УДК 631.348:631.54

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-142-148

Э.Р. Хасанов, Р.Р. Камалетдинов, В.А. Ступин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОСЛОЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЕМЯН В БАРАБАННЫХ ПРОТРАВЛИВАТЕЛЯХ

Ключевые слова: барабан; протравливатель семян барабанного типа; обработка семян; метод дискретных элементов (DEM); защитно-стимулирующие препараты.

Введение. Обработка сельскохозяйственных культур перед посевом защитно-стимулирующими препаратами является одной из основных технологических операций, гарантирую-

щих получение стабильных урожаев [1, 2]. Для выполнения данной операции наибольшее распространение получили технические устройства шнекового, камерного и барабанного типа [3], из которых в данное время наиболее перспективными и простыми по конструкции являются протравливатели барабанного типа, имеющие высокую производительность и оказывающие минимальное травмирующее воздействие на семена [4]. Кроме того, у протравливателей барабанного типа процесс обработки семян защитно-стимулирующими препаратами, в том числе биопрепаратами, имеет достаточно высокое качество [5]. Вместе с тем у существующих конструкций протравливателей барабанного типа в числе недостатков отмечается низкая интенсивность перемешивания обрабатываемого материала, что в соответствии с агротехническими требованиями по равномерности покрытия требует установки увеличенных норм расхода рабочей жидкости и соответственного снижения концентрации в ней препарата. Это приводит к снижению общей эффективности процесса и более высокой влажности семян на выходе по сравнению с камерными и шнековыми протравливателями [3]. Рассмотреть движение семян с препаратами в барабане протравливающего технического устройства с условием решения поставленных проблем возможно только с получением полной картины происходящих процессов. Несмотря на большое количество работ, посвященных данной проблематике [6, 7], необходимо отметить, что решение оптимизации параметров процесса внутренней поверхности тел вращения, в частности цилиндра с соответствующими аналитическими зависимостями, позволяющих всесторонне рассмотреть соответствующие процессы в барабанных технических устройствах, не найдено [8]. Наиболее близкими к реальным являются данные, полученные в средах виртуального моделирования на основе метода дискретных элементов (DEM), который открывает новые возможности повышения эффективности процесса нанесения защитно-стимулирующих препаратов на семена и поиска новых конструктивных решений [9, 10]. Моделирование DEM оказалось эффективным методом при изучении технологических процессов в агропромышленном производстве, в частности при изучении процессов движения сыпучих тел по внутренней поверхности устройств, выполненных в виде вращающихся цилиндров [11, 12]. При этом применение метода дискретных элементов позволяет учитывать не только влияние таких физико-механических сил, как трение, гравитация, но и получить качественные и количественные показатели процесса движения частиц при дополнительном воздействии воздушного и гидравлического потоков [13].

Цели и задачи исследования: предложить техническое решение, обеспечивающее взаимное перемещение семян в различных плоскостях с целью повышения равномерности распределения рабочего препарата по поверхности и эффективности процесса протравливания; построить модель, произвести оценку модели технологического процесса, проверить адекватность разработанной модели экспериментальными исследованиями.

Условия, материалы и методы исследования. При вращении барабана семенной материал поднимается на определённую высоту, характеризующуюся углом подъёма. Угол подъёма слоя семян при вращении в цилиндрическом барабане в большинстве случаев определяется на основании общеизвестной зависимости [14]

$$\alpha = \varphi + \arcsin \frac{\omega^2 r \sin \varphi}{g}, \quad (1)$$

где α – предельный угол подъёма слоя зерна в барабане, φ – угол ската зерна, r – радиус барабана, ω – угловая скорость вращения барабана, g – ускорение свободного падения.

Вместе с тем при определении угла подъёма в качестве значения угла ската ряд авторов использует угол естественного откоса зерновой смеси, угол трения семян о внутреннюю поверхность барабана [15]. Технологический процесс барабанного протравливателя заключается в непрерывном движении обрабатываемого материала вместе с барабаном вверх, падением и (или) ссыпанием части семян вниз с последующими повторениями цикла. Падающие семена обволакиваются препаратом, распыленным в виде капель аэрозоля, а ссыпающиеся семена обеспечивают взаимное перемешивание семенного материала. Таким образом, в первом случае определяющим является значение угла трения семян о внутреннюю поверхность барабана, во втором – угол естественного откоса. При этом соотношение моментов, вызванных силой тяжести M_g и силами трения M_{mp} , приводят к следующим вариантам движения семенного материала: перемещение вверх вместе с барабаном ($M_{mp} \geq M_g$); неподвижность семян ($M_{mp} = M_g$); скольжение вниз ($M_{mp} \leq M_g$). Последний вариант на практике наблюдается в случае челночного режима, при котором динамическое трение скольжения существенно меньше статического трения покоя. Для покрытия семян аэрозолем необходим угол подъёма, заканчивающийся падением семян, а для более интенсивного перемешивания целесообразнее безотрывное движение, т. е. подъем на угол до 90° [24]. На рисунке 1 приведены графики зависимости углов подъёма от коэффициентов трения семян пшеницы о внутреннюю поверхность барабана для разных кинематических режимов его работы. Из представленных графиков следует, что на углы подъёма семян суще-

