

УДК 004.942; 631.3

UDC 004.942; 631.3

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

ОБЗОР ПАРАМЕТРОВ И МОДЕЛЕЙ КОНТАКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕМЯН И ГРАНУЛИРОВАННЫХ УДОБРЕНИЙ МЕТОДАМИ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

OVERVIEW OF CONTACT PARAMETERS AND MODELS FOR MODELING SEEDS AND GRANULAR FERTILIZERS USING DISCRETE ELEMENT METHODS

Мударисов Салават Гумерович
доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой мехатронных систем и машин аграрного производства
РИНЦ SPIN-код: 6893-9957
WoS ResearcherID: G-2217-2018
Scopus AuthorID: 57200284613
e-mail: salavam@gmail.com
Башкирский государственный аграрный университет, 450001, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34

Mudarisov Salavat Gumerovich
Doctor of Technical Sciences, Professor
head of the department of mechatronic systems and agricultural production machines
RSCI SPIN code: 6893-9957
WoS ResearcherID: G-2217-2018
Scopus AuthorID: 57200284613
e-mail: salavam@gmail.com
Bashkir State Agrarian University, 450001, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa

Мухаметдинов Айрат Мидхатович
кандидат технических наук, доцент
заведующий лабораторией (научно-исследовательской) цифровых двойников и конструирования машин для химической и биологической защиты растений
РИНЦ SPIN-код: 8297-3621
WoS ResearcherID: G-3461-2018
Scopus AuthorID: 57204634851
e-mail: airat102@mail.ru
Башкирский государственный аграрный университет, 450001, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34

Mukhametdinov Airat Midhatovich
Candidate of Technical Sciences, associate professor
head of the laboratory (research lab) for digital doubles and the design of machines for chemical and biological plant protection
RSCI SPIN-code: 8297-3621
WoS ResearcherID: G-3461-2018
Scopus AuthorID: 57204634851
e-mail: airat102@mail.ru
Bashkir State Agrarian University, 450001, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa

Фархутдинов Ильдар Мавляирович
кандидат технических наук, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства
РИНЦ SPIN-код: 8646-6670
WoS ResearcherID: G- 2816-2018
Scopus AuthorID: 57203975237
e-mail: ildar1702@mail.ru
Башкирский государственный аграрный университет, 450001, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34

Farkhutdinov Ildar Mavliarovich
Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department of mechatronic systems and agricultural production machines
RSCI SPIN-code: 8646-6670
WoS ResearcherID: G- 2816-2018
Scopus AuthorID: 57203975237
e-mail: ildar1702@mail.ru
Bashkir State Agrarian University, 450001, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa

В данной статье рассматриваются параметры и модели контактов для моделирования сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов с использованием метода дискретных элементов. Описываются различные модели контакта, такие как модель Герца-Миндлина, вязко-пластическая модель,

This article discusses contact parameters and models for modeling crops and granular materials using the discrete element method. Various contact models are described, such as the Hertz-Mindlin model, the visco-plastic model, the Coulomb model and the Johnson-Kennedy-Clark (JKR) model. The results of research on the parameters of fertilizer particles and

модель Кулона и модель Джонсона-Кеннеди-Кларка (JKR). Также приводятся результаты исследований по параметрам частиц удобрений и сельскохозяйственных культур. В статье подчеркивается важность выбора модели контакта в зависимости от процесса и целей исследования. Целью данной статьи является обобщение информации из литературных источников касающейся параметров, моделей контактов для моделирования сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов с использованием метода дискретных элементов. В качестве методов для исследования приняты литературные источники найденные по заданным ключевым словам. В качестве материалов использованы публикации в международных и российских научных базах данных. Представлен анализ научных публикаций с описанием используемой контактной модели, принятых параметров (свойств) контактной модели, выбранной формы и параметров частиц с указанием автора публикации и годом издания. В заключении описывается параметры влияющие на эффективное создание цифрового двойника

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК, МЕТОД ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФИЗИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, КОНТАКТНАЯ МОДЕЛЬ, СЕМЕНА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР, ГРАНУЛИРОВАННЫЕ УДОБРЕНИЯ, ГРАНУЛИРОВАННЫЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

agricultural crops are also presented. The article emphasizes the importance of choosing a contact model depending on the process and goals of the study. The purpose of this article is to summarize information from literature sources concerning parameters, contact models for modeling crops and granular materials using the discrete element method. Literary sources found for the specified keywords are used as methods for research. Publications in international and Russian scientific databases were used as materials. We also present an analysis of scientific publications with a description of the contact model used, the accepted parameters (properties) of the contact model, the selected shape and particle parameters, indicating the author of the publication and the year of publication. In conclusion, the work describes the parameters influencing the effective creation of a digital double

Keywords: MODELING, DIGITAL TWIN, DISCRETE ELEMENT METHOD, PHYSICAL AND GEOMETRIC PROPERTIES, CONTACT MODEL, CROP SEEDS, WHEAT, SOY, CORN, SUNFLOWER, PEAS, GRANULAR FERTILIZERS, GRANULAR AGRICULTURAL MATERIALS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-197-008>

Введение. Для создания цифрового двойника почвообрабатывающего и посевного орудия методом дискретных элементов необходимо подобрать контактную модель, произвести калибровку параметров контактной модели семян сельскохозяйственных культур, гранулированных материалов. В настоящее время для моделирования различных технологических процессов сельского хозяйства активно применяется метод дискретных элементов [40]. Для корректного применения данного метода и получения адекватных результатов необходимо уточнить характер взаимодействия между частицами выбрав наиболее подходящую модель контакта. Использование

<http://ej.kubagro.ru/2024/03/pdf/08.pdf>

метода дискретных элементов позволяет моделировать процесс перемещения, разгрузки из бункера, распределения, перемешивания сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов, а также процессы взаимодействия с воздушным потоком при интегрировании метода дискретных элементов и вычислительной гидродинамики.

При этом многие параметры используемых моделей контакта подбирается путем калибровки сопоставлением результатов натуральных испытаний и моделирования с целью получения идентичных результатов. Для этого необходимо определить физико-механических параметры (геометрические размеры, влажность, упругость, коэффициент внутреннего трения, коэффициент витания, угол естественного откоса и обрушения и др.) сельскохозяйственных культур и гранулированных минеральных удобрений и сопоставить эти данные при тестировании каким-либо методом с результатами моделирования. Наиболее простым и эффективным методом калибровки параметров контактных моделей является тест по углу естественного откоса.

Ввиду большого количества параметров контактных моделей, требующих для их калибровки большого количества физических экспериментов, необходимо оценить степень их влияния на калибруемый параметр. При этом такие параметры, которые можно определять прямыми физическими экспериментами, например, геометрические размеры, коэффициенты трения, упругость исследуемых материалов, следует принимать идентичными их физическим свойствам или из анализа научных исследований в данном направлении, а трудноопределимые параметры оставлять на калибровочные тесты. В связи с этим повышается важность обзора научных исследований по вопросам применения метода дискретных элементов для моделирования семян и гранулированных сельскохозяйственных материалов, и калибровки параметров контактных моделей.

