

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК ПО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ НАУКАМ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

© 2025 г. Ю.Ф. Лачуга^{a,*}, С.Г. Мударисов^{b,c,**}, И.М. Фархутдинов^{b,***},
Ю.Х. Шогенов^{a,****}, Б.Г. Зиганшин^{d,e,*****}, Н.Н. Устинов^{d,*****}

^aРоссийская академия наук, Москва, Россия

^bБашкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

^cАкадемия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

^dГосударственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

^eКазанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

*E-mail: akadema1907@mail.ru

**E-mail: salavam@gmail.com

***E-mail: ildar1702@mail.ru

****E-mail: yh1961s@yandex.ru

*****E-mail: zigan66@mail.ru

*****E-mail: UstinovNikNik@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2025 г.

После доработки 28.03.2025 г.

Принята к публикации 30.03.2025 г.

Цифровые двойники — инструмент повышения эффективности проектирования, оптимизации и ускорения вывода на рынок сельскохозяйственной техники, который позволит проводить её комплексное моделирование и анализ на всех этапах жизненного цикла. Рассматриваются методологические подходы к созданию цифровых двойников, анализируются их преимущества, помогающие ускорить переход между разными стадиями готовности технологий. Предложены практические рекомендации, нацеленные на быстрый вывод продукции на рынок. Применение цифровых двойников сокращает время разработки, помогает улучшить конструктивные параметры и снизить затраты на полевые испытания отечественной сельскохозяйственной техники, а следовательно, значительно повышает её эффективность и конкурентоспособность.

Ключевые слова: цифровые двойники, сельскохозяйственное машиностроение, проектирование сельхозтехники, метод конечных элементов, метод дискретных элементов, вычислительная гидродинамика, моделирование почвы, пневматические системы, жизненный цикл продукции, ускорение вывода на рынок, уровни готовности технологий.

DOI: 10.31857/S0869587325060068, EDN: FASITA

Современное сельскохозяйственное машиностроение сталкивается с повышением требований к эффективности, надёжности и скорости разработки новой техники. В условиях глобальной конкуренции и необходимости быстрой адаптации к изменяющимся условиям рынка традиционные

ЛАЧУГА Юрий Фёдорович — академик РАН, член президиума РАН. МУДАРИСОВ Салават Гумерович — доктор технических наук, заведующий кафедрой мехатронных систем и машин аграрного производства БГАУ. ФАРХУТДИНОВ Ильдар Мавляирович — кандидат технических наук, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства БГАУ. ШОГЕНОВ Юрий Хасанович — академик РАН, начальник сектора механизации, электрификации и автоматизации Отделения сельскохозяйственных наук РАН. ЗИГАНШИН Булат Гусманович — доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе КГАУ. УСТИНОВ Николай Николаевич — кандидат технических наук, директор Инженерно-технологического института ГАУ Северного Зауралья.

методы проектирования и постановки на производство новых машин оказываются недостаточно гибкими и ресурсоёмкими. Решить эту проблему могут *цифровые двойники* — виртуальные модели, которые отражают не только конструктивные особенности техники, но и технологические процессы, связанные с её эксплуатацией. Они позволяют проводить комплексное моделирование, анализ и оптимизацию на всех этапах жизненного цикла изделия. В работах [1, 2] подчёркивается их роль в интеграции информации о продукте, производстве и эксплуатации, что помогает создавать более точные и адаптивные модели. В ряде исследований показано, что цифровые двойники способны значительно сократить время вывода продукции на рынок за счёт оптимизации проектирования и тестирования и повышения её эффективности [3, 4]. Эта технология ускоряет разработку и сертификацию авиационных двигателей [5], а также экономически обоснована, поскольку улучшает показатели производительности и рентабельности современных предприятий [6].

