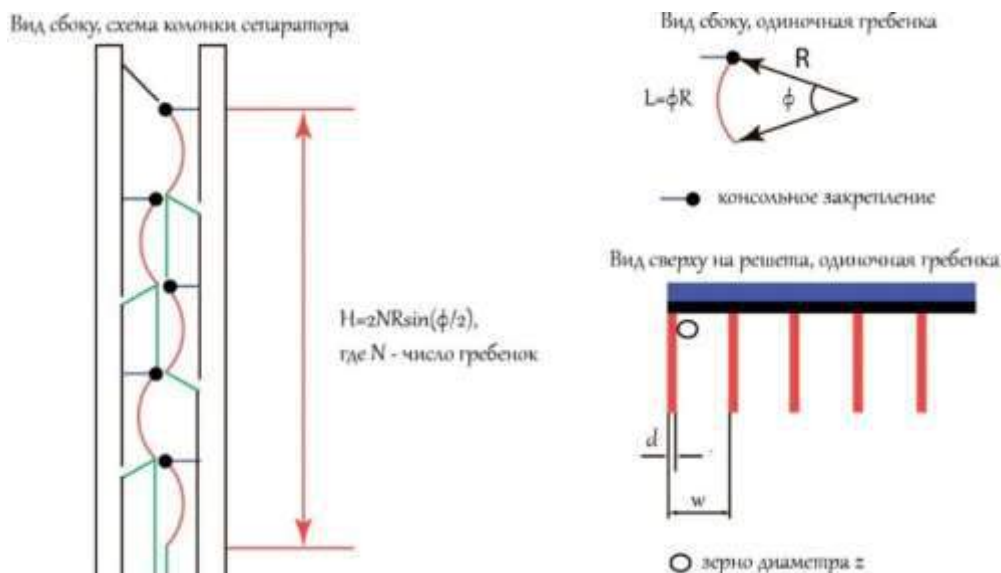


Рисунок 1 – Схема гравитационного сепаратора (а), а также отдельной его гребенки (б) с условными и цветовыми обозначениями (черный – основа, красный – гребенки, фиолетовый – консольное закрепление, зеленый – дополнительные элементы для отвода просеянного материала)
 Figure 1 – Diagram of the gravity separator (a), as well as its separate comb (b) with conventional and color designations (black – base, red – combs, purple – cantilever attachment, green – additional elements for removing the sifted material)

В случае закрепления гребенки так, что отрезок (зеленый отрезок на рисунке 2), проведенный через края дуги прутка, не вертикален и гребенки располагаются так, что при переходе с одной на другую нет зазора, N умножается на $\sin\alpha$, где α – угол между отрезком и горизонтом (рисунок 2).

Тем не менее, это не влияет на подбор параметров и угла $0<\alpha<90^\circ$, задача ставится так, что необходимо найти наименьшую величину H , при которой за N проходов по гребенкам достигается остаточная доля мелкой фракции не более некоторого, наперед выбранного критерия δ (фактически это соответствует оставшемуся проценту от исходного количества мелкой фракции).

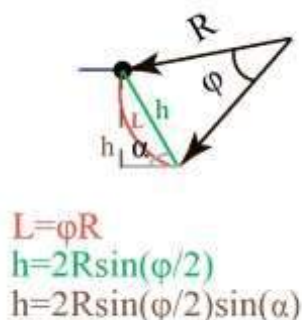


Рисунок 2 – Наклонное расположение гребенки и соответствующие условные обозначения
 Figure 2 – The inclined arrangement of the comb and the corresponding symbols

Дополнительным предположением является эквивалентность всех просеивающих гребенок, что предполагает одинаковые геометрические параметры и вероятность просеивания. В работе Стрелкова А.А. рассматривался случай работы гребенок в режиме полной и частичной загрузки. С точки зрения минимальной глубины канала наиболее эффективным является такое устройство сепаратора, чтобы все гребенки работали в режиме полной загрузки, а критерий δ выполнялся по окончании прохода последней (нижней) гребенки.

Таким образом, критерием оптимальности с точки зрения глубины канала является условие (4):

$$T^N < \delta, \quad (4)$$

где T – вероятность пройти одно решето (вероятность не просеивания), а соответственно T^N – вероятность пройти N решет. При этом $T=1-P$, где P – вероятность просеивания.