В существующих обзорах по данной тематике, проведенных Horabik J., Molenda M. (2016) и Liping Z, (2018) [4,15], представлены анализ параметров различных сельскохозяйственных гранулированных материалов, которые могут использоваться для моделирования методом дискретных элементов. При этом в качестве параметров контактных моделей и свойств модельных частиц предлагается учитывать модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициенты статического и динамического трения, модуль Юнга, поверхностную энергию, формы и размеры частиц, распределение их по размерам, коэффициент восстановления. Установлено, что при создании модели частицы необходимо разделять калибровку сельскохозяйственных культур от гранулированных материалов и порошкообразных материалов. Так как гранулированные материалы представлены в виде большого скопления однородных спрессованных частиц. Однако при создании контактной модели в таком случае будет вызывать сложность и длительность при компьютерном расчете. Также существуют особенности при использовании гранулированных материалов биологического происхождения или минерального. Материалы биологического происхождения Chen, G.V. (2023) [36] гигроскопичны, что свою очередь влияет на их физико-механических характеристики. Поэтому при калибровке семян сельскохозяйственных культур необходимо проводить исследования на физико-механические свойства при различной влажности.

Большое количество разрозненных по методикам и моделируемым материалам исследований с применением метода дискретных элементов для моделирования поведения семян сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов в посевных машинах, машинах для внесения удобрений, средств защиты растений требует систематизации полученных результатов.

Цель и задачи исследования. Провести обзор исследований по параметрам и моделям контактов для моделирования семян сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов методом дискретных элементов и представить обобщенные результаты основных параметров для дальнейшего использования при создании цифровых двойников и обоснования конструктивно-технологических параметров сельскохозяйственных машин с использованием метода дискретных элементов.

Материал и методы исследований. Для проведения обзора научных исследований по заявленной теме использованы методы поиска по ключевым словам «моделирование», «цифровой двойник», «метод дискретных элементов», «физико-геометрические свойства», «контактная модель», «семена сельскохозяйственных культур», «гранулированные удобрения», «гранулированные сельскохозяйственные материалы», «калибровка параметров», «моделирование частиц», «приборы для определения физико-механических параметров», «угол естественного откоса», сыпучие материалы» в международных научных базах данных ScienceDirect, MDPI, Springer и Web of Science (WoS) и в российской базе РИНЦ.

Задачами проведенного систематического обзора доступных научных исследований были ответы на следующие вопросы:

- используемая контактная модель?
- параметры (свойства) контактной модели
- формы и параметры частиц?
- источник литературы?

Критерии отбора для обзора исследований были строго определены с целью обеспечения релевантности и актуальности исследования. В ходе отбора учитывались следующие параметры:

- временной интервал: рассмотрены публикации за период с 2010 по 2023 год, что позволило охватить события и изменения, произошедшие с момента появления первых исследований по применению различных моделей контактов для моделирования семян и гранулированных удобрений методами дискретных элементов.

Содержание ключевых концепций: публикации были отобраны, если в аннотации и/или ключевых словах содержатся концепции, связанные с калибровкой параметров сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов методами дискретных элементов. Это гарантировало, что выбранные материалы тесно связаны с темой исследования. Систематический обзор научных исследований позволил выделить 56 отобранных публикаций по использованию различных параметров и контактных моделей при моделировании. Из 56 отобранных публикаций 41 наиболее близко подходили по рассматриваемой теме.

В отобранных исследованиях приведены результаты исследований по калибровке параметров сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов, учитывающих различные физико-геометрические параметры частиц. Используемые контактные модели используются для описания различных технологических процессов как выгрузка, транспортирование, перемешивание, распределение сельскохозяйственных культур и гранулированных удобрений. Полученные результаты калибровки были использованы для создания цифровых двойников таких сельскохозяйственных машин как высевающие аппараты, разбрасыватели, выгрузные устройства, бункер, сошник, шнековый конвейер.

Результаты исследований и их обсуждение. При калибровке физико-геометрических параметров семян сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов необходимо учитывать их форму. Так форму частиц гороха, рапса условно можно принять за сферическую с

определенным диаметром. При этом семена пшеницы, сои, кукурузы, подсолнечника имеют сложную форму с определенной длиной, шириной, толщиной.

В работе П. Тишанинова (2020) [1] приведен обзор применяемых в настоящее время устройств для измерения угла естественного откоса и обрушения семян сельскохозяйственных культур с учетом параметров влияющих факторов. Для решения выявленных недостатков предложен новый разработанный прибор, который позволяет измерять угол естественного откоса различных сыпучих материалов независимо от вида и качественного состояния опорной поверхности, формы частиц насыпных материалов.

В исследованиях Tianyue Xu, Jianqun Yu, Yajun Yu, Yang Wang (2018) [2] приводятся результаты по калибровке семян четырех сортов сельскохозяйственной культуры сои при моделировании с использованием метода дискретных элементов. Семена сои не имеют сферической формы, они могут быть представлены эллипсоидами, суперквадриками и многогранниками. Были проведены натурные эксперименты и моделирование для определения угла обрушения и угла естественного откоса. Откалиброваны семена сои с использованием метода мультисферы при это форма частицы принята в виде эллипсоида. Предложенная методика позволяет смоделировать процесс движения семян сои и проектировать выгрузные силоса для сельскохозяйственных культур. В работе Sharaby N. (2022) [3] использовался подобный метод измерения угла обрушения для калибровки семян кунжута и дальнейшего моделирования при работе в высевальном аппарате.

Sugirbay, A. et al. (2023) [31] применяет метод дискретных элементов для создания цифрового двойника двухдискового сошника для посева пшеницы с одновременным внесением удобрений. В исследованиях Zhou L. и др. (2023) [5] описывается взаимодействие семян кукурузы с почвой

различной влажности с использованием модели Edinburgh Elasto-Plastic Adhesive (EERA). Провели калибровку параметров модели контакта для усовершенствованной модели Герца-Миндлина [6], [7] (2020), (2021) учитывается наличие адгезии, которая влияет на процесс взаимодействия семян с почвой. Значимость параметров в модели EERA исследуется с использованием теста Плакетта–Бермана. Из результатов теста Плакетта–Бурмана видно, что коэффициент статического трения и поверхностная энергия ($p < 0,01$) между частицами почвы и семян оказывают весьма существенное влияние на угол покоя, в то время как коэффициент контактной пластичности между частицами почвы и семян оказывает значительное влияние на угол покоя ($p < 0,05$). Для других параметров предполагается, что коэффициент восстановления равен 0,7, коэффициент трения качения равен 0,05, предел прочности при растяжении равен 3, а коэффициент тангенциальной жесткости равен 0,67.

В исследованиях Wang Q. (2020) [32] использует параметры контактных моделей частиц различных сортов пшеницы для моделирования процесса высева семян на основе DEM-CFD при разработке цифровых двойников рабочих органов посевных машин. В качестве основных параметров контактной модели частиц приняты коэффициент Пуассона 0,42, модуль сдвига $5,1 \times 10^7$.

Zhao, H. et al. (2021) [33] в статье приводятся параметры контактных моделей для сельскохозяйственных культур, рабочих органов и почвы. Эти модели применяются для моделирования рабочих процессов по обработке почвы и посева с использованием метода конечных элементов и метода дискретных элементов. Для калибровки сельскохозяйственных культур применяется модель Герца-Миндлина без проскальзывания частиц Horabik J., Molenda M., (2016) [4]. Применяется три распространенных подхода к определению профиля семян сельскохозяйственных культур: прямое определение, моделирование

срезов и 3D-сканирование. На основе более точного метода 3D-сканирования представлены параметры таких сельскохозяйственных культур как пшеницы, кукурузы, рис, масличного рапса, сои.