В последние годы интерес к цифровым двойникам возник и в области сельскохозяйственного машиностроения. Российские учёные разрабатывают методики и алгоритмы создания двойников высокотехнологичных рабочих органов, почвенной среды и биообъектов для оптимизации использования и прогнозирования их ресурса и качества обработки почвы [7, 8]. Согласно статье [9], применение цифровых двойников объектов или процессов позволит подбирать наилучшие режимы работы техники с целью повышения производительности и снижения потерь, включая улучшение рабочих параметров и снижение энергопотребления [10]. В исследованиях [11, 12] обсуждаются методологические подходы к созданию цифровых двойников с учётом информации с датчиков, данных машинного обучения и симуляции физических процессов. Эти подходы не только выводят проектирование на качественно новый уровень, но и обеспечивают непрерывное обновление моделей в ходе эксплуатации техники.

Тем не менее эта технология пока недостаточно распространена в сельском хозяйстве, а ведь она может сократить издержки на разработку, внедрение и обслуживание оборудования [13]. Отсутствуют научные публикации по практическому применению в сфере АПК цифровых двойников сельхозмашин [14]. В связи с этим перспективным становится развитие отечественных технологий сельскохозяйственного машиностроения на основе имеющихся научных разработок и создание цифровых двойников для повышения качества моделирования и планирования.

Цифровые двойники прошли путь от традиционного виртуального прототипа (предварительное проектирование) до виртуальной среды для прогнозирования поведения продукта [15], в которой вся необходимая информация о производительности,

работоспособности и обслуживании реального физического объекта поступает в модель с установленными датчиками и дополняется показаниями датчиков виртуальных. Однако, как свидетельствует практика, информации от физических датчиков зачастую недостаточно для выполнения ключевых задач цифрового двойника, например, оценки текущего состояния оборудования и систем в целом, определения оптимальных режимов и прогнозирования остаточного ресурса [15]. В этом случае, помимо физических датчиков, используются виртуальные, которые позволяют получать дополнительные данные о параметрах в любой точке оборудования с помощью компьютерного инженерного анализа, основанного на системных или имитационных моделях.

Цифровые двойники особенно важны при преодолении так называемой “долины смерти” — критическом переходе от разработки технологии к её коммерциализации и серийному производству. Этот этап с высокими рисками и значительными затратами часто становится препятствием для внедрения инноваций. Уровень готовности технологий (УГТ) служит ключевым показателем, характеризующим степень их зрелости. Переход от низких уровней (УГТ 1–3), связанных с фундаментальными исследованиями, к высоким (УГТ 7–9), соответствующим готовности к серийному производству, требует значительных усилий и ресурсов. Цифровые двойники ускоряют этот процесс за счёт виртуального тестирования, оптимизации и валидации технологий на ранних этапах. Они обеспечивают возможность моделирования различных сценариев эксплуатации, анализа производительности и надёжности машин, а также прогнозирования потенциальных проблем до их возникновения в реальных условиях. Это значительно снижает риски и затраты, связанные с физическими испытаниями и доработками, и позволяет быстрее переходить на следующий уровень готовности технологии.

Методика. Создание цифровых двойников сельскохозяйственных машин требует комплексного подхода, включающего несколько этапов. В первую очередь необходимо провести сбор и анализ исходных данных о конструктивных особенностях машины, технологических процессах её производства и эксплуатации. Для этого используются рабочие параметры (тяговое сопротивление, давление, вибрация и т.д.), зафиксированные реальными датчиками. Затем разрабатывается математическая модель, описывающая поведение машины в различных условиях. При этом применяются разные методы численного моделирования для учёта физических процессов (деформация, теплопередача, сопротивление, гидродинамика), которые зависят от вычислительного аппарата:

- метод конечных элементов (МКЭ);
- метод вычислительной гидродинамики (ВГД);
- метод дискретных элементов (МДЭ);

- гидродинамика сглаженных частиц (ГСЧ);
- динамика многотельных систем (ДМС) и др.