В свою очередь вероятность просеивания P связывается с геометрическими факторами и может быть представлена в виде (5)

$$P = P_x P_y, \quad (5)$$

где P_y – вероятность просеивания вдоль направления гребенок, P_x – вероятность просеивания в ортогональном направлении (поперек гребенок).

По аналогии с работами считается, что по мере продвижения вдоль направления гребенок на величину dy происходит уменьшение массы на dM , определяемое выражением (6):

$$dM = -\mu M dy, \quad (6)$$

где μ – коэффициент сепарации с размерностью [длина⁻¹], проинтегрировав выражение (6) с учетом начального условия получаем закон изменения массы при прохождении расстояния L в виде (7):

$$M(L) = M_0 e^{-\mu L}, \quad (7)$$

где M_0 – масса сепарируемой фракции до начала прохода по решетку (т.е. $M(0) = M_0$).

Подход к определению коэффициента μ описан ниже по тексту.

Выражение (7) предполагает, что уменьшение происходит с самого начала гребенки. В действительности учет геометрических размеров мелкой фракции может приводить к меньшему результату, отличающемуся на величину диаметра малой фракции, что сокращает эффективную длину гребенки $L_{эфф} = L - z$, а соответствующая массовая доля, прошедшая одну гребенку, будет тесно связана с вероятностью просеивания (P_y) (8):

$$1 - P_y = e^{-\mu L_{эфф}}, \text{ т.е. } P_y = 1 - e^{-\mu L_{эфф}} \quad (8)$$

где, P_y – вероятность просеивания вдоль направления гребенок, $L_{эфф}$ – эффективную длину гребенки, мм; μ – коэффициент сепарации с размерностью [длина⁻¹]

В свою очередь вероятность просеивания в ортогональном направлении (P_x) будет определяться эффективными свободными линейными размерами. С учетом того, что в направлении x гребенку можно рассматривать, состоящей из повторяющихся прутков с диаметром d на расстоянии w , эффективный свободный линейный размер с учетом размеров малой фракции d , отнесенный к расстоянию w может быть представлен выражением (9), что фактически и выражает вероятность просеивания P_x :

$$P_x = \frac{w-d-z}{w}, \quad (9)$$

где, P_x – вероятность просеивания в ортогональном направлении (поперек гребенок); w – расстояние между прутками гребенки, мм; d – диаметр прутка, мм; z – диаметр зерновки, мм

Таким образом, выражение для вероятности прохождения до конца решета будет определяться уравнением (10):

$$T = 1 - P_x P_y = 1 - \left(\frac{w-d-z}{w} \right) (1 - e^{-\mu L_{эфф}}), \quad (10)$$

а условие (4) переписывается в виде (11):

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w} \right) (1 - e^{-\mu L_{эфф}}) \right)^N < \delta \quad (11)$$

Выражение (11) было получено без учета возможной вибрации прутков гребенки, которая может влиять на величину просеивания, которая помимо введенных выше геометрических параметров будет являться также и функцией от амплитуды колебаний. Естественным образом амплитуда колебаний при жестком консольном закреплении будет иметь нулевую амплитуду у стенки и максимальную амплитуду ($f(y/L)$) на свободно висящем конце в любой момент времени, что может быть отражено эмпирической зависимостью функции вида (12):

$$Y(y) = f\left(\frac{y}{L}\right) \sin(\omega t), \quad (12)$$

где $Y(y)$ – зависимости колебания от координаты y вдоль прутка со временем t , ω – частота установившихся колебаний. При этом граничные условия на закрепленном конце примут вид (13):

$$Y(y=0) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial}{\partial y} Y(y=0) = 0 \quad (13)$$

Заменим сложную распределенную силу, действующую на прутки некоторой эффективной силой q , пропорциональной массе. Эта сила будет складываться из двух частей: происходящей от нефилтρουемой крупной фракции ($q_{эфф, кр}$) и переменной (убывающей, $q_{эфф, м}(n)$), происходящей от филтρουемой мелкой фракции и являющейся функцией от n – номера гребенки (14):

$$q_{эфф} = q_{эфф, кр} + q_{эфф, м}(n) \quad (14)$$

В предположении, что $q_{эфф, кр} \gg q_{эфф, м}(n)$, можно считать $q_{эфф} \approx q_{эфф, кр}$. Фактически это условие означает, что во всех решетках на одинаковом расстоянии от точки закрепления амплитуда колебаний одинаковая, т.е. функция Y не зависит от номера решетки. При этом функция изгибного момента M_m разложится в ряд по степеням y/L (15):

$$M_m \approx q_{эфф} \left(k_1 \left(\frac{y}{L} \right) + k_2 \left(\frac{y}{L} \right)^2 \right) \sin(\omega t), \quad (15)$$

где k_1 и k_2 – некоторые коэффициенты.

