

DOI

УДК 631.3:004.942

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЕМЯН ГОРОХА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов, В. А. Подолякин, Р. Р. Насыров

Реферат. Неотъемлемой частью технологических операций в сельском хозяйстве при посеве, уборке, транспортировке и послеуборочной переработке является воздействие рабочих органов машин на семена сельскохозяйственных культур. Для повышения эффективности работы машин и снижения травмируемости семян необходимо совершенствовать конструктивно-технологические параметры рабочих органов. В настоящее время наиболее перспективным методом при теоретическом обосновании параметров машин, работающих с семенами, и совершенствовании их конструкции является моделирование методом дискретных элементов. Исследование проводится с целью обоснования параметров контактной модели дискретных элементов при моделировании семян гороха. Обоснование параметров контактной модели проводилось по результатам тестирования по углу откоса и свода при высыпании семян. Для анализа угла естественного откоса и свода использовали прозрачный прямоугольный контейнер, при высыпании семян из верхней части которого оставшиеся семена образуют угол свода, а осыпавшиеся – угол откоса. Оценка коэффициентов уравнений регрессии изменения углов свода и откоса при осыпании семян в контейнере от параметров выбранной контактной линейной вязкоупругой модели позволили установить значимый параметр – коэффициент динамического трения между частицами. Характер изменения угла естественного откоса семян гороха от влажности идентичен изменению данного угла для частиц, смоделированных методом дискретных элементов, при коэффициенте их восстановления $\nu=0,2$ и коэффициенте динамического трения между ними $f_d=0,15\dots0,17$. Полученные в ходе реализации экспериментов зависимости угла естественного откоса от влажности семян гороха и коэффициента динамического трения между частицами представляют из себя номограмму выбора коэффициента динамического трения между частицами f_d для контактной линейной вязкоупругой модели в зависимости от влажности семян гороха при моделировании методом дискретных элементов.

Ключевые слова: моделирование, метод дискретных элементов, калибровка, угол естественного откоса, контактная модель, семена гороха.

Введение. В процессе разработки и совершенствования высевальных систем и рабочих органов посевных комплексов и сеялок необходимо учитывать взаимодействие семян сельскохозяйственных культур с элементами конструкции машин, а также процессы их перемещения и движения при высевае. Из существующих методов аналитического, экспериментального описания и моделирования таких процессов наиболее перспективно использование метода дискретных элементов [1, 2, 3]. Для его корректного использования необходимо подобрать контактную модель и обосновать параметры такой модели. Это в первую очередь обусловлено тем, что применение контактных моделей для семян сельскохозяйственных культур сталкивается с серьезными ограничениями, связанными с несферичностью их формы, большой деформируемостью и сильной зависимостью механических свойств от содержания влаги [1].

При моделировании поведения семян используют следующие модели контакта: модель Герца-Миндлина [2, 3], упругопластическая контактная модель [4, 5], линейная вязкоупругая модель [6], модель адгезионного контакта Джонсона-Кеннеди-Кларка (JKR) [7], модель касательной жесткости [8]. Например, Van Zeebroeck и др. [6] установили, что для моделирования сухих семян рапса лучшее приближение дает упругопластическая модель, влажных – линейная вязкоупругая модель.

Параметры материалов, необходимые для моделирования методом дискретных элементов, можно разделить на две основные категории: свойства материала и свойства взаимодействия [9]. К свойствам материала относят форму, размеры, плотность, модуль упругости и сдвига, коэффициент Пуассона и предел текучести, к свойствам взаимодействия – коэффициенты восстановления, статического трения и трения качения, пластического или вязкого демпфирования и адгезии.

Для достижения адекватных результатов от моделей, разработанных с использованием метода дискретных элементов, необходимо проведение калибровки перечисленных параметров. Во многих исследованиях с этой целью применяют метод калибровки параметров выбранных контактных моделей путем сопоставления результатов моделирования и физических экспериментов на идентичных экспериментальных установках [1, 2].