При моделировании почвообработки и создании цифрового двойника почвообрабатывающей машины, когда почва представляется в виде твёрдого, упругого, упругопластического тела или их комбинаций, используется метод конечных элементов; если почва представлена в виде дискретной среды, состоящей из мягких или твёрдых сфер, — метод дискретных элементов; для жидких частиц — метод сглаженных частиц, а модель почвы в виде вязкой среды реализуется методом вычислительной гидродинамики.

При разработке цифрового двойника, отражающего функционирование почвообрабатывающих орудий, на основе метода ВГД почва представляется в виде ньютоновской вязкой жидкости [16]. Исследования в этой области показали [17], что изменение давления, сил и моментов, действующих на рабочие органы, во многом зависит от вязкости и плотности имитируемой среды. Путём калибровки параметров модели на основе сопоставления результатов моделирования и тягового сопротивления рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин, полученных в лабораторных и полевых условиях, установлены соответствия механического состава и влажности реальных почв и физико-механических свойств (вязкость и плотность) предполагаемой почвенной среды для адекватной оценки энергетических параметров почвообрабатывающих машин [18]. Главный недостаток метода вычислительной гидродинамики при имитации процесса обработки почвы — невозможность визуализации образования трещин и крошения из-за гипотезы “сплошности” среды, что, в свою очередь, не позволяет провести агротехническую оценку качества обработки.

Метод конечных элементов также пригоден для численного моделирования почвы, поскольку он детально учитывает деформацию и напряжение, а обработка сложных граничных условий и контактных поверхностей довольно проста. Кроме того, этот метод совместим с различными моделями упругих и упругопластических материалов, которые калибруются по результатам испытаний почвы для прогнозирования силы рабочих органов с изменением их скорости и геометрических размеров. Согласно оценке [19], имитация взаимодействия “почва — рабочий орган” с последующим анализом конечных элементов даёт некоторые преимущества по сравнению с аналитическим и эмпирическим методами. В этом случае, если выбрать правильный определяющий закон, можно смоделировать любую геометрию орудия и нелинейное взаимодействие почвы и почвообрабатывающих орудий. Однако деформация почвы (особенно при обработке), связанная с разделением и перемешиванием её слоёв, образованием трещин и движением частиц, не может быть адекватно предсказана методом конечных элементов.

Методы на основе частиц используют как континуальный (например, ГСЧ), так и дискретный (МДЭ) подходы для описания поведения гранулированных материалов. В отличие от МКЭ, аппроксимации переменных поля зависят от частиц, а не от элемента на основе дискретизированной сетки. Ключевым аспектом метода дискретных элементов выступает формирование правил контакта между частицами, согласно которым уравнения движения частиц описываются с учётом объёмных и внешних сил, действующих на систему. Поведение системы определяется решением уравнений движения. При взаимодействии дискретных частиц возникают контактные силы, которые обычно разделяются на нормальные F_n и тангенциальные (касательные) F_t , составляющие по отношению к контактной поверхности. Кроме контактных сил, между частицами возникает сцепление за счёт адгезии и/или когезии, которое также необходимо учитывать при описании контактного взаимодействия, что характерно для почвы, особенно увлажнённой. Сдерживающим фактором эффективности метода дискретных элементов для моделирования почвы, с одной стороны, является высокая потребность в вычислительных ресурсах компьютера, с другой — высокие требования к калибровке параметров контактных моделей ввиду изменчивости физико-механических свойств почв и их анизотропности (изменение их свойств по вертикали и горизонтали).

Широкое применение находят пневматические системы: в посевных комплексах — для распределения и транспортирования семян; в протравливателях — для создания и распределения капель рабочей жидкости и семян; в системах очистки зерноуборочных комбайнов и зерноочистительных машинах — для сортировки примесей, а также транспортировки различных материалов. В этих системах происходит взаимодействие воздушного потока с твёрдыми или жидкими частицами. Для моделирования их цифровых двойников можно использовать методы вычислительной гидродинамики, в частности, метод двухфазных течений.

