

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕМЯН КУКУРУЗЫ DENGHAI 618

Д. А. МИХЕЕВ, ЧЖАН ЮН

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 15.10.2025)

Повышение урожайности кукурузы является приоритетным направлением в развитии сельского хозяйства. Одним из эффективных способов увеличения урожайности кукурузы является проведение предпосевной обработки семян методом дражирования. Для повышения эффективности исследования механизма дражирования семян кукурузы и оптимизации производительности оборудования для дражирования семян была предложена концепция метода дискретных элементов (DEM). Для проведения метода дискретных элементов и дальнейшего моделирования процесса создания искусственных оболочек на семенах кукурузы необходимо определить физико-механические свойства семян. В результате научных исследований были исследованы семена кукурузы сорта Denghai 618, этот сорт имеет наибольшее распространение в регионе Хэтао Внутренней Монголии, Китай. Были изучены и использованы методики определения физико-механических свойств семян. В результате исследований были определены геометрические размеры и форма семян сорта Denghai 618, также была определена плотность семян, коэффициенты трения и коэффициент восстановления семян. Результаты научных исследований показывают, что среди семян кукурузы сорта Denghai 618 форма конского зуба составляет наибольшую долю, достигая 79,5%; плотность семян составляет $1,2952 \text{ г}/\text{см}^3$; коэффициент трения покоя между семенами составляет 0,5802, коэффициент динамического трения между семенами 0,2797, коэффициент трения покоя между семенами и стальной пластиной составляет 0,4903, динамический коэффициент трения между семенами и стальной пластиной составляет 0,2942; коэффициент восстановления нормальной реакции после столкновения между семенами составляет 0,2818, а коэффициент восстановления после столкновения семян со стальной пластиной составляет 0,7275. Определенные физико-механические показатели семян являются вводными параметрами для использования дискретно-элементного численного моделирования частиц.

Ключевые слова: семена кукурузы, дискретный элемент, форма семян, коэффициент трения, коэффициент восстановления.

Increasing corn yields is a priority in agricultural development. One effective way to increase corn yields is pre-sowing seed treatment using pelleting. To improve the efficiency of studying the corn seed pelleting mechanism and optimize the performance of seed pelleting equipment, the concept of the discrete element method (DEM) was proposed. To implement the discrete element method and further model the process of creating artificial seed coats, it is necessary to determine the physicomechanical properties of the seeds. The research involved studying the Denghai 618 corn variety, which is most widely grown in the Hetao region of Inner Mongolia, China. Methods for determining the physicomechanical properties of the seeds were explored and applied. As a result of the research, the geometric dimensions and shape of Denghai 618 seeds were determined, as well as the seed density, friction coefficients and seed recovery coefficient. The results of scientific research show that among the Denghai 618 corn seeds, the horsetooth shape accounts for the largest proportion, reaching 79.5 %; the seed density is $1.2952 \text{ g}/\text{cm}^3$; the static friction coefficient between seeds is 0.5802, the dynamic friction coefficient between seeds is 0.2797, the static friction coefficient between seeds and a steel plate is 0.4903, and the dynamic friction coefficient between seeds and a steel plate is 0.2942; the recovery coefficient of the normal reaction after collision between seeds is 0.2818, and the recovery coefficient after collision of seeds with a steel plate is 0.7275. The determined physical and mechanical properties of seeds are input parameters for using discrete element numerical modeling of particles.

Key words: corn seeds, discrete element, seed shape, friction coefficient, recovery coefficient.

Введение

Кукуруза – это одна из важнейших сельскохозяйственных культур, занимающая третье место в мире по посевной площади после пшеницы и риса. Значимость кукурузы заключается в разных направлениях использования зерна и зеленой массы.

Зерно используется на продовольственные, кормовые и технические цели. В пищевой промышленности кукурузное зерно является сырьем для производства крупы, муки, масла, крахмала, спирта. Зерно сахарного подвида кукурузы употребляется в пищу в вареном и консервированном виде.

Кукурузу можно считать и технической культурой, в связи с использованием зерна на технические цели. Кукурузный крахмал используется в бумажной, химической и фармацевтической промышленности. Доля кукурузы в мировом производстве крахмала составляет около 75 %.