ственное влияние оказывают радиус и угловая скорость вращения барабана. При постоянных значениях кинематического режима $k = (\omega^2 r)/g$, данный показатель линейно связан с коэффициентом трения семян о внутреннюю поверхность барабана. Повышения качества процесса перемешивания в барабане протравливателя на основе использования эффекта подъёма семян на различные углы возможно добиться при различных кинематических режимах, т. е. изменением радиуса или угловой скорости на отдельных участках по длине или чередованием их по времени, что достаточно сложно для конструктивного исполнения. С учетом этого нами предлагается решение, заключающееся в установке внутри цилиндрического барабана кольцевых вставок из материалов, имеющих различие коэффициентов трения с семенами. Сравнение лабораторных исследований с разными математическими моделями, на наш взгляд, позволяет утверждать, что наиболее близко к реальному описанию процессов перемещения семян с учетом сил трения обеспечивает использование DEM, заключающееся в приближенном решении уравнения движения для каждого семени. Деформация отдельного семени считается бесконечно малым по сравнению с деформацией всей среды. Наиболее реалистичной для нашего случая является модель контакта Герца – Миндлина, предназначенная для анализа сыпучих сред. Виртуальные образы семян созданы в виде сфероидов, которые наряду со сферами являются вторыми наиболее часто используемыми формами в симуляциях. Сложные формы частиц

часто моделируются для приложений DEM кластерами жестко соединенных перекрывающихся сфер, известных как мультисферный метод.

Дискретное представление вещества позволяет с высокой точностью моделировать поведения каждой частицы материала в пространстве на основе атомистических моделей и сил. Такой подход часто используется в разработке новых материалов, при моделировании гранулированного материала и для исследования природных явлений, когда требуется точное предсказание физических свойств реальных систем.

Для моделирования движения семени используются классические уравнения движения Ньютона

$$m_i a_i = \sum_j F_{ji}, \quad (2)$$

где m_i – масса каждого семени, a_i – ускорение и сумма сил, действующих на семена.

В определенный момент времени t ускорение $a_i(t)$ равно производной от скорости $v_i(t)$ или отношению изменения скорости $\Delta v_i(t)$ за короткий интервал времени Δ к длине этого интервала.

$$v_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = (x_i(t + \Delta t) - x_i(t)) / \Delta t. \quad (3)$$

$$v_i(t - \Delta t) = \frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = (x_i(t + \Delta t) - x_i(t)) / \Delta t. \quad (4)$$

Подставляя последние два выражения для $v_i(t)$ и $v_i(t - \Delta t)$ в формулу для $a_i(t)$, получаем, что

$$a_i(t) = ((x_i(t + \Delta t) - x_i(t)) / \Delta t - (x_i(t) - x_i(t - \Delta t)) / \Delta t) / \Delta t; \quad (5)$$

$$a_i(t) = \frac{x_i(t + \Delta t) - 2x_i(t) + x_i(t - \Delta t))}{\Delta t^2}. \quad (6)$$

Рисунок 1

Предельные углы подъёма α семян в зависимости от коэффициента трения о внутреннюю поверхность барабана f для показателей кинематического режима: 1 – 0,77; 2 – 1,51; 3 – 1,73 и 4 – 2,04

Получая значения для $a_i(t)$, вставляем его в исходное уравнение движения Ньютона.

$$\frac{m_i (x_i(t + \Delta t) - 2x_i(t) + x_i(t - \Delta t))}{\Delta t^2} = \sum_j F_{ji}. \quad (7)$$

$$x_i(t + \Delta t) = 2x_i(t) - x_i(t - \Delta t) + \left(\frac{\Delta t^2}{m}\right) \sum_j F_{ji}. \quad (8)$$

Следовательно, зная массу частицы семени i и его координаты $x_i(t)$ и $x_i(t - \Delta t)$ в определен-