Основное условие успешности метода двухфазных течений, где в качестве несущей фазы выступает воздушный поток, создаваемый вентилятором технического средства, а в качестве дисперсной — семена, твёрдые примеси или капли, — интенсивность межфазного взаимодействия, определяемая в первую очередь объёмной концентрацией частиц в потоке. От неё зависят возможность реализации моделей пневматических систем вычислительными методами и сложность используемых моделей [20]. Так, при $10^{-6} < \alpha_c \leq 10^{-3}$ двухфазные течения относят к слабозапылённым. В этом случае контакт между частицами уменьшается, однако дисперсная фаза оказывает обратное воздействие на несущую фазу, что необходимо учитывать при моделировании. Двухфазные течения при $\alpha_c \geq 10^{-3}$ относят к силь-

нозапылённым. Здесь при реконструкции технологических процессов пневматических систем нужно учитывать обратное воздействие частиц друг на друга, а также их взаимодействие (режим взаимодействия фаз). Для разработки более сложных цифровых двойников сельскохозяйственных машин составляются различные комбинации методов моделирования (МДЭ+ВГД, МДЭ+ДМС, МДЭ+ГСЧ, МДЭ+МКЭ), полученные благодаря современным прикладным компьютерным программам инженерного расчёта.

Таким образом, при создании цифрового двойника почвообрабатывающей машины методом дискретных элементов используется прямоугольный параллелепипед, заполняемый на определённую высоту дискретными частицами с заданными формой, размерами и параметрами. Большинство исследователей при моделировании почвы данным методом выбирают усовершенствованную модель Герца–Миндлина, в которой для описания нормальных сил F_n используется модель Герца, для тангенциальных (касательных) сил F_t – модель Кулона, а для сил сцепления – модель Джонсана–Кендала–Робертса. Проведена калибровка параметров контактной модели Герца–Миндлина в сочетании с моделью Джонсана–Кендала–Робертса, для чернозёмных почв тяжело-, средне- и легкосуглинистого механического состава.

Первоначально калибровка производилась путём сопоставления угла естественного откоса почв и модельных частиц [21, 22], в дальнейшем – сопоставлением горизонтальной, вертикальной и поперечной составляющих тягового сопротивления корпуса плуга, полученных в полевых условиях, с модельными данными. Оценка значимости изучаемых параметров показала, что на характер изменения составляющих тягового сопротивления корпуса плуга значительно влияют поверхностная энергия и диа-

Таблица 1. Параметры контактной модели Герца–Миндлина для моделирования почвы

Параметр контактной модели	Значение
Модуль Юнга E , МПа	100
Коэффициент Пуассона ν	0.3
Коэффициент статического трения почвы о почву f_{st}	0.7
Коэффициент динамического трения почвы о почву f_d	0.7
Поверхностная энергия G_s , Дж/м ²	270–400
Диаметр частиц d , мм	10
Коэффициент статического трения $f_{st,k}$	0.3
Коэффициент динамического трения $f_{d,k}$	0.3

метр частиц. Установлено, что при варьировании поверхностной энергии G_s в пределах 270–400 Дж/м² результаты силового анализа корпуса плуга методом дискретных элементов наиболее точные и соответствуют полевым исследованиям. Показатели, полученные при калибровке параметров контактной модели, представлены в таблице 1.

Полученные данные позволяют выбрать параметры контактной модели Герца–Миндлина при моделировании состояния почвы при взаимодействии с рабочими органами почвообрабатывающих и посевных машин. Спроектированный почвенный канал заполняется частицами с заданными параметрами, куда внедряется рабочий орган или орудие (рис. 1). Для исключения влияния на технологический процесс стенок канала размеры сторон параллелепипеда должны быть намного больше зоны деформации, создаваемой рабочим органом, но не слишком большими для уменьшения и опти-