Выражение (15) является более обобщенным аналогом с учетом временного фактора $\sin(\omega t)$ изгибного момента равномерно нагруженной консоли с одним свободным концом.

Двойное интегрирование уравнения (15) по переменной y с граничными условиями (12) приводит к явному виду функции $Y(y)$ (16)

$$EJ \frac{\partial^2}{\partial y^2} Y = M_m \quad (16)$$

где EJ – изгибная жесткость прутка, являющаяся произведением модуля Юнга (E) на момент инерции сечения (J) (для случая кругового сечения $J = \pi d^4/64$):

$$Y(y) = \frac{q_{эфф}}{EJ} \left(\frac{k_1 L^2}{6} \left(\frac{y}{L} \right)^3 + \frac{k_2 L^2}{12} \left(\frac{y}{L} \right)^4 \right) \sin(\omega t), \quad (17)$$

Считая, что вероятность прохождения дополнительно линейно зависит от амплитудной части (не временной) колебания прутков (17), уравнение (6) можно модифицировать следующим образом (18):

$$dM = M \left(-\mu + C \frac{q_{эфф}}{EJ} \left(\frac{k_1 L^2}{6} \left(\frac{y}{L} \right)^3 + \frac{k_2 L^2}{12} \left(\frac{y}{L} \right)^4 \right) \right) dy, \quad (18)$$

где C – некоторый коэффициент пропорциональности, отвечающий за колебательный вклад прутков.

Объединяя эмпирически введенные коэффициенты в более компактную форму, можно написать выражение (19):

$$dM = M \left(-\mu + \frac{1}{EJ} \left(\frac{a L^2}{1} \left(\frac{y}{L} \right)^3 + \frac{b L^2}{2} \left(\frac{y}{L} \right)^4 \right) \right) dy \quad (19)$$

где $a = \frac{C q_{эфф} k_1}{6}$, $b = \frac{C q_{эфф} k_2}{6}$ – коэффициенты, которые подбираются на практике.

Интегрирование выражения (19) приводит к уравнению (20):

$$M = M_0 e^{\left(-\mu y + \frac{a y^4}{4 E J L} + \frac{b y^5}{5 E J L^2} \right)}, \quad \text{где } y \in (0, L) \quad (20)$$

по аналогии при прохождении $L_{эфф} = L - z$ доля непроецируемой мелкой примеси станет равной (21):

$$P_{y,v} = 1 - e^{\left(-\mu(L-z) + \frac{a(L-z)^4}{4 E J L} + \frac{b(L-z)^5}{5 E J L^2} \right)} \quad (21)$$

Таким образом, неравенство (11) преобразуется в (22):

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w} \right) \left(1 - e^{\left(-\mu(L-z) + \frac{a(L-z)^4}{4 E J L} + \frac{b(L-z)^5}{5 E J L^2} \right)} \right) \right)^N < \delta \quad (22)$$

При этом можно отметить, что обратный переход из неравенства (22) в неравенство (11) происходит при стремлении изгибной жесткости к бесконечности.

Следует так же отметить, что, возможно, для описания более сложных случаев более приближенно к практике, будет полезно еще большее расширение формулы, которое могло бы представить условие (22) в виде (23), где фактически выражение под экспонентой представлено разложением в ряд по степеням $(L-z)$ и добавлены два новых эмпирических параметра c_2 и c_3 :

$$\left(1 - \left(\frac{w-d-z}{w} \right) \left(1 - e^{\left(-\mu(L-z) + c_2(L-z)^2 + c_3(L-z)^3 + c_4(L-z)^4 + c_5(L-z)^5 \right)} \right) \right)^N < \delta \quad (23)$$

Условия (10), (21) и (23) содержат соответственно один (μ), три (μ , a , b) и пять (μ , c_2 , c_3 , c_4 , c_5) параметров. Для их нахождения был изготовлен макетный образец гравитационной колонки с одной гребенкой. При изучении просеянной массы (уравнения 7, 19 и 23) установили под гребенкой пять контейнеров с определенной шириной вдоль направления y (24) (рисунок 3).

$$M = M_0 e^{\left(-\mu y + c_2 y^2 + c_3 y^3 + c_4 y^4 + c_5 y^5 \right)} \quad (24)$$

Для проведения опыта использовали макетный образец гравитационной колонки (рисунок 3), в которой устанавливали поочередно гребенки с зазорами между прутками 4 и 6 мм, разных диаметрах сечения прутка (1, 2, 3 мм) при различных углах наклона гребенки (0° , 20° , 40°) и под различной удельной зерновой нагрузкой (2,32; 7,61; 11,95 кг/(см² ч)) пропускали исходный материал.