С ростом цен на энергоресурсы возрос интерес к использованию зерна кукурузы для производства биотоплива. Выход биоэтанола из кукурузного зерна выше, чем у других культур.

Кукурузное зерно отличается высокими кормовыми достоинствами. Как высокоэнергетический корм, зерно кукурузы пригодно для кормления всех видов животных и птицы. Оно является неотъемлемой частью комбикормов. Кукуруза – лучшая силосная культура, так как отличается благоприятным соотношением питательных веществ и хорошо силосуется.

Кукуруза имеет большое агрономическое и экологическое значение. Выращиваемая на зерно, она является хорошим предшественником для многих культур, раннеспелые гибриды – для озимой пшеницы [1].

Повышение урожайности такой значимой сельскохозяйственной культуры является приоритетным направлением развития сельского хозяйства.

Одним из путей увеличения урожайности кукурузы является проведение предпосевной обработки семян методом дражирования.

В процессе дражирования семена смешиваются друг с другом и с компонентами искусственной оболочки (сухим порошком), а также взаимодействуют с элементами камеры смешивания дражирователя [2]. Анализ процесса создания искусственной оболочки на семенах является достаточно сложными. В прошлом большинство исследований процесса контакта и столкновения семян в процессе дражирования проводились экспериментальными методами, а структурные параметры и воздействие элементов оборудования оптимизировались с помощью экспериментальной теории оптимизации проектирования, оптимизация рабочих параметров. Однако экспериментальный процесс слишком сложен, трудоемок и дорог, что в определенной степени ограничивает его широкое применение и следовательно, сдерживает исследования механизма дражирования семян.

С развитием компьютерных технологий вышеуказанные проблемы могут быть решены путем использования метода дискретных элементов (DEM) для анализа контакта частиц с механическими деталями [3].

Объектом исследования метода дискретных элементов является большие наборы частиц, такие как гранулированные среды, сыпучие материалы и молекулы, а также их движение, взаимодействие и деформации. Это метод, который упрощает группу частиц в набор частиц с определенной формой и массой и рассчитывает контакт между частицами [4]. В настоящее время метод дискретных элементов стал общим методом анализа контакта между частицами и связанными с ними механическими компонентами. Он широко используется в области сельскохозяйственного машиностроения [5–10].

На основе теории анализа дискретных элементов [11] было разработано программное обеспечение для анализа дискретных элементов EDEM, которое в дальнейшем использовалось для проведения моделирования процесса дражирования семян кукурузы. Моделирование позволяет выявить кинематические и динамические характеристики семян, а также определить взаимосвязь и механизм смешивания семян и сухого порошка в процессе создания искусственной оболочки. В результате моделирования можно улучшить процесс создания искусственной оболочки на семенах путем оптимирования параметров оборудования.

В моделировании дискретных элементов физические параметры частиц и параметры контакта между частицами являются предпосылками для численного моделирования.

Цель исследования – определение физико-механических свойств семян кукурузы сорта Denghai 618 для дальнейшего использования полученных данных в моделировании процесса движения семян с использование метода дискретных элементов (DEM).

Основная часть

В статье рассмотрены экспериментальные методы исследования физико-механических свойств семян кукурузы сорта Denghai 618, с целью получения входных данных для проведения метода дискретных элементов и дальнейшего моделирования процесса создания искусственной оболочки на семенах.

В качестве объекта исследования был выбран сорт семян кукурузы Denghai 618, имеющий наибольшую распространенность в регионе Хэтао Внутренней Монголии, Китай.

Были проведены экспериментальные исследования по определению: параметров формы семян, плотности, коэффициента трения, коэффициента восстановления. Результаты физических испытаний использовались в качестве основы для выбора диапазона параметров в моделировании, предоставляя теоретическую основу для использования теории и методов дискретных элементов для анализа динамических и кинематических характеристик семян кукурузы в процессе дражирования, механизме создания искусственной оболочки, скорости создания искусственной оболочки и т. д.

Определение формы семян кукурузы

Случайным образом было отобрано 200 семян кукурузы сорта Denghai 618. Проанализированы геометрические параметры их формы и подсчитана доля семян каждой формы. Результаты исследований показали, что форму семян можно представить пятью разновидностями: форма зуба лошади, форма треугольной призмы, форма эллипсоидного конуса, сферическая форма и неправильная форма [12].