При моделировании методом дискретных элементов могут учитываться такие свойства модельных частиц, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициенты статического и динамического трения, поверхностная энергия, форма частиц, распределение по размерам, коэффициент восстановления и другие [1, 10]. В связи с тем, что механические свойства материалов биологического происхождения зависят от содержания влаги [1] при калибровке модельных частиц в виде семян сельскохозяйственных культур

необходимо учитывать их влажность.

Калибровку параметров контактной модели при использовании семян, представляющих собой сферы, эллипсоиды и многогранники, можно проводить по углу обрушения и углу естественного откоса [11, 12].

Результаты анализа исследований в области использования метода дискретных элементов для моделирования семян свидетельствуют, что для калибровки параметров контактных моделей используют в основном эксперименты на обрушение объема семян в замкнутом контейнере, при которых сопоставляются углы обрушения и откоса [3, 11, 13], и эксперименты по сопоставлению угла естественного откоса [14, 15].

Несмотря на многочисленность исследований с использованием метода дискретных элементов для моделирования семян до сих пор нет единого мнения о параметрах контактных моделей и правильном выборе самих моделей взаимодействий, основанных на глубоком понимании главных механизмов поведения сельскохозяйственных материалов.

Цель исследования – оценка значимости параметров контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов.

Для ее достижения решали следующие задачи: разработка методики и проведение натуральных и модельных экспериментов для калибровки параметров контактной модели;

оценка значимости свойств материала и свойств взаимодействия для выбранной контактной модели; разработка номограммы выбора параметра контактной модели в зависимости от физико-механических свойств семян гороха.

Условия, материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовали семена гороха сорта Аксайский усатый 7, наиболее распространенные в Республике Башкортостан.

Исследования по оценке значимости параметров, определяющих свойства материала и свойства взаимодействия семян контактной модели, проводили в виртуальном контейнере по углу свода j_1 и углу естественного откоса j_2 семян (рис. 1). Контейнер представлял из себя прозрачный прямоугольный ящик 1 размерами 340x80x330 мм, внутри которого на высоте 170 мм на направляющих 3 установлены две подвижные пластины 2. В начале экспериментов в верхнюю часть контейнера при закрытых пластинах насыпали семена, после чего их открывали в обе стороны на 50 мм. Высыпавшиеся семена образовывали на дне контейнера треугольную призму с боковыми сторонами под некоторым углом к основанию, который определяет угол откоса j_2 . Оставшиеся семена на верхних двух пластинах образовывали две треугольные призмы с углом при основании, определяющим угол свода j_1 .

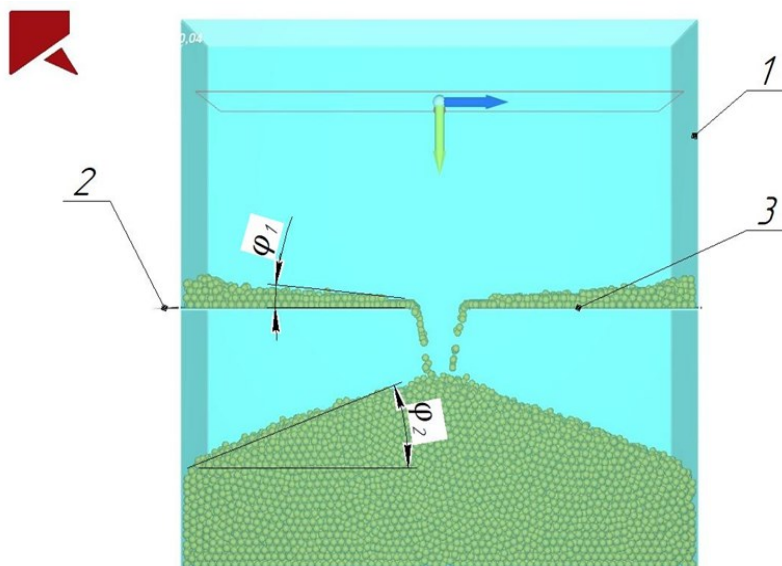


Рис. 1 – Контейнер для определения угла свода и угла откоса семян: 1 – контейнер; 2 – пластина подвижная; 3 – направляющие

Трехмерная модель контейнера с заданными размерами спроектирована в программе КОМПАС 3D, которую для проведения экспериментов импортировали в программу Rocky DEM.