Далее путем взвешивания на весах того, что собралось в контейнерах под гребенкой определяли массы, составляли системы уравнений, из которых вычисляли методом наименьших квадратов наиболее подходящие эмпирические коэффициенты.



Рисунок 3 – Общий вид макетного образца гравитационной колонки

Figure 3 – General view of the model sample of the gravity column

Заключение. Была разработана вероятностная математическая модель процесса сепарации семян сои в гравитационной колонке и разработан макетный образец гравитационной колонки в котором эмпирическим путём из условия самоочищаемости гребёнок установлено, что при коэффициенте сепарации $\mu = 3,6 \text{ м}^{-1}$, а также вертикальных и горизонтальных коэффициентах функции изгибающего момента при вибрации прутков, равных $a = -30 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, $b = -31,9 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, достигается довольно высокая статистическая корреляция между разработанной математической моделью и экспериментальными значениями с коэффициентом детерминации равным 0,996.

Получены значения величин вертикальных и горизонтальных коэффициентов функции изгибающего момента при вибрации прутков: $\tilde{a} = -0,58 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, $\tilde{b} = -1,47 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, при которых достигается высокая статистическая корреляция между предсказываемым математической моделью и экспериментальными значениями, что подтверждается близким к единице значением скорректированного коэффициента детерминации, равным 0,998.

Conclusions. Empirically, from the self-cleaning condition of the combs, it was found that with a separation coefficient of $\mu = 3.6 \text{ м}^{-1}$, as well as vertical and horizontal coefficients of the bending moment function during vibration of the rods equal to $a = -30 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, $b = -31.9 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, a fairly good statistical correlation is achieved between the developed mathematical model and experimental values with a coefficient of determination equal to 0.996.

The values of the values of the vertical and horizontal coefficients of the bending moment function during the vibration of the rods are obtained: $a = -0.58 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, $b = -1.47 \text{ Па}^{-1}\text{м}^{-1}$, at which a high statistical correlation is achieved between the predicted mathematical model and experimental values, which is confirmed by the value of the adjusted coefficient of determination close to one, equal to 0.998.

Библиографический список

1. Шабалкина Н. А., Суровцева Е. С. Современные тенденции производства сои в мире и России. Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2022. № 12 (94). С. 195-201.
2. 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. № 7. С. 2-6.

3. Лачуга Ю. Ф., Измаилов 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. № 4 (298). С. 2-6.
4. Леканов С. В., Стрикунов Н. И., Куницын Р. А. Совершенствование технологии очистки семян зерновых и технических культур. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 7 (201). С. 110-116.
5. Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A., Bartnik G., Zarajczyk J., Szmigielski M., Dzik D., Wierzbicki S., Krzywonos L. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clear. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). 2020. No 60 (5). P. 1751-1758.
6. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No 327 (4). 042035.
7. Малюков С. В., Князев А. В., Аксенов А. А., Бородин Н. А., Солнцев А. В. Обзор конструкций машин для обескрыливания, очистки и сортировки семян. Воронежский научно-технический Вестник. 2019. Т. 2. № 2 (28). С. 61-72.
8. Хамуев В. Г., Московский М. Н., Лепешкин К. В., Громов К. В. Тенденции развития технических средств очистки и сортирования семян сельскохозяйственных культур. Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 110.
9. Мазитов Н. К., Шогенов Ю. Х., Ценч Ю. С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы. Вестник ВИЭСХ. 2018. N 3 (32). С. 94-100.
10. Загоруйко М. Г., Старостин И. А., Коцарь Ю. А. Автоматизированная система управления технологическим процессом зерноочистительной машины. Аграрный научный журнал. 2020. № 6. С. 93-98.
11. 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. № 2 (50). С. 115-120.
12. Хамуев В. Г., Герасименко С. А. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. № 3. С. 27-32.
13. Шацкий В. П., Оробинский В. И., Попов А. Е. Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4 (47). С. 72-79.
14. Спирина Н. Г., Попов А. Е., Шацкий В. П. О форме решет гравитационных сепараторов. Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 1-4. С. 125-128.