Среди характеристик семян, относящихся к форме зуба лошади, следует выделить четыре ребра сбоку, в основном семена соответствуют форме зуба лошади, а вид снизу прямоугольный (рис. 1 а). К характеристикам семян в форме треугольной призмы относятся: три ребра сбоку, вид снизу в фор-

ме треугольника, а общая форма похожа на треугольную призму (рис. 1 b). К характеристикам семян в форме эллипсовидного конуса можно отнести следующее: нет никаких ребер сбоку, вид снизу эллипсоидный (рис.1 c). Сферические семена имеют полную форму похожую на шар (рис.1 d). Неправильные семена не имеют фиксированной формы (рис.1 e).

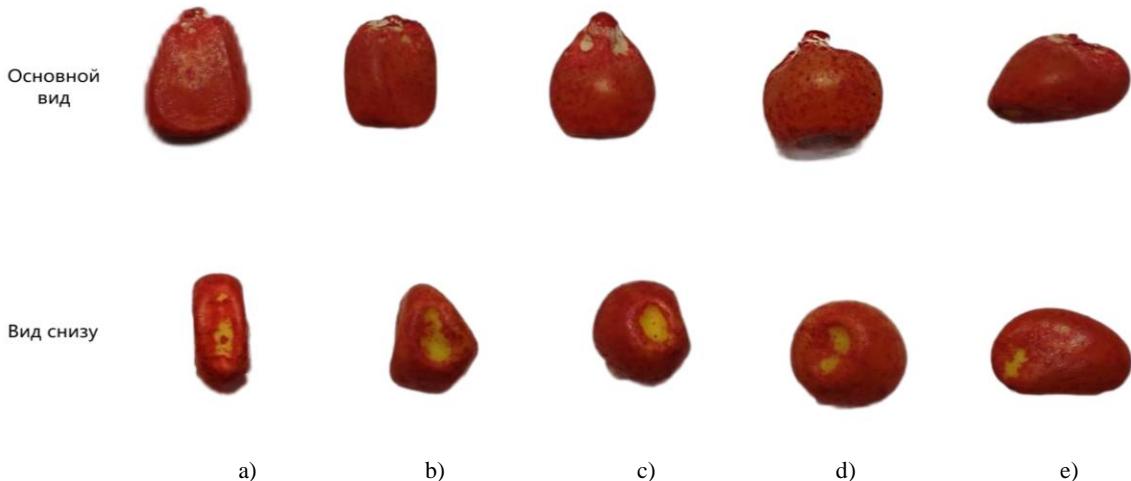


Рис. 1. Классификация форм семян кукурузы:

- a) форма зуба лошади; b) форма треугольной призмы; c) форма эллипсоидального конуса; d) сферическая форма;
- e) неправильная форма