Угол естественного откоса определяли на приборе (рис. 2а), включающем конусообразную воронку 1 и круглое основание 2 со стержнем, на который нанесена измерительная шкала 3. Перед началом экспериментов

воронку устанавливали на основание и засыпали семена.

Затем ее медленно поднимали, и семена высыпались на основание, образуя конус, угол которого определяли по шкале приспособления как отношение высоты конуса к радиусу основания. Для модельных экспериментов в программе Rocky DEM была спроектирована трехмерная модель этого прибора в КОМПАС 3D (рис. 2б).

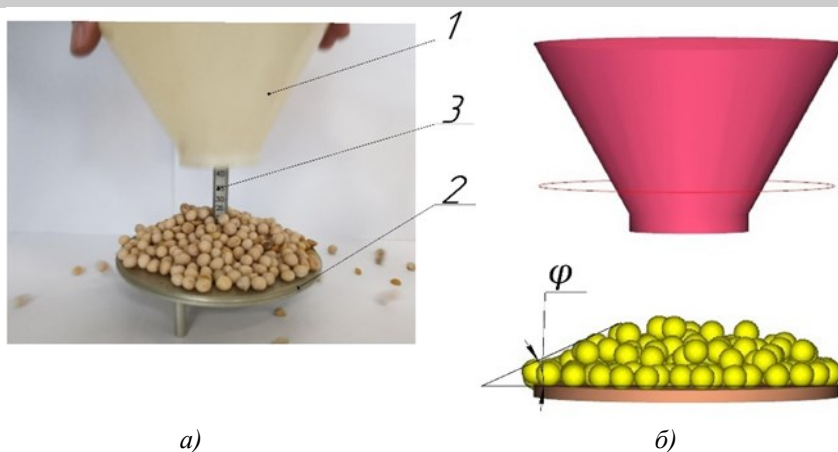


Рис. 2 – Фрагменты проведения натуральных (а) и модельных (б) экспериментов по определению угла естественного откоса

По результатам анализа доступной литературы в качестве контактной модели для моделирования семян гороха с учетом изменения их влажности была выбрана линейная

вязкоупругая модель (Linear Spring Dashpot), которая описывается реологической моделью с параллельной связью упругой пружины Гука и вязкого демпфера Ньютона (рис. 3).

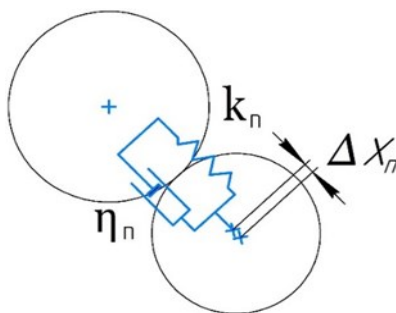


Рис. 3 – Контактная модель линейной вязкоупругой модели.

k_n – жесткость пружины; η_n – коэффициент демпфирования; Δx_n – степень перекрытия

Для этой модели составляющую контактную силу определяет сумма сил, действующих на пружину и демпфер:

$$F_n = k_n \Delta x_n^{3/2} + c \Delta x_n^\beta V_n,$$

где k_n – жесткость пружины Н/м, c – параметр демпфирования, β – показатель степени перекрытия Δx_n , а V_n – относительная скорость в нормальном направлении, м/с.

Первое слагаемое этого выражения – нормальная сила, действующая между двумя совершенно упругими сферами согласно теории Герца, второе – нелинейный вязкий

диссипативный член.