Chen, Z.P. (2020) [34] представлены результаты по калибровке параметров частиц сельскохозяйственных культур кукурузы и пшеницы. Данные параметры частиц использованы для моделирования в программном комплексе Rocky. В результате исследований приняты такие параметры как коэффициент статического трения кукурузы о сталь 0,24, коэффициент динамического трения 0,22; коэффициент статического трения кукуруза о кукурузу 0,09; коэффициент статического трения пшеница о сталь 0,32, коэффициент динамического трения пшеница о пшеницу 0,18. Модуль Юнга 26 для кукурузы, для пшеницы 22; коэффициент Пуассона 0,4 для кукурузы, 0,3 для пшеницы.

В исследовании Coetzee, S.J. (2020) [24] Tekeste, M. et al. (2018) [28] Han, D.D. (2023) [30] проводил калибровку параметров кукурузы методом дискретных элементов с использованием модели Герца-Миндлина. Данная модель подходит для моделирования работы дозирующих устройств семян и удобрений. В расчета угол естественного откоса был принят $27,05^\circ$ Согласно полученным результатам, коэффициент статического трения частицы кукурузы–частица кукурузы составил 0,237, коэффициент трения качения частицы кукурузы–частица кукурузы составил 0,029, а коэффициент трения качения частицы кукурузы– алюминевый сплав составил 0,103.

Wang, S. (2022) [39] представил результаты по калибровке основных параметров частиц семян подсолнечника для моделирования процесса транспортировки в шнековом конвейере зерноуборочного комбайна. Основные параметры (модуль Юнга $1,084 \times 10^7$, Коэффициент Пуассона 0,35, коэффициент восстановления 0,44 и коэффициент статического трения 0,3) дискретного элементного моделирования семян подсолнечника

были определены с использованием метода физических экспериментов. Использовалась сканирующая модель семян подсолнечника (163 подсферы), и калибровочные значения коэффициента статического трения и коэффициента трения качения между семенами подсолнечника были получены с помощью программного обеспечения Design Expert 11 для создания регрессионной модели второго порядка угла наклона и параметров значимости с помощью тестов Плакетта-Бермана, наибольшего набора высоты и Бокса-Бенкена.

В методе дискретных элементов (DEM) для моделирования взаимодействия частиц, включая семена, обычно используются различные модели контакта. Мударисов С.Г. и др. (2021) [41] представил анализ контактных моделей метода дискретных элементов. Эти модели учитывают влияние частиц между собой и различной поверхностью. Вот некоторые из них:

1. Модель Герца-Миндлина: Эта модель учитывает деформацию при контакте двух твердых тел. Она широко используется для моделирования контакта между эластичными телами.

2. Модель Линейной прилипчивости (Linear spring-dashpot model): Эта модель представляет собой пружинный демпфер, который описывает силы при контакте и демпфирование.

3. Модель Кулона: Эта модель учитывает трение между частицами. Она основана на законе Кулона о трении, который гласит, что сила трения прямо пропорциональна нормальной силе.

4. Модель Джонсона-Кеннеди-Кларка (JKR): Эта модель используется для моделирования адгезии между частицами.

Выбор модели контакта зависит от конкретной задачи и свойств материала, который моделируется.

Например, для моделирования семян пшеницы могут быть использованы различные модели, в зависимости от конкретных условий и целей исследования.

1. Модель Герца-Миндлина может быть полезна для моделирования контакта между семенами пшеницы, поскольку они обычно имеют относительно твердую структуру и могут деформироваться при контакте.

2. Модель Линейной прилипчивости также может быть применима, поскольку она учитывает силы при контакте и демпфирование, что может быть важно при моделировании процессов, таких как сев или перемещение семян.

3. Модель Кулона может быть использована для учета трения между семенами, что может быть важно при моделировании таких процессов, как складирование или перемешивание семян.

4. Модель Джонсона-Кеннеди-Кларка (JKR) возможно будет менее релевантна, поскольку адгезия между семенами пшеницы обычно не является ключевым фактором в большинстве процессов.

Рассмотрим результаты обзора исследований сельскохозяйственных культур. В таблице 1 представлены основные параметры частиц сельскохозяйственных культур используемые при моделировании.

Таблица 1 Параметры частиц сельскохозяйственных культур используемые при моделировании

№	Параметры	Авторы и источник публикации					
		Horabik J., Molenda M., (2016)			Tianyue Xu, (2018) [2]	Han, D.D. (2023) [30]	Wang, S. (2022) [39]
1	Семена	Мягкая пшеница	Твердая пшеница	Пшеница	Соя	Кукуруза	подсолнечник
2	Модуль Юнга E , Па	116-1500 МПа	359-2640 МПа	600-2200	$1,37 \times 10^8$	137-217 МПа	$1,084 \times 10^7$
3	Модуль Юнга материал (рабочая поверхность) $E_{ст}$, Па	1×10^{10}	-	-	Оргстекло $1,37 \times 10^8$ Сталь $7,92 \times 10^{10}$	-	
4	Коэффициент Пуассона ν	0,3	-	-	0,3-0,4	0,357-0,438	0,35
5	Коэффициент статического трения f_{st}	0,7	0,49	0,49-0,58	0,1 между семенами	0,237	0,3
6	Коэффициент динамического трения f_d	0,6	-	-	0,03	0,029	0,03
7	Поверхностная энергия G_s , Дж/м ²	300...340	-	-	-	-	
8	Коэффициент восстановления	0,3	-	-	0,668 между семенами 0,720 между оргстеклом 0,486 между сталью	0,182-0,578	0,44
9	Коэффициент статического трения $f_{st,k}$	0,3	-	0,32-0,45	0,4 оргстекло 0,1 сталью	0,2-0,5	
10	Коэффициент динамического трения $f_{d,k}$	0,15	-	-	0,03 между оргстеклом 0,11 между сталью	0,0103 между алюминиевым сплавом	

Представленные результаты параметров для таких сельскохозяйственных культур как пшеница, соя, кукуруза, подсолнечник могут использоваться для моделирования различных технологических процессов в сельскохозяйственных машинах.

Однако, следует помнить, что выбор модели контакта должен быть обоснован результатами предварительных лабораторных испытаний и характеристиками конкретного материала. Также необходимо учитывать

влажность рассматриваемого материала. С изменением влажности сельскохозяйственных культур изменяется их упругость, а соответственно и характер взаимодействия.

В работах Murray, A., Alonso-Marroquin, F. (2016) (12) [12], Zheng, Q. J., Xia, B. S., Pan, R. H. & Yu, A. B. [11] (2017), Saleh, K., Golshan, S., Zarghami, R. [10] (2018), López-Rodríguez, D. et al. [13] (2019), Xiao, Y. et al. [9] (2021), Wiącek J., et al. (2023) [8] рассматривается движение гранулированных материалов и обоснование параметров угла наклона и проходного сечения экспериментального выгрузного бункера. В исследованиях по массовой скорости выгрузки была проведена калибровка параметров семян пшеницы, рапса, льна. Были выбраны следующие параметры материала частиц: плотность твердого вещества 2212 кг/м^3 , модуль Юнга $8,8 \text{ МПа}$ и коэффициент Пуассона $0,2525$. Параметры трения между частицами $0,47$, между частицей и стенкой $0,49$ и между частицей и дном (пластиковой вставкой) $0,21$, а также коэффициент восстановления $0,3$ были определены экспериментально. Для моделирования было использовано значение трения качения по умолчанию, равное $0,01$ программного обеспечения EDEM. Стенки выгрузного бункера были смоделированы с плотностью стали 7800 кг/м^3 , модулем Юнга 200 МПа и коэффициентом Пуассона $0,25$, которые были параметрами материала стали.