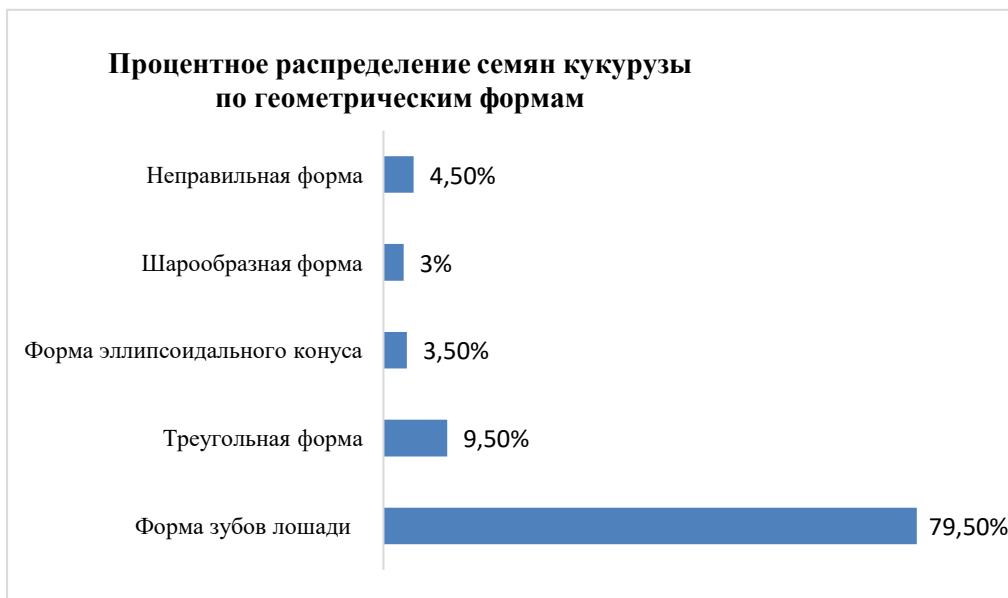


Рис. 2. Распределение семян кукурузы по геометрическим формам

Определение характерных размеров семян кукурузы

Для моделирования движения семян кукурузы необходимо определить их характерные размеры [12]. Для семян кукурузы в форме зуба лошади, форме треугольной призмы и семян кукурузы в форме эллипсоидного конуса самая широкая часть семенной частицы определяется как характерный размер W_2 , ширина семени, где кривизна переднего профиля семенной частицы существенно изменяется в точке поворота, определяется как характерный размер W_1 , самая толстая часть семенной частицы определяется как характерный размер T_2 , ширина в положении, где кривизна бокового профиля семенной частицы существенно изменяется в точке поворота, определяется как характерный размер T_1 , а общая высота семенной частицы определяется как характерный размер H (рис. 3). Для сферических семян кукурузы самая широкая часть семенной частицы определяется как характерный размер W , самая толстая часть семенной частицы определяется как характерный размер T , а общая высота семенной частицы определяется как H (рис. 3).

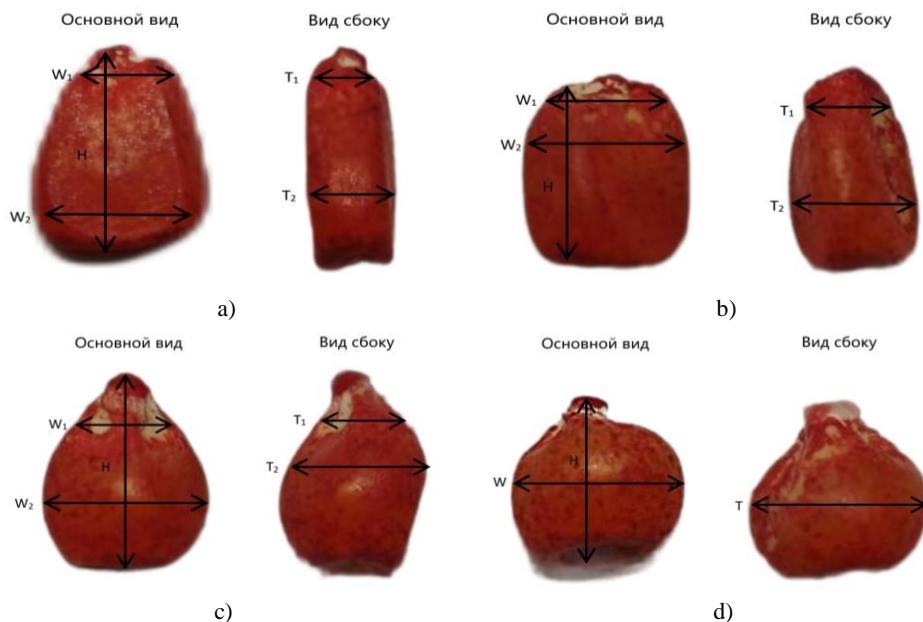


Рис. 3. Схематическая диаграмма характерных размеров четырех форм семян кукурузы:
а) форма зуба лошади; б) форма треугольной призмы; в) форма эллипсоидального конуса;
г) сферическая форма

Перед замером отбирали случайным образом по 100 семян каждой формы, далее размеры измеряли с помощью штангенциркуля с точностью 0,02 мм. Результаты измерений приведены в табл. 1. Замеры семян неправильной формы не производили.