ный момент времени $(t - \Delta t)$ и t , а также сумму сил $\sum F_{ji}$, действующих на семена i в момент времени t , можно получить значение координаты семени $x_i(t + \Delta t)$ в следующий момент времени $(t + \Delta t)$. Применяя эту формулу для каждого семени с шагом Δt , можно получить координаты всех семян в исследуемой системе. Совокупность этих координат в течение промежутка времени расчета образует траекторию системы и ее визуальное представление за этот интервал времени. Следует учитывать, что в отличие от других гранулированных материалов, семенной материал обычно гигроскопичен и изменяет свои механические свойства за счет поглощения влаги. Используя алгоритмы обнаружения контактов и применяя подходящие для контактной модели, программное обеспечение DEM способно рассчитывать силы, действующие на частицы. Ускорение, скорость и положение в системе координат рассчитываются с использованием законов движения Ньютона и численной интеграции. В результате можно рассчитать процессы как в статическом, так и в динамическом состоянии семенного материала. Учитывая ограниченность возможностей встроенного графического редактора, трёхмерная модель барабана была создана в среде «Компас-3D» и импортирована в среду виртуального моделирования. В препроцессоре геометрический образ барабана был преобразован в конечно элементный объект, установлена связь с «фундаментом» в виде шарнира вращения, определены кинематические связи, воздействие силы тяжести, заданы свойства материалов и характеристики их контактных взаимодействий. Далее проведена серия верификационных расчётов для проверки правильности задания связей, начальных и граничных условий, настроек взаимодействия объектов и выполнены соответствующие корректировки. В качестве показателя, характеризующего интенсивность процесса перемешивания, использовалось число контактных взаимодействий семян между собой на отдельных участках по длине барабана.

Результаты исследования. Для исследований предлагается конструкция протравливателя барабанного типа [16], состоящая из установленного с наклоном вращающегося барабана, внутри которого закреплены кольцевые вставки, образующие сплошную цилиндрическую поверхность [17]. Материал изготовления кольцевых вставок зависит от силы трения и угла подъема семян на отдельных участках барабана для обеспечения оптимального режима работы протравливателя. В процессе обработки семена по-

даются в загрузочный бункер и попадают во вращающийся барабан на сплошную внутреннюю цилиндрическую поверхность, образованную кольцевыми вставками. Одновременно в зону падения семян подается аэрозоль. Ширина кольцевых вставок выбирается в зависимости от технологических показателей процесса (вид семян, их влажность и т. п.) и обеспечения оптимальной разницы высоты подъёма семян на отдельных участках по длине барабана. Для сопоставления экспериментальных данных проведены виртуальные исследования движения семян при разных углах размещения центральной оси протравливателя барабанного типа в программной среде EDEM Solution, основанной на методе дискретных элементов. Соответствие полученных результатов в реальных условиях виртуальным представлено на рисунке 2. В результате экспериментов на виртуальной модели выявлено, что семена, лежащие на внутренней поверхности колец, перемещаются по окружности по направлению вращения барабана, увлекая за собой верхние слои семян, при этом скорость перемещения верхних слоев уменьшается по мере удаления от семян, лежащих на внутренней поверхности колец, что обеспечивает их перемешивание. Достигнув предельного угла подъёма, часть семян под действием сил тяжести падает, а часть начинает радиальное движение вниз по дуге окружности и по образующей в сторону наклона барабана. При этом в зоне стыковок кольцевых вставок наблюдается резкое изменение характера взаимодействия семян с поверхностью барабана. В случаях перехода от участка с большим коэффициентом трения к участку с меньшим его значением нижние слои семян соскальзывают вниз, т. к. на данных вставках угол предельного подъёма семян меньше и движущиеся вниз семена не встречаются с семенами, движущимися вверх. При переходе от участка с меньшим коэффициентом трения к участку с большим значением соответственно наоборот – увлекаются вверх. Это способствует взаимному перемешиванию семян не только за счет радиального, но и осевого послойного перемещения, что значительно повышает интенсивность взаимодействий между собой и соответственно равномерность распределения препарата на их поверхности.

В процессе обработки семенного материала качество покрытия их рабочим препаратом зависит от количества соприкосновений семян между собой и поверхностью барабана. Определено среднее количество соприкосновений между семенами и поверхностями с различной шероховатостью (рисунок 3).