Учеными широко применяется метод дискретных элементов для моделирования и создания цифровых двойников поведения гранулированных материалов Cundall, P.A., Strack, O.D. (1979) (27) [27] Grima, A.P., Wyruch, P.W. (2011) [26], Ding, S. (2018) [29]. Chen, G.B. (2023) [36] представил результаты по моделированию процесса измельчения и внесения органических удобрений на основе метода дискретных элементов (DEM). Для корректной работы цифрового двойника необходимо наиболее точно определить входные параметры частиц.

Основные свойства гранулированных удобрений включают форма частиц, размер, гранулометрический состав, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль упругости, плотность. А также параметры по взаимодействию частиц удобрений: коэффициент восстановления, коэффициент статического и динамического трения между частицами и различными материалами Adilet, S. et al. (2021) [22]. Для калибровки коэффициентов ученые проводят различные лабораторные исследования для определения физико-механических параметров гранулированных материалов Bangura, K. (2020) [14], Yu, S. (2022) [20].

В настоящее время увеличивается потребление и производство минеральных удобрений. В 2022 объем производства минеральных удобрений в Российской Федерации составил 54,3 млн. тонн физическом весе. По данным Росстата, НИИТЭХИМ, Минсельхоза России в 2023г. объем приобретения минеральных удобрений АПК составляет: аммиачная селитра - 39%, NPK – 25%, фосфорные удобрения - 16 %, карбамид – 5%, хлористый калий – 5%. В Российской Федерации насчитывается около 20 крупных производителей азотных удобрений, 15 крупных производителей сложных удобрений, 5 крупных производителей калийных удобрений. В агропромышленные предприятия минеральные удобрения поступают в полипропиленовых мешках или насыпью. Также есть мелкие производители, которые в том числе производят расфасовку в более мелкую тару или сами занимаются производством. В Республике Башкортостан производством удобрений занимаются АО «Мелеузовские минеральные удобрения» (аммиачная селитра) и ООО «ГазпромНефтехим Салават» (карбамид или мочевины).

К гранулированным сельскохозяйственным материалам относятся органические и минеральные гранулированные удобрения. В исследованиях для гранулированных удобрений форму частиц имеет разную форму. Для определенных видов используемых во время посева их

принимают сферической с определенным диаметром. Установлено, что сферическую форму имеют такие минеральные гранулированные удобрения: нитроаммофоска (азот – 16%, фосфор – 16%, калий –16%), карбамид с микроэлементами (азот –46%), диаммонийфосфат (фосфор – 47%, азот 18%), азофоска (нитроаммофоска) (азот – 16%, фосфор – 16, калий –16%). При калибровке диаметра частиц для более точно расчета можно использовать разные диаметры гранул, однако это приводит к длительности расчета в программном комплексе и более точным результатам. Для эффективного использования в агропромышленном комплексе производители изготавливают минеральные удобрения по ГОСТ для соответствия их гранулометрического состава доля частиц гранул для карбамида размером от 1 мм до 4 мм должна составлять не менее 94%, доля частиц менее 1 мм. должна составлять не более 5 %. Для этого определяют гранулометрический состав используя существующие методики на механическом встряхивателе или на ситах разного диаметра. После отсева отбирают остаток удобрений с каждого сита и взвешивают. Таким образом определяют процентное содержание удобрений с размером частиц менее 1 мм и более 4 мм. Экспериментально установлено, что распределение по размерам внутри одного вида удобрения разных производителей отличается. Установлено, что для карбамида с микроэлементами с содержанием азота 46% размер фракции гранул составляет: менее 1 мм – 0,48%; 1..2,5 мм - 54,44%; 2,5..3 мм - 27,76%; 3..3,5 мм – 11,28%; 3,5.. 4,25 – 5,28%; 4,25.. 4,5 – 0,16%. Соответственно при калибровке частиц для карбамида можно принять диаметр от 1 мм до 3 мм. так как 82,2% частиц находятся в этом диапазоне. Карбамид (мочевина) с содержанием азота 46,2 % уже другого производителя размер фракции гранул составляет: менее 1 мм – 5,88%; 1...2,5 мм - 67,88 %; 2,5..3 мм – 17,4 %; 3..3,5 мм – 6,16 %; 3,5.. 4,25 – 2,36 %; 4,25.. 4,5 – 0,16%. Соответственно при калибровке частиц для карбамида можно принять

диаметр от 1 мм до 3 мм. так как 85,28% частиц находятся в этом диапазоне.

В работе Bangura, K. et al. (2020) [14] представлены результаты по моделированию методом дискретных элементов движения комплексных удобрений и мочевины с использованием разработанной высевающей катушки на разных скоростях и разной формы спирали. В качестве основных параметров частиц удобрений приняты размеры сферичность которых превышала 90% поэтому для оптимизации расчетов были приняты в виде сфер. Коэффициент Пуассона для удобрений 0,25 (Liping Z, (15) [15], Ding S, [16] (2018)) и для разгрузочного бункера 0,29 [17] (Zhan Z. (2013)); модуль упругости при сдвиге для комплексных удобрений $1,25 \times 10^6$ Па, для мочевины $2,8 \times 10^6$ Па; для разгрузочного бункера $2,05 \times 10^6$ Па.

В исследованиях Chen, H. et al. (2021) [18] рассматривается моделирование движения удобрений с использованием спирального механизма на основе модели Герца Миндлина. В качестве основных параметров частиц удобрений приняты размеры сферичность которых составила 97,67% поэтому для оптимизации расчетов были приняты в виде сфер с диаметром 3,24 мм. Коэффициент Пуассона для удобрений 0,25, для бункера 0,4; плотность гранулы удобрений $1,645 \text{ г/см}^3$; модуль упругости при сдвиге для удобрений $9,4 \times 10^7$ Па, для бункера $1,0 \times 10^6$ Па; коэффициент статического трения для удобрений 0,3, между удобрениями и бункером 0,32; коэффициент динамического трения для удобрений 0,1, между удобрениями и бункером 0,18.

В статье Wang, J. et al. (2023) [19] рассматривается моделирование процесса равномерности распределения комплексных удобрений произведенных в Китае с использованием контактной модели Герца-Миндлина учитывающей положение частиц удобрений в процессе их перемещения. В качестве основных параметров частиц удобрений приняты

размеры сферичность которых составила 90% поэтому для оптимизации расчетов были приняты в виде сфер с диаметром 3,4 мм с плотностью гранулы от 1,32 до 1,57 г/см³.

В исследованиях Yu, S. (2022) [20] провели калибровку физико-геометрических параметров гранулированных удобрений на основе метода дискретных элементов модели Герца - Миндлина. Для проведения исследований были приняты следующие диапазоны параметров удобрений: Размеры удобрений 1,71-4,59 мм, плотность 1,72 кг/м³ с влажностью 4,92-6,37 % и средним диаметром 3,2 мм, коэффициент Пуассона 0,16-0,48, модуль сдвига $1,93 \times 10^7$ Па - $5,42 \times 10^7$ Па, модуль упругости $8,3 \times 10^6$ Па – $1,83 \times 10^7$ Па, коэффициент статического трения для удобрений 0,18-0,55, между удобрениями и акриловой пластиной 0,07-0,23; коэффициент динамического трения для удобрений 0,08-0,24, между удобрениями и акриловой пластиной 0,03-0,11, угол естественного откоса 21,84°. В результате исследований по методу Плакетта–Бирмана установлено, что коэффициент восстановления при столкновении, коэффициент статического трения и коэффициент трения качения гранулированного удобрения оказывали значительное влияние на угол естественного откоса.