Таблица 1. Средние значения характерных размеров семян различной формы

Форма	Среднее значение характерных размеров (мм)				
	W ₁	W ₂ (W)	H	T ₁	T ₂ (T)
Форма зуба лошади	6,39	8,3	11,93	4,77	5,26
Форма треугольной призмы	5,75	7,85	11,58	4,83	6,26
Форма эллипсоидального конуса	5,77	8,25	10,43	5,98	6,52
Сферическая форма		7,94	8,99		7,57

Измерение плотности семян кукурузы

Плотность семян является одним из важных параметров для создания модели частиц дискретных элементов семян. Было случайным образом выбрано пять групп семян, по 20 семян в каждой группе. Плотность каждой группы семян измерялась с помощью многофункционального твердо-жидкостного измерительного прибора DH-300X (точность 0,001 гр/см³), и было взято среднее значение. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения плотности семян кукурузы (0,001 гр/см³)

Группа	1	2	3	4	5
Плотность	1,288	1,3	1,275	1,32	1,293
Среднее значение	1,2952				

Измерение коэффициента трения семян кукурузы

В процессе дражирования семян кукурузы между семенами, а также между семенами и стальными элементами камеры смешивания происходят различные столкновения и взаимодействия в результате чего возникающая сила трения будет значительно влиять на процесс движения семян. Чтобы повысить точность анализа численного моделирования дискретных элементов, необходимо измерить коэффициент трения покоя и динамического трения. Для измерения использовался динамический тестер коэффициента трения ST-MXZ-1.

Пластина для семян и стальная пластина были помещены на платформу прибора соответственно, а другая пластина для семян была прикреплена к ползунку. Расстояние перемещения было установлено на 40 мм, и прибор был включен для записи данных. Тест был повторен 6 раз, и было взято среднее значение. Процесс измерения показан на рис. 4–6, а результаты измерений приведены в табл. 3.

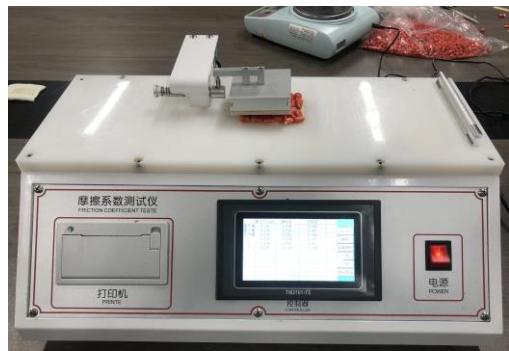


Рис. 4. Тестер динамического коэффициента трения ST-MXZ-1



Рис. 5. Пластина для семян кукурузы

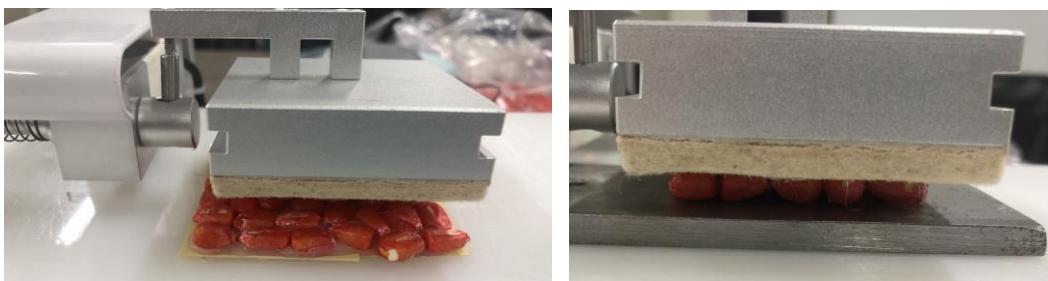


Рис. 6. Измерение коэффициента трения семян кукурузы:
а) семена и семена; б) семена и стальная пластина

Таблица 3. Значения коэффициента трения семян кукурузы

Гру ппа	Семена и семена						Семена и стальные пластины					
	Коэффициент трения покоя			Коэффициент динамического трения			Коэффициент трения покоя			Коэффициент динамического трения		
	Тестовое значение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Тестовое значение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Тестовое значение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Тестовое значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	0,476	0,5802	0,08155	0,166	0,2797	0,08864	0,441	0,4903	0,04047	0,287	0,2942	0,01466
2	0,546			0,213			0,439			0,272		
3	0,682			0,359			0,479			0,321		
4	0,486			0,198			0,529			0,297		
5	0,653			0,379			0,539			0,297		
6	0,638			0,363			0,518			0,291		