Разнообразие свойств семян сельскохозяйственных культур требует соответствующего выбора и корректировки механизмов рассеивания энергии для каждого конкретного случая путем калибровки.

При обосновании параметров контактной модели в связи с большим количеством факторов для сокращения числа экспериментов параметры, трудноопределимые экспериментальным путем, необходимо подбирать путем калибровки, а остальные определять путем прямых физических экспериментов и измерений.

Таблица 1 – Параметры контактной модели

№ п/п	Параметр	Показатель
1	Модуль Юнга E , Па	$1,8 \dots 2 \times 10^8$
2	Коэффициент Пуассона ν	$0,2 \dots 0,25$
3	Коэффициент статического трения частиц f_{st}	$0,4 \dots 0,55$
4	Коэффициент динамического трения частиц f_d	$0,1 \dots 0,25$
5	Коэффициент восстановления k_{vost}	$0,25 \dots 0,35$
6	Диаметр частиц d , мм	5 (на основе собственных замеров)
7	Коэффициент статического трения частиц о материал контейнера $f_{st,k}$	$0,25 \dots 0,35$ (на основе собственных замеров)
8	Коэффициент динамического трения частиц о материал контейнера $f_{d,k}$	$0,07 \dots 0,1$

В нашем случае модуль Юнга E и коэффициент динамического трения частиц о материал контейнера $f_{d,k}$ приняты на основе экспериментальных данных [13] и справочника [16], а диаметр частиц d и коэффициент статического трения частиц о материал контейнера f_{st} определены экспериментальным путем. Коэффициент статического трения семян гороха о материал контейнера из оргстекла измеряли на приборе для определения трения

покоя, а диаметр – микрометром, по результатам которых получены усреднённые показатели (табл. 1).

Таким образом для калибровки остались 4 параметра – коэффициент Пуассона ν , коэффициенты статического и динамического трения гороха о горох (соответственно f_{st} и f_d), коэффициент восстановления семян $k_{вос}$, которые были приняты в качестве факторов экспериментов.

Таблица 2 – Условия проведения экспериментов

Характеристика плана	$X_1 - f_{st}$ (статический коэффициент трения)	$X_2 - f_d$ (динамический коэффициент трения)	$X_3 - \nu$ (коэффициент Пуассона)	$X_4 - k_{вос}$ (коэффициент восстановления)
Нулевой уровень	0,475	0,175	0,3	0,3
Интервал варьирования	0,075	0,075	0,05	0,05
Верхний уровень	0,55	0,25	0,35	0,35
Нижний уровень	0,4	0,1	0,25	0,25

Для определения значимости факторов было принято решение провести полный факторный эксперимент (ПФЭ) на двух уровнях изменения факторов (-1 и +1) с планом 2^4 с числом опытов 16 (табл. 2) по методике [16]. Каждый эксперимент был поведён с трехкратной повторностью. Обработку результатов выполняли по плану промышленного эксперимента, реализованного в программе для статистического анализа данных STATISTIKA 12.

Результаты и обсуждение. После статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии для угла свода:

$$y = 7,52 - 0,28X_1 + 1,22X_2 - 0,085X_3 - 0,345X_4.$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии с использованием критерия Стьюдента показала, что фактор X_3 незначим и им можно пренебречь. Тогда уравнение регрессии с кодированными факторами примет вид:

$$y = 7,52 - 0,28X_1 + 1,22X_2 - 0,345X_4,$$

Для перехода в уравнение с натуральными величинами исхода выражения:

$$X_1 = \frac{X_j - X_{j0}}{I_j}$$

где X_j – натуральное значение фактора;
 X_{j0} – натуральное значение основного уровня;

I_j – интервал варьирования.

Тогда уравнение в натуральных величинах примет вид:

$$y = 6,847 - 0,373f_{st} + 16,67f_d - 6,9k_{вос}.$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии для угла откоса показала незначимость факторов X_1 , X_3 и X_4 . Поэтому в кодированном виде оно имеет вид:

$$y = 21,72 + 1,8X_2,$$

в натуральных величинах
 $y = 10,58 + 2,4f_d.$

В дальнейшем для выявления зависимости коэффициента динамического трения от влажности семян гороха была проведена калибровка этого параметра по углу естественного откоса.