Cheng, B. (2022) [21] смоделировал движение удобрений в высевающем аппарате используя модель взаимодействия двухфазного потока газ-твердое вещество в смесительной камере газоудобрения для внесения удобрений с подачей газа, объединив вычислительную гидродинамику (CFD) и метод дискретных элементов (DEM). Коэффициент Пуассона для мочевины 0,51, плотность мочевины 1337 кг/м³, модуль сдвига $3,56 \times 10^6$ Па, коэффициент статического трения между мочевиной и стенками высевающего аппарата 0,41, коэффициент динамического трения между мочевиной и стенками высевающего аппарата 0,04.

Adilet, S. et al. (2021) [22] провел калибровку для определения взаимодействия частиц удобрений Antony, S.J. (2005) [25]. В своей работе привел анализ используемых контактных моделей при моделировании методом дискретных элементов. В контактной модели Герца-Миндлина (без проскальзывания) генерируется множество частиц, которая учитывает деформацию при контакте между частицами удобрений и удобрениями и поверхностью рабочих органов сельскохозяйственных машин Di Renzo, A.; Di Maio, F.P. (2004) [23]. Эта модель применяется в сочетании с моделью Джонсона-Кендалла-Робертса (JKR) для связанных между собой сыпучих материалов с учетом натяжения между частицами. Для проведения исследования приняты следующие физико-механические свойства гранулированных удобрений: модуль сдвига $1,24 \times 10^6$ Па, В результате проведения исследований получены оптимальные параметры для удобрений коэффициент статического трения 0,0294, коэффициент динамического трения 0,099 при взаимодействии удобрений с пластиком, коэффициент восстановления 0,491, коэффициент Пуассона 0,25, плотность 1575 кг/м^3 .

На основе проведенного анализа установлено, что параметры контактной модели установлены для гранулированных минеральных удобрений зачастую без указания конкретной марки и процентного содержания компонентов микроэлементов азота, фосфора, калия. В работах Bangura, K. et al. (2020) [14], Cheng, B. (2022) [21] приводятся результаты исследований для мочевины и комплексных удобрений.

Lei, X. (2023) [35] провел калибровку параметров частиц гранулированных минеральных удобрений N, P_2O_5 , K_2O разных марок и производителей. При этом коэффициент Пуассона составил 0,25, модуль сдвига $2,8 \times 10^6$ Па, коэффициент восстановления 0,323, коэффициент статического трения между частицами удобрений 0,381, коэффициент динамического трения между удобрениями 0,173.

Xi, X.B. (2023) [37] для моделирования процесса перемешивания разных гранулированных минеральных удобрений с помощью обдува воздуха использовались EDEM и программное обеспечение Fluent. Поскольку на поверхности гранул удобрений не должно быть адгезии, в модели использовалась механическая модель скользящего контакта Герца-Миндлина (Zeng et al., 2021) [38] между удобрениями, между удобрением и мешалкой и между конвейерными лентами. Средний эквивалентный размер гранул удобрений для N, P и K был установлен равным (мочевина) 3,050 мм, (диаммонийфосфат) 3,464 мм, (сульфат калия) 3,274 мм соответственно. При этом сферичность гранул удобрений N, P и K превышает 90%, поэтому разумно, что гранулы удобрений могут быть созданы в EDEM в виде сфер. При этом для основных гранул удобрения приняты следующие параметры коэффициент Пуассона составил 0,25, модуль Юнга $1,0 \times 10^7$ Па, коэффициент восстановления 0,2-0,36, коэффициент статического трения между частицами удобрений 0,28.

Представлены параметры для различных гранулированных удобрений: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент восстановления, коэффициент статического трения, коэффициент динамического трения.

В таблице 2 представлены основные параметры частиц удобрений используемые при моделировании.

Таблица 2 Параметры частиц удобрений используемые при моделировании

№	Параметры	Авторы и источник публикации						
		Bangura, K. et al. (2020) [14]		Chen, H. et al. (2021) [18]	Yu, S. (2022) [20]	Cheng, B. (2022) [21]	Adilet, S. et al. (2021) [22]	Xi, X.B. (2023) [37]
1	Удобрения	Комплексные удобрения	мочевина	Удобрения	Удобрения	Мочевина	удобрения	Удобрение
2	Модуль Юнга E , Па	$1,25 \times 10^6$	$2,8 \times 10^6$	$9,4 \times 10^7$	$8,3 \times 10^6$ Па – $1,83 \times 10^7$	$3,56 \times 10^6$	$1,24 \times 10^6$	$1,0 \times 10^7$
3	Модуль Юнга материал (рабочая поверхность) $E_{ст}$, Па	-	*Для разгрузочного бункера $2,05 \times 10^6$	для бункера $1,0 \times 10^6$	$1,93 \times 10^7$ Па – $5,42 \times 10^7$	-	-	ПВХ $4,0 \times 10^6$
4	Коэффициент Пуассона ν	0,25 *Для разгрузочного бункера 0,29		0,25 *Для бункера 0,4	0,16-0,48	0,51	0,25	0,25
5	Коэффициент статического трения f_{st}	-	-	0,3	0,18-0,55	-	0,0294	0,26-0,41
6	Коэффициент динамического трения f_d	-	-	0,1	0,08-0,24	-	0,099	
7	Поверхностная энергия G_s , Дж/м ²	-	-	-	-	-	-	
8	Коэффициент восстановления	0,323	0,307	-	-	-	0,491	0,2-0,36
9	Коэффициент статического трения $f_{st,k}$	-	-	между удобрениями и бункером 0,32	между удобрениями и акриловой пластиной 0,07-0,23	между мочевиной и стенками высевающего аппарата 0,41	-	0,28 о сталь
10	Коэффициент динамического трения $f_{d,k}$	-	-	между удобрениями и бункером 0,18	между удобрениями и акриловой пластиной 0,03-0,11	между мочевиной и стенками высевающего аппарата 0,04	-	-

Представленные результаты в таблице 2 обзора исследований могут быть использованы при создании цифровых двойников выгрузных устройств, бункеров, высевающих аппаратов, тукопроводов, сошников и других рабочих органов.

Гранулированные удобрения представляют собой сложную систему, которую можно моделировать с помощью различных моделей контакта, включая:

1. Модель Герца-Миндлина: Эта модель может быть полезна для моделирования контакта между отдельными гранулами удобрений. Она учитывает деформацию материала при контакте, что может быть важно при моделировании процессов, таких как транспортировка или складирование.

2. Модель Линейной прилипчивости: Эта модель может быть применима для учета сил при контакте и демпфирования. Это может быть важно при моделировании процессов, таких как смешивание или разделение гранул. Это наблюдается для удобрений фракции менее 1 мм порошкообразной формы и проявляется в виде прилипания к поверхностям.

3. Модель Кулона: Эта модель может быть использована для учета трения между гранулами, что может быть важно при моделировании процессов, таких как складирование или перемешивание.