Рисунок 2

Движение семенного материала в протравливателе барабанного типа: а – в виртуальной среде; б – в реальной среде

Рисунок 3

График интенсивности соприкосновений семян на отдельных участках по длине барабана в случае чередующихся материалов (резина и сталь)

Выводы. В барабане со стальной поверхностью среднее количество взаимодействий между семенами (между семенами и поверхностями) равнялось 6870 ед., при использовании резины данный показатель равнялся 7200 ед. При исполнении барабана, в котором внутренняя поверхность выполнена из чередующихся материалов (резина и сталь), среднее количество взаимодействий превышало 11000 ед., что свидетельствует о целесообразности применения данного конструктивного решения при разработке протравливателей семян барабанного типа.

Предложенные аналитические выражения и виртуальное моделирование с использованием метода дискретных элементов (DEM) для численного расчета процесса показали хорошую сходимость результатов, позволили получить техническое решение, обеспечивающее взаимное перемещение семян не только в радиальной, но и в продольной плоскости, за счёт чего повышается равномерность распределения рабочего препарата по поверхности семян и повышается эффективность процесса протравливания.

Библиографический список

1. Zegeye W., Dejene M., Ayalew D. Management of loose smut (*Ustilago nuda*) of barley (*Hordeum vulgare*) through seed dressing and coating materials on barley in Western Amhara Region, Ethiopia. *Seed Science and Technology*, Volume 45, Number 1, April 2017, pp. 56–71 (16). <https://doi.org/10.15258/sst.2017.45.1.12>.
2. Lopez-Reyes JG, Gilardi G., Garibaldi A. In vivo evaluation of essential oils and biocontrol agents combined with heat treatments on basil cv Genovese Gigante seeds against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Basilici*. *Phytoparasitica* (2016) 44: 35. <https://doi.org/10.1007/s12600-016-0504-7>.
3. Хасанов, Э.Р. Предпосевная обработка семенного материала защитно-стимулирующими препаратами [Текст] / Э.Р. Хасанов. Уфа: Лань, 2013. 176 с.
4. Камалетдинов, Р.Р. Снижение повреждаемости семян при протравливании [Текст] / Р.Р. Камалетдинов, Э.Х. Хасанов, Ф.Н. Галля-

мов, М.Х. Байгускаров // Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XIX Международной специализированной выставки «АгроКомплекс-2009». Часть I. Уфа: Башкирский ГАУ, 2009. 324 с.

5. Камалетдинов, Р.Р. Особенности машин для обработки сельскохозяйственных культур биопрепаратами [Текст] / Р.Р. Камалетдинов Э.Р. Хасанов, Р.М. Хайруллин, Р.Х. Сираев, Т.С. Минина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 6. С. 2–3.

6. Rim R. Khamaletdinov, Ildar I. Gabitov, Salavat G. Mudarisov, Eduard R. Khasanov, Vladimir M. Martynov andrei V. Negovora, Vladimir A. Stupin, Faile N. Gallyamov, Ildar M. Farkhutdinov and Dmitry Y. Shirokov, 2018. Improvement in Engineering Design of Machines for Biological Crop Treatment with Microbial Products. Journal of Engineering and Applied Sciences, 13: 6500-6504. DOI: 10.3923/jeasci.2018.6500.6504.

7. Mudarisov S., Khasanov E., Rakhimov Z., Gabitov I., Badretdinov I., Farchutdinov I., Gallyamov F., Davletshin M., Aipov R., Jarullin R. Specifying Two-Phase Flow in Modeling Pneumatic Systems Performance of Farm Machines. J. of Mechanical Engineering Research and Developments, vol. 40, no. 4, pp. 706–715, 2017. DOI: 10.7508/jmerd.2017.04.018.

8. Chen L.M., Lin Q., Zhu Z.Z. Simulation and analysis of attitude of non-spherical particles in drum granulation. Advanced Materials Research, 2014, 889–890, с. 170–173.

9. Horabik Jozef, Molenda Marek. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials BIOSYSTEMS ENGINEERING. T. 147, p. 206–225, JUL 2016.

10. Yaraghi A., Ebrahimi M., Ein-Mozaffari F., Lohi A. Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and

discrete element method (DEM). Advanced Powder Technology, 2018, 29(11), p. 2693–2706.

11. Zhao Z., Yu C., Zhong J., Huang J., Zhang X. Numerical Simulation on Continuous Non-submerged Water Jet Vibration Cleaning Process for Granular Agricultural Products [颗粒农产品连续非淹没式水射流振动清洗过程数值模拟]. Nongye Jixie Xuebao. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (8), p. 331–337.

12. Binelo M.O., de Lima R.F., Khatchatourian O.A., Stránský J. Modelling of the drag force of agricultural seeds applied to the discrete element method. Biosystems Engineering, 2019, 178, p. 168–175.