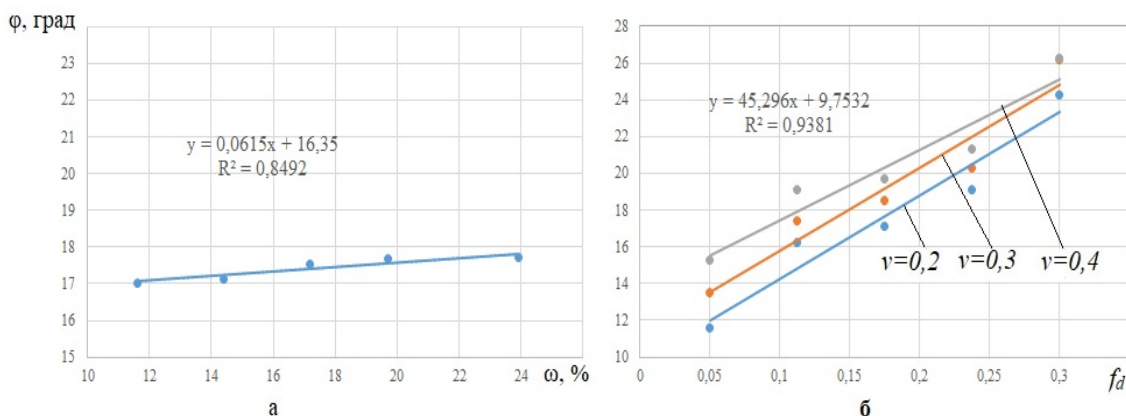


Рис. 4 – Зависимость угла естественного откоса φ от влажности ω семян гороха (а) и коэффициента динамического трения между частицами f_d (б)

Для уточнения зависимостей угла естественного откоса от влажности семян (рис.5а) и коэффициента динамического трения было принято решение исследовать влияние динамического трения в более узком диапазоне, φ , град.

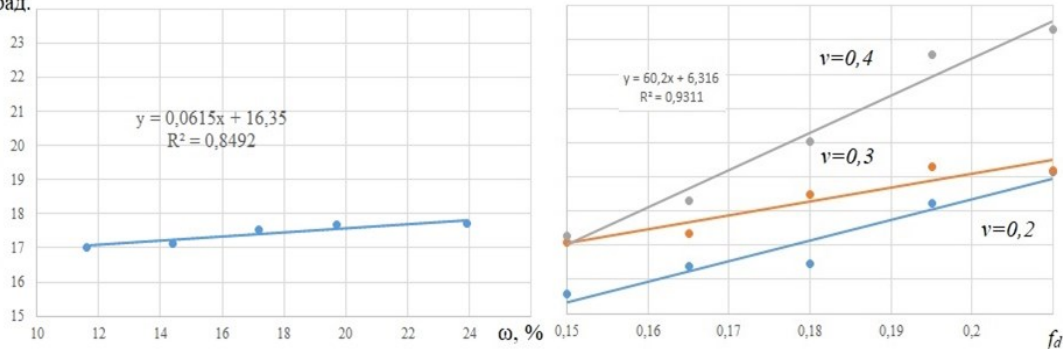


Рис. 5 – Зависимость угла естественного откоса j от влажности w семян гороха (а) и коэффициента динамического трения между частицами f_d (б)

Из полученных зависимостей угла естественного откоса от влажности (рис 5а) и коэффициента динамического трения (рис. 5б) видно, что характер изменения угла (наклон линии тренда) естественного

соответствующем углу естественного откоса при натуральных экспериментах в пределах 17,03...17,73. Исходя из этого дальнейшее исследование проводили в диапазоне $f_d=0,15...0,2$.