References

1. Shabalkina N. A., Surovtseva E. S. Modern trends in soybean production in the world and Russia. Economics, labor, management in agriculture. 2022. № 12 (94). Pp. 195-201.
2. Izmailov A. Yu., Shogenov Yu. Kh. Intensive machine technologies and new generation equipment for the production of the main groups of agricultural products. Machinery and equipment for the village. 2017. No. 7. Pp. 2-6.
3. Lachuga Yu. F., Izmailov A. Yu., Lobachevsky Ya. P., Shogenov Yu. Kh. Results of scientific research of agroengineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture (graduation). Machinery and equipment for the village. 2022. N 4 (298). Pp. 2-6.
4. 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. No. 7 (201). Pp. 110-116.
5. Krzysiak Z., Samociuk W., Skic A., Bartnik G., Zarajczyk J., Szmigielski M., Dzik D., Wierzbicki S., Krzywonos L. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary clea. Transactions of the ASABE (American Society of Agri-cultural and Biological Engineers). 2020. No. 60 (5). Pp. 1751-1758.
6. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 327 (4). 042035.

7. Malyukov S. V., Knyazev A. V., Aksenov A. A., Borodin N. A., Solntsev A. V. Design review of machines for de-spraying, cleaning and sorting of seeds. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2019. Vol. 2. No. 2 (28). Pp. 61-72.

8. Khamuev V. G., Moskovsky M. N., Lepeshkin K. V., Gromov K. V. Trends in the development of technical means for cleaning and sorting seeds of agricultural crops. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018. No. 4 (51). Pp. 110.

9. Mazitov N. K., Shogenov Yu. K., Tsench Yu. S. Agricultural machinery: solutions and prospects. *Bulletin of RESH*. 2018. N 3 (32). Pp. 94-100.

10. Zagoruiko M. G., Starostin I. A., Kotsar Yu. A. Automated process control system of a grain cleaning machine. *Agrarian Scientific journal*. 2020. No. 6. Pp. 93-98.

11. Kabashov V. Yu., Tuktarov M. F., Baynazarov V. G. Experimental study of a grain cleaning machine with a longitudinal-transverse oscillation sieve mill. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2019. No. 2 (50). Pp. 115-120.

12. Khamuev V. G., Gerasimenko S. A. Substantiation of the design and layout scheme of the gravity-pneumatic soybean seed cleaner. *Agricultural machines and technologies*. 2022. Vol. 16. No. 3. Pp. 27-32.

13. Shatsky V. P., Orobinsky V. I., Popov A. E. Modeling of grain flow motion in a gravity separator *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2015. No. 4 (47). Pp. 72-79.

14. 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. No. 1-4. Pp. 125-128.

Информация об авторах

Хамуев Виктор Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (Российская Федерация, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail.ru: victor250476@yandex.ru

Герасименко Станислав Александрович, младший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (Российская Федерация, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail.ru: stanislav.mkm@gmail.com

Author's Information

Khamuev Victor Gennadievich, Ph.D. in engineering science, leading researcher "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" (Russian Federation, 109428, Moscow, 1st Institutskiy proezd, 5), e-mail: victor250476@yandex.ru

Gerasimenko Stanislav Aleksandrovich, Junior researcher, "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" (Russian Federation, 109428, Moscow, 1st Institutskiy proezd, 5), e-mail: stanislav.mkm@gmail.com

DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-57

INVESTIGATION OF PHYSIC-CHEMICAL PARAMETERS OF VEGETABLE OILS AFTER DEODORIZATION

A. B. Dalabayev¹, A. B. Sarshaeva²

¹*Astana branch of LLP «Kazakh research institute of processing and food industry»
Astana, Kazakhstan*

²*Taraz Regional University named after M. Kh. Dulaty
Taraz, Kazakhstan*

Corresponding author E-mail: dalabaev_askhat@mail.ru

Received 15.05.2023

Submitted 30.11.2023

The research was carried out within the framework of the scientific and technical program of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan for 2021-2023 BR10764977 "Development of modern technologies for the production of dietary supplements, enzymes, starter cultures, starch, oils, etc. in order to ensure the development of the food industry"

Summary

As part of the study, the physicochemical parameters of several vegetable oils, including sunflower, rapeseed, corn and palm oils, were analyzed. The results of the study indicate that exposure to light have the greatest effect on increasing the values of the peroxide number. This primarily applies to