13. Tijssens E., Ramon H., De Baerdemaeker J. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. J. of Sound and Vibration, 2003, 266 (3), p. 493–514.

14. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин [Текст] / Под ред. В.П. Горячкина. Т. 3. М., 1936. С. 593, 780.

15. Ucgul M., Saunders C., Fielke J. The effect of discrete element particle parameters on angle of repose and soil-tool force simulation results. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016.

16. Пат. на изобретение 2668842 РФ, А 01 С1/06. Устройство для предпосевной обработки семян [Текст] / Р.Р. Камалетдинов, С.Г. Мударисов, Э.Р. Хасанов, Ф.Н. Галлямов, В.А. Ступин (Россия) – № 2018100973; заявл. 10.01.2018; опубл. 03.10.2018, бюл. № 28.

17. Камалетдинов, Р.Р. Повышение эффективности послойного перемещения семян в барабанных протравливателях [Текст] / Р.Р. Камалетдинов, Э.Р. Хасанов, В.А. Ступин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (47). С. 56–62. DOI: 10.31563/1684-7628-2018-47-3-56–62.

Сведения об авторах

1. **Хасанов Эдуард Рифович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, тел.: (347) 228-08-71; e-mail: hasan_ed@mail.ru.

2. **Камалетдинов Рим Рашитович**, доктор технических наук, доцент кафедры строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, тел.: (347) 228-08-71; e-mail: krr53@mail.ru.

3. **Ступин Владимир Анатольевич**, аспирант кафедры строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ. 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: poshta-03@mail.ru.

Качество нанесения препарата на семена в протравливателях семян барабанного типа в значительной мере определяется кинематическими

показателями режима работы и коэффициентами трения семян о внутреннюю поверхность камеры смешивания. Технологический процесс

в устройствах данного типа заключается в непрерывном движении обрабатываемого материала, который вместе с барабаном поднимается вверх, падает и сыпается частью семян вниз с последующими повторениями цикла. Аналитическое описание подобных случаев в явном виде является сложной и практически нерешённой задачей. С учетом этого нами использован метод дискретных элементов (DEM) для численного расчета процесса, описанного выше, и исследо-

вано влияние диаметра, угла наклона и скорости вращения, а также коэффициентов трения семян о внутреннюю поверхность цилиндрического барабана. На основе проведенных исследований предложено конструктивное решение, заключающееся в установке внутри цилиндрического барабана кольцевых вставок определённой ширины из материалов, имеющих различные коэффициенты трения с семенами, и обоснованы его рациональные параметры.

E. Khasanov, R. Kamaletdinov, V. Stupin

METHOD OF DISCRETE ELEMENTS IN SIMULATION LAYER-BY-LAYER MOVEMENT OF SEEDS IN DRUM TREATERS

Key words: *drum; drum seed treater; seed treatment; method of discrete elements (DEM); protective-stimulating preparations.*

Authors' personal details

1. **Khasanov Eduard**, Doctor of technical sciences, associate professor of the Road Construction, Municipal and Farm Machinery department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Octiabria St., 34, phone: (347) 228-08-71, e-mail: hasan_ed@mail.ru.

2. **Kamaletdinov Rim**, Doctor of technical sciences, associate professor of the Road Construction, Municipal and Farm Machinery department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Octiabria St., 34, e-mail: krr53@mail.ru.

3. **Stupin Vladimir**, Post-graduate student of the Road Construction, Municipal and Farm Machinery department Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letia Octiabria St., 34, e-mail: poshta-03@mail.ru.

The quality of seed treatment in drum seed treaters is largely determined by the kinematic parameters of the mode of operation and the friction coefficients of seeds with the inner surface of the mixing chamber. The technological process in this type of devices is a continuous movement of the processed material. It goes up and down with the drum with some parts falling downward. The cycle is subsequently repeated. The analytical description of such cases in an explicit form is a complex and practically unsolved problem. Accordingly, we used the method of dis-

crete elements (DEM) for the numerical calculation of the process described above, and investigated the effect of the diameter, angle of inclination and speed of rotation, as well as the friction coefficients of the seeds on the inner surface of the cylindrical drum. Based on the conducted studies there is a design solution that involves installing annular inserts of a particular width inside the cylindrical drum. The inserts are made of materials having a difference in friction coefficients of seed. The paper provides rational parameters of the design offered.

© Хасанов Э.Р., Камалетдинов Р.Р., Ступин В.А.