откоса семян гороха от влажности идентичен изменению аналогичного угла при коэффициенте восстановления $\nu=0,2$ в диапазоне коэффициента динамического трения $f_d=0,15...0,17$.

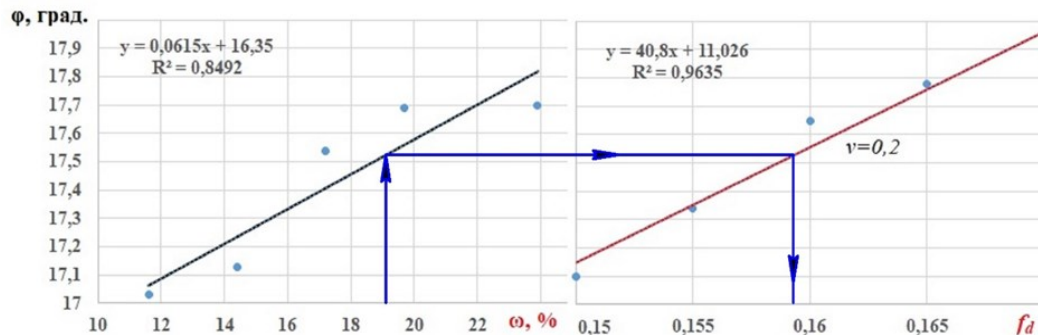


Рис. 6 – Номограмма выбора коэффициента динамического трения между частицами f_d для контактной модели в зависимости от влажности семян гороха w

Сопоставление зависимостей, представленных на (рис. 6) по результатам натуральных и модельных экспериментов, дает возможность построить номограмму для выбора коэффициента динамического трения между частицами f_d в зависимости от влажности семян w для линейной вязкоупругой контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов.

В дальнейшем ее можно использовать для моделирования технологического процесса высева семян гороха при постановке параметров контактной модели в программе Rocky DEM.

Выводы. Значимый параметр, который влияет на величину угла откоса, –

коэффициент динамического трения между частицами f_d . Характер изменения угла естественного откоса семян гороха от влажности идентичен его изменению у частиц, смоделированных методом дискретных элементов, при коэффициенте восстановления $\nu=0,2$ и коэффициенте динамического трения между ними $f_d=0,15...0,17$. По результатам экспериментов построена номограмма выбора параметра контактной модели – коэффициента динамического трения между частицами в зависимости от влажности семян гороха.

Сведения об источнике финансирования. исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10070, <https://rscf.ru/project/23-76-10070/>.

Литература

1. Horabik J., Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review // Biosystems Engineering. 2016. No. 147. P. 206-225.
2. Validation and Calibration of Maize Seed–Soil Inter-Parameters Based on the Discrete Element Method / L. Zhou, Q. Dong, J. Yu, et al. // Agronomy. 2015. Vol. 13. No. 8. 2115. URL: <https://www.researchgate.net/publication/373134767>
3. Coetzee C. J. Particle upscaling: Calibration and validation of the discrete element method // Powder

technology. 2019. No. 344. P. 487-503.

4. Paraffiniuk P., Molenda M., Horabik J. Influence of particle shape and sample width on uniaxial compression of assembly of prolate spheroids examined by discrete element method // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014. No. 416. P. 279-289.

5. Weir G., Tallon S. The coefficient of restitution for normal incident, low velocity particle impacts // *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60. No. 13. P. 3637-3647.

6. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device / M. Van Zeebroeck, E. Tijsskens, P. Van Liedekerke, et al. // *Journal of sound and vibration*. 2003. Vol. 266. No. 3. P. 465-480.

7. Predicting discharge dynamics of wet cohesive particles from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM) / A. Anand, J.S. Curtis, C.R. Wassgren, et al. // *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64. No. 24. P. 5268-5275.

8. Method of measurement of coefficient of friction between pairs of metallic and organic objects / J. Łukaszuk, M. Molenda, J. Horabik, et al. // *Acta Agrophysica*. 2009. Vol. 13. No. 2. P. 407-418.

9. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles / J.M. Boac, M.E. Casada, R.G. Maghirang, et al. // *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2009. - C 1.

10. Liping Z., Zhang L., Zheng W. Fertilizer Feeding Mechanism and Experimental Study of a Spiral Grooved-Wheel Fertilizer Feeder // *J Eng Sci Tech Review*. 2018. Vol. 11. P. 107-115.

11. A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method / T. Xu, J. Yu, Y. Yu et al. // *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. No. 12. P. 3274-3290.

12. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method // *Journal of Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 53. No. 2. URL: <https://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/1286>

13. Исследования угла естественного откоса компонентов зерносмеси / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин, К.Н. Тишанинов и др. // *Наука в центральной России*. №5 (47). 2020. С 31-40

14. Fast and precise DEM parameter calibration for Cucurbita ficifolia seeds / X. Ding, B. Wang, Z. He, et al. // *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 236. P. 258-276.

15. Wang S., Yu Z., Zhang W. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198. 107012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922003295>

16. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) / Н.Г. Ковалев, Г.А. Хайлис, М.М. Ковалёв. М.: ИК «Родник», 1998. 208 с.

Сведения об авторах:

Мударисов Салават Гумерович – доктор технических наук, заведующий кафедрой мехатронных систем и машин аграрного производства, e-mail: salavam@gmail.com

Фархутдинов Ильдар Мавлярович – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства, e-mail: ildar1702@mail.ru

Имангулов Венер Ханифович – младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники и конструирование машин для химической и биологической защиты растений», e-mail: imangulov.vener@mail.ru

Подолькин Владислав Александрович – младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники и конструирование машин для химической и биологической защиты растений», e-mail: vladikpodolakin@gmail.com

Насыров Руслан Рустамович – младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники и конструирование машин для химической и биологической защиты растений», e-mail: momo-246@mail.ru
Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия

ASSESSMENT OF SIGNIFICANCE AND SELECTION OF CONTACT MODEL PARAMETERS WHEN SIMULATING PEAS SEEDS USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD

S. G. Mudarisov, I. M. Farkhutdinov, V. Kh. Imangulov, V.A. Podolyakin, R. R. Nasyrov

Abstract. An integral part of technological operations in agriculture during sowing, harvesting, transportation and post-harvest processing is the impact of the working parts of machines on crop seeds. To increase the efficiency of machines and reduce seed injury, it is necessary to improve the design and technological parameters of the working units. Currently, the most promising method for theoretically substantiating the parameters of machines working with seeds and improving their design is modeling using the discrete element method. The study is carried out to substantiate the parameters of the contact model of discrete elements when modeling pea seeds. The parameters of the contact model were justified based on the results of testing on the angle of slope and arch when pouring seeds. To analyze the angle of repose and vault, a transparent rectangular container was used, when seeds were poured out of the upper part of which, the remaining seeds formed the angle of the vault, and the crumbled ones formed the angle of repose. Evaluation of the coefficients of the regression equations for changes in the angles of the arch and slope when shedding seeds in a container from the parameters of the selected contact linear viscoelastic model made it possible to establish a significant parameter - the coefficient of dynamic friction between particles. The nature of the change in the angle of repose of pea seeds from moisture is identical to the change in this angle for particles modeled by the discrete element method, with their recovery coefficient $\nu = 0.2$ and the coefficient of dynamic friction between them $f_d = 0.15...0.17$. The dependences of the angle of repose on the moisture content of pea seeds and the coefficient of dynamic friction between particles obtained during the implementation of experiments represent a nomogram for choosing the coefficient of dynamic friction between particles f_d for a contact linear viscoelastic model depending on the moisture content of pea seeds when modeling using the discrete element method.

Key words: modeling, discrete element method, calibration, angle of repose, contact model, pea seeds.

References

1. Horabik J, Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review. *Biosystems Engineering*. 2016; 147. 206-225 p.