4. Модель Джонсона-Кеннеди-Кларка (JKR): Эта модель может быть менее релевантна, поскольку адгезия между гранулами удобрений обычно не является ключевым фактором в большинстве процессов.

Также важно отметить, что выбор конкретной модели контакта должен быть основан на характеристиках конкретного материала и целях исследования.

Выводы. Представленный обзор исследований по параметрам и моделям контактов для моделирования сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов могут использоваться для моделирования методами дискретных элементов. Модели контактов и параметры материала являются важными входными данными для обеспечения эффективного моделирования и надежной выходной информации по

которым можно оценивать процесс работы цифровых двойников рабочих органов.

Представленные результаты обзора исследований могут быть использованы при создании цифровых двойников для визуализации процесса перемещения, смешивания, распределения, дозирования семян сельскохозяйственных культур и гранулированных материалов при обосновании параметров бункеров, рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин с учетом физико-механических свойств этих материалов. Выбор модели контакта зависит от процесса проходящего в рабочем органе и полученных результатов учитывающий разный характер взаимодействия между частицами материала.

Установлено, что угол обрушения является эффективным параметром при калибровке и оценки точности выбора модели при создании цифрового двойника. На него оказывают влияние коэффициент статического трения коэффициент трения качения между гранулами минеральных удобрений.

На основе изучения представленных в обзоре исследований при моделировании методом дискретных элементов гранулированных удобрений можно принять следующие параметры контактных моделей: коэффициент Пуассона 0,25, Модуль Юнга (для комплексных удобрений $1,25 \times 10^6 - 9,4 \times 10^6$ Па), для мочевины $2,8 \times 10^6 - 3,56 \times 10^6$ Па), коэффициент восстановления 0,2-0,36, коэффициент статического трения между частицами удобрений 0,07-0,41, коэффициент динамического трения между удобрениями 0,03-0,18. Данные параметры для гранулированных материалов представлены в табличной форме для эффективного применения в процессе изучения и моделирования.

Установлено, что для моделирования семян сельскохозяйственных культур методом дискретных элементов можно принимать следующие параметры контактных моделей: коэффициент Пуассона 0,3–0,4, Модуль

Юнга 116 – 2640 МПа, коэффициент восстановления 0,182-0,578, коэффициент статического трения между частицами удобрений 0,2-0,5, коэффициент динамического трения между удобрениями 0,03-0,15. Остальные параметры и для удобрений и для семян должны быть откалиброваны путем сопоставления результатов моделирования и тестов физических экспериментов.

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

Библиографический список

1. Тишанинов Н. П., Анашкин А. В., Тишанинов К. Н., Альшинайинн Х. Д. (2020) Исследования угла естественного откоса компонентов зерносмеси. Наука в центральной России. – 2020. – № 5(47). – С. 31-41. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-5-31-41
2. Tianyue Xu, Jianqun Yu, Yajun Yu, Yang Wang. (2018). A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method. *Advanced Powder Technology*, 3274–3290 <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.006>
3. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. (2022). Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method. *Journal of Agricultural Engineering* 53(2), DOI: 10.4081/jae.2022.1286
4. Horabik J., Molenda M., (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering* 147 (2016) 206-225, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017
5. Zhou L., Dong Q., Yu J., Wang Y., Chen Y., Li M., Wang W., Yu Y., Yuan J. (2023) Validation and Calibration of Maize Seed–Soil Inter-Parameters Based on the Discrete Element Method. *Agronomy* 13(8):2115, DOI: 10.3390/agronomy13082115
6. Zhou, L.; Yu, J.; Liang, L.; Yu, Y.; Yan, D.; Sun, K.; Wang, Y. Study (2021) ,on key issues in the modelling of maize seeds based on themulti-sphere method. *Powder Technol.* 394, 791–812.
7. Zhou, L.; Yu, J.; Wang, Y.; Yan, D.; Yu, Y. (2020) A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete elementmethod. *Powder Technol.* 374, 353–376
8. Wiącek J., Horabik J., Molenda M., Parafniuk P., Bańda M., Stasiak M. (2023). Converging orifice used to control the discharge rate of spherical particles from a flat floor silo. *Scientific Reports* 13(1), DOI: 10.1038/s41598-023-27431-8
9. Xiao, Y. et al. (2021) Experimental study of granular flow transition near the outlet in a fat-bottomed silo. *Biosyst. Eng.* 202, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.013>.
10. Saleh, K., Golshan, S. & Zarghami, R. A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos—Basics and practical aspects. *Chem. Eng. Sci.* 192, 1011–1035. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028> (2018).

11. Zheng, Q. J., Xia, B. S., Pan, R. H. & Yu, A. B. (2017) Prediction of mass discharge rate in conical hoppers using elastoplastic model. *Powder Technol.* 307, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.037>.
12. Murray, A., Alonso-Marroquin, F. (2016). Increasing granular flow rate with obstructions. *Pap. Phys.* 8(1), 080003
13. López-Rodríguez, D. et al. Effect of hopper angle on granular clogging. *Phys. Rev. E* 99, 032901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.032901> (2019).
14. Bangura, K., Gong, H., Deng, R., Tao, M., Liu, C., Cai, Y., Liao, K., Liu, J., Qi, L. (2020) Simulation analysis of fertilizer discharge process using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE* 2020, 15, DOI: 10.1371/journal.pone.0235872
15. Liping Z, Zhang L, Zheng W. (2018) Fertilizer Feeding Mechanism and Experimental Study of a Spiral Grooved-Wheel Fertilizer Feeder. *J Eng Sci Tech Review.* 2018; 11: 107–115.
16. Ding S, Lu B, Yuxiang Y, Bin Y, Zuoli F, Zhiqi Z, et al. Discrete element modeling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates. *Comp Elect Agri.* 2018; 152: 32–39.
17. Zhan Z., Li Y., Liang Z., Gong Z. DEM simulation and physical testing of rice seed impact against a grain loss sensor. *Biosys Eng.* 2013; 116: 410–419.
18. Chen, H.; Zheng, J.; Lu, S.; Zeng, S.; Wei, S. (2021) Design and experiment of vertical pneumatic fertilization system with spiral Geneva mechanism. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 135–144.
19. Wang, J.; Wang, R.; Ju, J.; Song, Y.; Fu, Z.; Lin, T.; Chen, G.; Jiang, R.; Wang, Z. (2023). Study on the Influence of Grooved-Wheel Working Parameters on Fertilizer Emission Performance and Parameter Optimization. *Agronomy* 2023, 13, 2779. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112779>
20. Yu, S.; Bu, H.; Dong, W.; Jiang, Z.; Zhang, L.; Xia, Y. (2022). Calibration of Physical Characteristic Parameters of Granular Fungal Fertilizer Based on Discrete Element Method. *Processes* 2022, 10, 1564. <https://doi.org/10.3390/pr10081564>
21. Cheng, B.; He, R.; Xu, Y.; Zhang, X. (2022) Simulation Analysis and Test of Pneumatic Distribution Fertilizer Discharge System. *Agronomy* 2022, 12, 2282. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102282>
22. Adilet, S.; Zhao, J.; Sayakhat, N.; Chen, J.; Nikolay, Z.; Bu, L.; Sugirbayeva, Z.; Hu, G.; Marat, M.; Wang, Z. (2021) Calibration Strategy to Determine the Interaction Properties of Fertilizer Particles Using Two Laboratory Tests and DEM. *Agriculture* 2021, 11, 592. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070592>
23. Di Renzo, A.; Di Maio, F.P. (2004) Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chem. Eng. Sci.* 2004, 59, 525–541. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>
24. Coetzee, C.J. (2020) Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles. *Powder Technol.* 2020, 364, 851–878. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.076>
25. Antony, S.J.; Kuhn, M.R.; Barton, D.C.; Bland, R. Strength and signature of force networks in axially compacted sphere and non-sphere granular media: Micromechanical investigations. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2005, 38, 3944–3952. DOI 10.1088/0022-3727/38/21/017
26. Grima, A.P.; Wypych, P.W. (2011) Development and validation of calibration methods for discrete element modelling. *Granul. Matter* 2011, 13, 127–132. DOI 10.1007/s10035-010-0197-4
27. Cundall, P.A.; Strack, O.D. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotech* 1979, 29, 47–65.