Измерение коэффициента восстановления нормальной реакции после столкновения семян кукурузы.
Коэффициент восстановления нормальной реакции – это физическая величина, характеризующая степень сохранения нормальной (перпендикулярной поверхности) составляющей скорости частицы после удара, и определяется как отношение модуля нормальной составляющей скорости после удара к модулю нормальной составляющей скорости до удара [13, 14].

$$\varepsilon = \frac{v'_1}{v_1}, \quad (1)$$

где: ε – коэффициент восстановления после столкновения; v'_1 – скорость объекта 1 после столкновения, м/с; v_1 – скорость объекта 1 до столкновения, м/с.

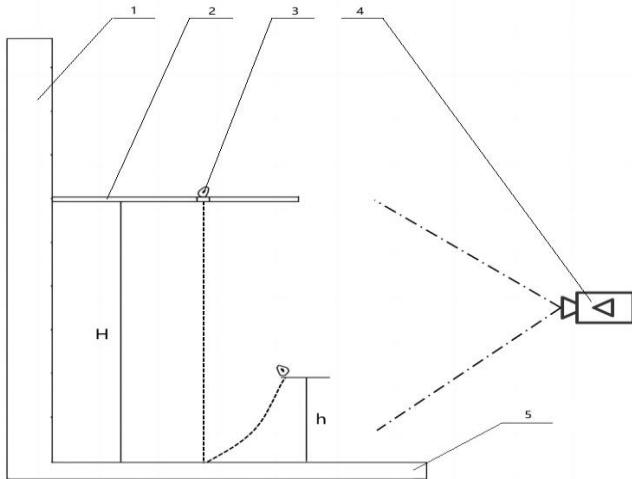


Рис. 7. Принципиальная схема установки определения коэффициента восстановления семян:
1) рама; 2) держатель семян; 3) семена кукурузы; 4) высокоскоростная камера; 5) опорное основание
Примечание: H – высота падения семян (мм); h – высота отскока семян (мм)

Если семена свободно падают и сталкиваются с семенами или стальной пластиной на опорном основании, семена будут отскакивать после столкновения на высоту h . Во время свободного падения и подъема семян работает только сила тяжести самих семян, а семена или стальная пластина на опорном основании не движутся в течение всего процесса. В это время, $v_1 = \sqrt{2gH}$, $v'_1 = \sqrt{2gh}$, тогда расчет коэффициента восстановления столкновения можно упростить следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{v'_1}{v_1} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}, \quad (2)$$

где: g – ускорение силы тяжести м/с²; H – Высота падения м; h – Высота отскока м.

Подготовленную семенную пластину и стальную пластину поочередно помещали на опорное основание. Семена кукурузы свободно падали с фиксированной высоты 0,3 м, сталкивались с семенной пластиной и стальной пластиной соответственно. Для сбора видео и фотографий падения семян использовалась высокоскоростная система камер.

Коэффициенты восстановления при столкновении семян с семенами, а также между семенами и стальной пластиной были рассчитаны соответственно. Испытание было повторено 10 раз, после чего было определено среднее значение. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты определения коэффициента восстановления семян кукурузы

Группа	Семена с семенами				Семена и стальная пластина			
	Высота отскока, мм	Коэффициент восстановления при столкновении	Среднее значение	Стандартное отклонение	Высота отскока, мм	Коэффициент восстановления при столкновении	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	28	0,3055	0,2818	0,01587	163	0,7141	0,7275	0,0074
2	19	0,2517			159	0,728		
3	22	0,2708			161	0,7326		
4	25	0,2887			155	0,7188		
5	27	0,3			158	0,7257		
6	23	0,2769			156	0,7211		
7	26	0,2944			161	0,7326		
8	21	0,2646			164	0,7394		
9	23	0,2769			159	0,728		
10	25	0,2887			162	0,7348		

Заключение

В статье представлены результаты исследований семян кукурузы сорта Denghai 618, наиболее распространенного сорта в Хэтао Внутренней Монголии, Китай. Были определены характерные размеры семян различных форм, а также их физические и механические свойства.