2. Zhou L, Dong Q, Yu J, Wang Y, Chen Y, Li M, Wang W, Yu Y, Yuan J. Validation and calibration of maize seed-soil interparameters based on the discrete element method. [Internet]. *Agronomy*. 2015; 13(8). 2115. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/373134767>

3. Coetzee CJ. Particle upscaling: calibration and validation of the discrete element method. Powder technology. 2019; Vol.344. 487-503 p.
4. Parafiniuk P, Molenda M, Horabik J. Influence of particle shape and sample width on uniaxial compression of assembly of prolate spheroids examined by discrete element method. Physica A: statistical mechanics and its applications. 2014; Vol.416. 279-289 p.
5. Weir G, Tallon S. The coefficient of restitution for normal incident, low velocity particle impacts. Chemical Engineering Science. 2005; Vol.60. 13. 3637-3647 p.
6. Van Zeebroeck M, Tijsskens E, Van Liedekerke P, Deli V, De Baerdemaeker J, Ramon H. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. Journal of sound and vibration. 2003; 266(3), 465-480 p.
7. Anand A, Curtis JS, Wassgren CR, Hancock BC, Ketterhagen WR. Predicting discharge dynamics of wet cohesive particles from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM). Chemical Engineering Science. 2009; 64 (24), 5268-5275 p.
8. Lukaszuk J, Molenda M, Horabik J, Wiacek J. Method of measurement of coefficient of friction between pairs of metallic and organic objects. Acta Agrophysica. 2009; 13(2). 407-418 p.
9. Boac JM, Casada ME, Maghirang RG, Harner JP. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2009; June 21-June 24, 1 p.
10. Liping Z, Zhang L, Zheng W. Fertilizer feeding mechanism and experimental study of a spiral grooved-wheel fertilizer feeder. J Eng Sci Tech Review. 2018; 11. 107-115 p.
11. Xu T, Yu J, Yu Y, Wang Y. A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method. Advanced Powder Technology. 2018; Vol.29. 12. 3274-3290 p.
12. Sharaby N, Doroshenko A, Butovchenko A. Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method. Journal of Agricultural Engineering. 2022; Vol.53. 2. Available from: <https://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/1286>
13. Tishaninov NP, Anashkin AV, Tishaninov KN. [Research of the angle of repose of grain mixture components]. Nauka v tsentralnoy Rossii. 2020; 5 (47). 31-40 p.
14. Ding X, Wang B, He Z, Shi Y, Li K, Cui Y, Yang Q. Fast and precise DEM parameter calibration for Cucurbita ficifolia seeds. Biosystems Engineering. 2023; 236. 258-276 p.
15. Wang S, Yu Z, Zhang W. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method. Computers and Electronics in Agriculture. 2022; Vol.198. 107012 p. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922003295>
16. Kovalev NG, Khailis GA, Kovalev MM. Selskokhozyaystvennyye materialy (vidy, sostav, svoystva). [Agricultural materials (types, composition, properties)]. Moscow: IK "Rodnik". 1998; 208 p.

Authors:

Mударисов Салават Гумерович – Doctor of Technical Sciences, Head of Mechatronic Systems and Agricultural Production Machines Department, e-mail: salavam@gmail.com
 Farkhutdinov Ildar Mavliarovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Mechatronic Systems and Agricultural Production Machines Department, e-mail: ildar1702@mail.ru
 Imangulov Vener Khanifovich – junior researcher at the laboratory “Digital twins and design of machines for chemical and biological plant protection”, e-mail: imangulov.vener@mail.ru
 Podolyakin Vladislav Aleksandrovich – junior researcher at the laboratory “Digital twins and design of machines for chemical and biological plant protection”, e-mail: vladikpodolakin@gmail.com
 Nasyrov Ruslan Rustamovich, – junior researcher at the laboratory “Digital twins and design of machines for chemical and biological plant protection”, e-mail: momo-246@mail.ru
 Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.