28. Tekeste, M.; Mousaviraad, M.; Rosentrater, K. (2018). Discrete Element Model Calibration Using Multi-Responses and Simulation of Corn Flow in a Commercial Grain Auger. *Trans. ASABE* 2018, 61, 1743–1755.

29. Ding, S.; Bai, L.; Yao, Y.; Yue, B.; Fu, Z.; Zhang, Z.; Huang, Y. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates. *Comput. Electron. Agric.* 2018, 152, 32–39. doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.044

30. Han DD, Xu Y, Huang YX, He B, Dai JW, Lv XR, Zhang LH (2023) DEM parameters calibration and verification for coated maize particles. *Comput Part Mech.* <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00598-7>

31. Sugirbay, A.; Zhao, K.; Liu, G.; Hu, G.; Chen, J.; Mustafin, Z.; Iskakov, R.; Kakabayev, N.; Muratkhan, M.; Khan, V.; et al. (2023) Double Disc Colter for a Zero-Till Seeder Simultaneously Applying Granular Fertilizers and Wheat Seeds. *Agriculture* 2023, 13, 1102. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051102>

32. Wang Q., Li Z., Wang W., Zhang C., Chen L., Wan L. (2020) Multi-objective optimization design of wheat centralized seed feeding device based on particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6):

76–84. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201306.5665

33. Zhao, H.; Huang, Y.; Liu, Z.; Liu, W.; Zheng, Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture* 2021, 11, 425. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>

34. Chen, Z.P.; Carl, W.; Eric, V. (2020) Determination of material and interaction properties of maize and wheat kernels for DEM simulation. *Biosyst. Eng.* 2020, 195, 208–226. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.007>

35. Lei, X.; Wu, W.; Deng, X.; Li, T.; Liu, H.; Guo, J.; Li, J.; Zhu, P.; Yang, K. Determination of Material and Interaction Properties of Granular Fertilizer Particles Using DEM Simulation and Bench Testing. *Agriculture* 2023, 13, 1704. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091704>

36. Chen, G.B.; Wang, Q.G.; Xu, D.J.; Li, H.W.; He, J.; Lu, C.Y. Design and experimental research on the counter roll differential speed solid organic fertilizer crusher based on DEM. *Comput. Elect. Agric.* 2023, 207, 107748. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107748>

37. Xi, X.B.; Wang, R.Y.; Wang, X.T.; Shi, Y.J.; Zhao, Y.; Zhang, B.F.; Qu, J.W.; Gan, H.; Zhang, R.H. Parametric optimization and experimental verification of multi-fertilizer mixing by air blowing and blade stirring based on discrete element simulations. *Comput. Elect. Agric.* 2023, 210, 107895. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107895>

38. Zeng et al., 2021 Z.W. Zeng, X. Ma, X.L. Cao, Z.H. Li, X.C. Wang. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 52 (04) (2021), pp. 1-20. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.001

39. Wang, S.; Yu, Z.H.; Aorigele; Zhang, W.J. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method. *Comput. Elect. Agric.* 2022, 198, 107012. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107012>.

40. Мударисов, С. Г. Использование методов дискретных элементов для разработки цифровых двойников сельскохозяйственных машин/ С. Г. Мударисов, Р. Ю. Багаутдинов // Агропромышленный комплекс в условиях современной реальности: Сборник трудов международной научно-практической конференции, Тюмень, 01 марта 2023 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2023. – С. 145-151.

41. Мударисов, С. Г. Анализ контактных моделей метода дискретных элементов/ С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, Р. Ю. Багаутдинов // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК : материалы международной

научно-практической конференции в рамках XXXI Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2021», Уфа, 23–26 марта 2021 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; Министерство сельского хозяйства Республики Башкортостан; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»; ООО «Башкирская выставочная компания». Том Часть 2. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2021. – С. 106-109.

Literature

1. Tishaninov N. P., Anashkin A. V., Tishaninov K. N., Al'shinajjin H. D. (2020) Issledovanija ugla estestvennogo otkosa komponentov zernosmesi. *Nauka v central'noj Rossii*. – 2020. – № 5(47). – S. 31-41. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-5-31-41
2. Tianyue Xu, Jianqun Yu, Yajun Yu, Yang Wang. (2018). A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method. *Advanced Powder Technology*, 3274–3290 <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.09.006>
3. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. (2022). Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method. *Journal of Agricultural Engineering* 53(2), DOI: 10.4081/jae.2022.1286
4. Horabik J., Molenda M., (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering* 147 (2016) 206-225, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017
5. Zhou L., Dong Q., Yu J., Wang Y., Chen Y., Li M., Wang W., Yu Y., Yuan J. (2023) Validation and Calibration of Maize Seed–Soil Inter-Parameters Based on the Discrete Element Method. *Agronomy* 13(8):2115, DOI: 10.3390/agronomy13082115
6. Zhou, L.; Yu, J.; Liang, L.; Yu, Y.; Yan, D.; Sun, K.; Wang, Y. Study (2021) ,on key issues in the modelling of maize seeds based on themulti-sphere method. *Powder Technol.* 394, 791–812.
7. Zhou, L.; Yu, J.; Wang, Y.; Yan, D.; Yu, Y. (2020) A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete elementmethod. *Powder Technol.* 374, 353–376
8. Wiącek J., Horabik J., Molenda M., Parafniuk P., Bańda M., Stasiak M. (2023). Converging orifice used to control the discharge rate of spherical particles from a flat floor silo. *Scientific Reports* 13(1), DOI: 10.1038/s41598-023-27431-8
9. Xiao, Y. et al. (2021) Experimental study of granular flow transition near the outlet in a fat-bottomed silo. *Biosyst. Eng.* 202, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.013>.
10. Saleh, K., Golshan, S. & Zarghami, R. A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos—Basics and practical aspects. *Chem. Eng. Sci.* 192, 1011–1035. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028> (2018).
11. Zheng, Q. J., Xia, B. S., Pan, R. H. & Yu, A. B. (2017) Prediction of mass discharge rate in conical hoppers using elastoplastic model. *Powder Technol.* 307, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.037>.
12. Murray, A., Alonso-Marroquin, F. (2016). Increasing granular flow rate with obstructions. *Pap. Phys.* 8(1), 080003
13. López-Rodríguez, D. et al. Effect of hopper angle on granular clogging. *Phys. Rev. E* 99, 032901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.032901> (2019).
14. Bangura, K., Gong, H., Deng, R., Tao, M., Liu, C., Cai, Y., Liao, K., Liu, J., Qi, L. (2020) Simulation analysis of fertilizer discharge process using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE* 2020, 15, DOI: 10.1371/journal.pone.0235872