Форма семян кукурузы сорта Denghai 618 представлена пятью формами: форма конского зуба, форма треугольной призмы, форма эллипсоидного конуса, сферическая форма и неправильная форма.

Плотность семян измерялась с помощью многофункционального твердо-жидкостного двойного измерительного прибора плотности DH-300X, плотность составила 1,2952 г/см³.

Коэффициент статического трения и коэффициент динамического трения между семенами кукурузы и стальной пластиной измерялись с помощью динамического тестера коэффициента трения ST-MXZ-1. Были получены следующие значения: статический коэффициент трения между семенами составил 0,5802, динамический коэффициент трения составил 0,2797, статический коэффициент трения между семенами и стальной пластиной составил 0,4903, динамический коэффициент трения составил 0,2942.

Коэффициент восстановления нормальной реакции после столкновения между семенами кукурузы и стальной пластиной измерялся с помощью испытания на падение при помощи лабораторной установки. Были получены следующие значения: коэффициент восстановления после столкновения между семенами составил 0,2818, а коэффициент восстановления после столкновения между семенами и стальной пластиной составил 0,7275.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агро Эксперт Групп. Кукуруза [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://agroex.ru/culture/kukuruza> (дата обращения: 19.09.2025).
2. Михеев, Д. А. Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем: монография / Д. А. Михеев; под ред. Д. А. Михеева. – Горки, 2017. – 180 с.
3. Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies// geotechnique. – 1979. – № 29(1). – С. 47–65.
4. Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P. The physics of granular materials// Physics today. – 1996. – № 49(4). – С. 32–38.
5. Ghodki B M, Patel M, Namdeo R, et al. Calibration of discrete element model parameters: Soybeans// Computational Particle Mechanics. – 2019. – № 6 – С. 3–10.
6. Horabik J, Wiącek J, Parafiniuk P, et al. Calibration of discrete-element-method model parameters of bulk wheat for storage// Biosystems Engineering. – 2020. – № 200 – С. 298–314.
7. Ucgul M, Fielke J M, Saunders C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling// Information Processing in Agriculture. – 2015. – № 2(2) – С. 130–141.
8. Santos K G, Campos A V P, Oliveira O S, et al. DEM simulations of dynamic angle of repose of acerola residue: A parametric study using a response surface technique// Blucher Chemical Engineering Proceedings. – 2015. – № 1(2) – С. 11326–11333.
9. Калибровка и эксперимент с параметрами моделирования семян Panax notoginseng на основе дискретного элемента / Юй Цинсяй, Лю Янь, Чэн Сяобин [и др.] // Труды Китайского общества сельскохозяйственной техники. – 2020. – № 51(02) –С. 123–132.
10. Определение физических свойств семян пырея и калибровка параметров моделирования дискретных элементов / Хоу Чжаньфэн, Дай Нянъцзу, Чэн Чжи [и др.] // Труды Китайского общества сельскохозяйственной инженерии. – 2020. – № 36(24). – С. 46–54.
11. Исследование механизма смешивания бинарной системы частиц с неоднородным размером частиц в барабане / Чжао Юнчжи, Чжан Сяньци, Лю Яньлэй [и др.] // Acta Physica Sinica. – 2009. – № 58(12). – С. 8386–8393.
12. Чжоу Лун. Имитационный анализ и экспериментальное исследование моделирования семян кукурузы и процесса посева на основе метода дискретных элементов / Чжоу Лун. – Университет Цзилинь: Чанчунь, 2021.
13. Определение и анализ коэффициента восстановления в модели столкновения стручков арахиса / Лу Юнгуан, У Ну, Ван Бин [и др.] // Журнал Китайского сельскохозяйственного университета. – 2016. – № 8. – С. 111–118.
14. Гэ Тэн. Теоретическая модель для расчета коэффициента восстановления точечного контактного столкновения / Гэ Тэн, Цзя Чжихун, Чжоу Кэдун // Mechanical Design and Research. – 2007. – № 3 – С. 14–15, 22.