15. Liping Z, Zhang L, Zheng W. (2018) Fertilizer Feeding Mechanism and Experimental Study of a Spiral Grooved-Wheel Fertilizer Feeder. *J Eng Sci Tech Review*. 2018; 11: 107–115.
16. Ding S, Lu B, Yuxiang Y, Bin Y, Zuoli F, Zhiqi Z, et al. Discrete element modeling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates. *Comp Elect Agri*. 2018; 152: 32–39.
17. Zhan Z., Li Y., Liang Z., Gong Z. DEM simulation and physical testing of rice seed impact against a grain loss sensor. *Biosys Eng*. 2013; 116: 410–419.
18. Chen, H.; Zheng, J.; Lu, S.; Zeng, S.; Wei, S. (2021) Design and experiment of vertical pneumatic fertilization system with spiral Genevamechanism. *Int. J. Agric. Biol. Eng*. 2021, 14, 135–144.
19. Wang, J.; Wang, R.; Ju, J.; Song, Y.; Fu, Z.; Lin, T.; Chen, G.; Jiang, R.; Wang, Z. (2023). Study on the Influence of Grooved-Wheel Working Parameters on Fertilizer Emission Performance and Parameter Optimization. *Agronomy* 2023, 13, 2779. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112779>
20. Yu, S.; Bu, H.; Dong, W.; Jiang, Z.; Zhang, L.; Xia, Y. (2022). Calibration of Physical Characteristic Parameters of Granular Fungal Fertilizer Based on Discrete Element Method. *Processes* 2022, 10, 1564. <https://doi.org/10.3390/pr10081564>
21. Cheng, B.; He, R.; Xu, Y.; Zhang, X. (2022) Simulation Analysis and Test of Pneumatic Distribution Fertilizer Discharge System. *Agronomy* 2022, 12, 2282. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102282>
22. Adilet, S.; Zhao, J.; Sayakhat, N.; Chen, J.; Nikolay, Z.; Bu, L.; Sugirbayeva, Z.; Hu, G.; Marat, M.; Wang, Z. (2021) Calibration Strategy to Determine the Interaction Properties of Fertilizer Particles Using Two Laboratory Tests and DEM. *Agriculture* 2021, 11, 592. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070592>
23. Di Renzo, A.; Di Maio, F.P. (2004) Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chem. Eng. Sci*. 2004, 59, 525–541. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>
24. Coetzee, C.J. (2020) Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles. *Powder Technol*. 2020, 364, 851–878. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.076>
25. Antony, S.J.; Kuhn, M.R.; Barton, D.C.; Bland, R. Strength and signature of force networks in axially compacted sphere and non-sphere granular media: Micromechanical investigations. *J. Phys. D Appl. Phys*. 2005, 38, 3944–3952. DOI 10.1088/0022-3727/38/21/017
26. Grima, A.P.; Wypych, P.W. (2011) Development and validation of calibration methods for discrete element modelling. *Granul. Matter* 2011, 13, 127–132. DOI 10.1007/s10035-010-0197-4
27. Cundall, P.A.; Strack, O.D. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotech* 1979, 29, 47–65.
28. Tekeste, M.; Mousaviraad, M.; Rosentrater, K. (2018). Discrete Element Model Calibration Using Multi-Responses and Simulation of Corn Flow in a Commercial Grain Auger. *Trans. ASABE* 2018, 61, 1743–1755.
29. Ding, S.; Bai, L.; Yao, Y.; Yue, B.; Fu, Z.; Zhang, Z.; Huang, Y. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates. *Comput. Electron. Agric*. 2018, 152, 32–39. doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.044
30. Han DD, Xu Y, Huang YX, He B, Dai JW, Lv XR, Zhang LH (2023) DEM parameters calibration and verification for coated maize particles. *Comput Part Mech*. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00598-7>
31. Sugirbay, A.; Zhao, K.; Liu, G.; Hu, G.; Chen, J.; Mustafin, Z.; Iskakov, R.; Kakabayev, N.; Muratkhan, M.; Khan, V.; et al. (2023) Double Disc Colter for a Zero-Till

Seeder Simultaneously Applying Granular Fertilizers and Wheat Seeds. *Agriculture* 2023, 13, 1102. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051102>

32. Wang Q., Li Z., Wang W., Zhang C., Chen L., Wan L. (2020) Multi-objective optimization design of wheat centralized seed feeding device based on particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6):

76–84. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201306.5665

33. Zhao, H.; Huang, Y.; Liu, Z.; Liu, W.; Zheng, Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture* 2021, 11, 425. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>

34. Chen, Z.P.; Carl, W.; Eric, V. (2020) Determination of material and interaction properties of maize and wheat kernels for DEM simulation. *Biosyst. Eng.* 2020, 195, 208–226. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.007>

35. Lei, X.; Wu, W.; Deng, X.; Li, T.; Liu, H.; Guo, J.; Li, J.; Zhu, P.; Yang, K. Determination of Material and Interaction Properties of Granular Fertilizer Particles Using DEM Simulation and Bench Testing. *Agriculture* 2023, 13, 1704. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091704>

36. Chen, G.B.; Wang, Q.G.; Xu, D.J.; Li, H.W.; He, J.; Lu, C.Y. Design and experimental research on the counter roll differential speed solid organic fertilizer crusher based on DEM. *Comput. Elect. Agric.* 2023, 207, 107748. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107748>

37. Xi, X.B.; Wang, R.Y.; Wang, X.T.; Shi, Y.J.; Zhao, Y.; Zhang, B.F.; Qu, J.W.; Gan, H.; Zhang, R.H. Parametric optimization and experimental verification of multi-fertilizer mixing by air blowing and blade stirring based on discrete element simulations. *Comput. Elect. Agric.* 2023, 210, 107895. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107895>

38. Zeng et al., 2021 Z.W. Zeng, X. Ma, X.L. Cao, Z.H. Li, X.C. Wang. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 52 (04) (2021), pp. 1-20. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.001

39. Wang, S.; Yu, Z.H.; Aorigele; Zhang, W.J. Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method. *Comput. Elect. Agric.* 2022, 198, 107012. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107012>.

40. Mudarisov, S. G. Ispol'zovanie metodov diskretnyh jelementov dlja razrabotki cifrovyh dvojniov sel'skohozjajstvennyh mashin/ S. G. Mudarisov, R. Ju. Bagautdinov // *Agropromyshlennyj kompleks v uslovijah sovremennoj real'nosti: Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, Tjumen', 01 marta 2023 goda. – Tjumen': Gosudarstvennyj agrarnyj universitet Severnogo Zaural'ja, 2023. – S. 145-151.*

41. Mudarisov, S. G. Analiz kontaktnyh modelej metoda diskretnyh jelementov/ S. G. Mudarisov, I. M. Farhutdinov, R. Ju. Bagautdinov // *Sovremennoe sostojanie, tradicii i innovacionnye tehnologii v razvitii APK : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii v ramkah XXXI Mezhdunarodnoj specializirovannoi vystavki «Agrokompleks-2021», Ufa, 23–26 marta 2021 goda / Ministerstvo sel'skogo hozjajstva Rossijskoj Federacii; Ministerstvo sel'skogo hozjajstva Respubliki Bashkortostan; Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Bashkirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet»; OOO «Bashkirskaja vystavochnaja kompanija». Tom Chast' 2. – Ufa: Bashkirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2021. – S. 106-109.*