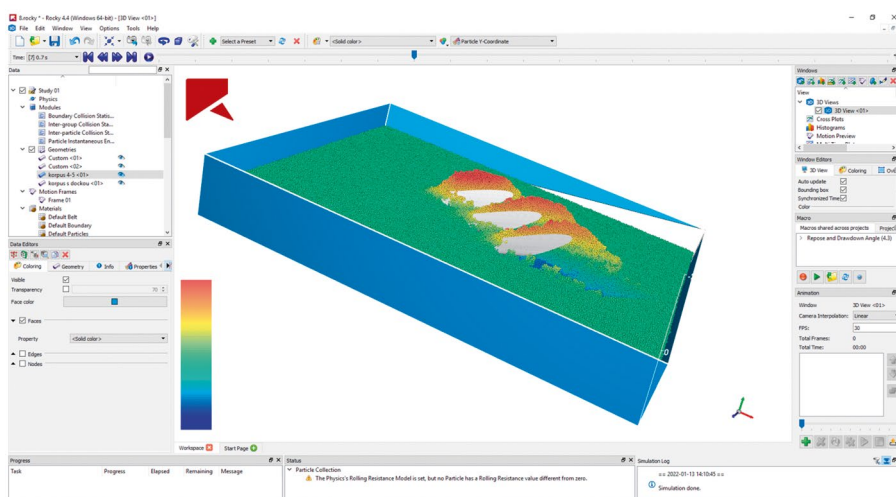


Рис. 1. Цифровой почвенный канал, заполненный дискретными частицами

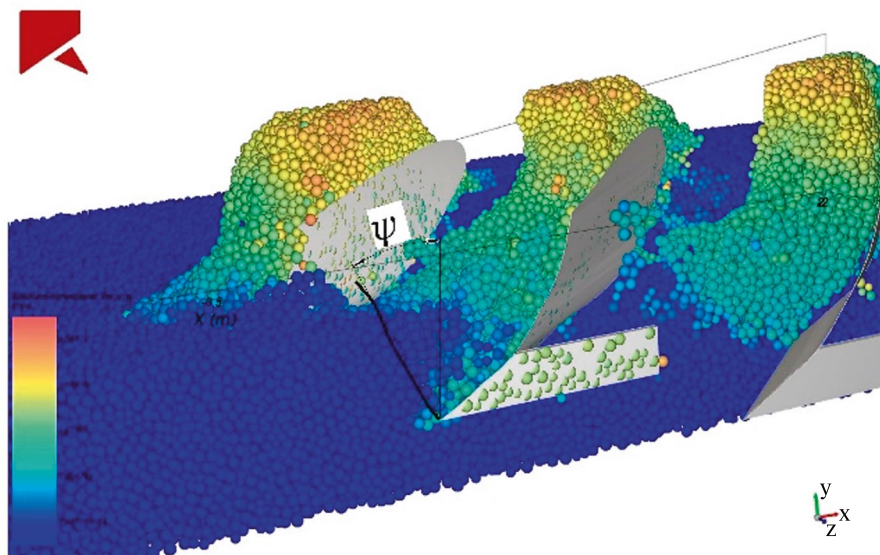


Рис. 2. Формирование трещины и оборота пласта корпусом плуга

мизации расчётного времени при решении задачи. Трёхмерные твердотельные модели почвообрабатывающей машины (например, плуга) и почвенного канала выполняются по оригинальным размерам и сохраняются в формате STL для импортирования в программу инженерного расчёта (Rocky DEM, EDEM и др.). Скорость движения и глубина хода плуга принимается идентичной результатам полевых экспериментов.

На рисунке 2 представлен процесс вспашки корпусом плуга в цифровом почвенном канале, наглядно демонстрирующий образование трещины, вырезание пласта, его перемещение по рабочей поверхности отвала и оборот на открытую преды-

дущим корпусом борозду, что соответствует общепринятым схемам работы плуга.

Цифровая модель почвенного канала позволяет обосновать конструктивно-технологические параметры рабочих органов почвообрабатывающих машин. На рисунке 3 показано взаимодействие рабочих органов культиватора для полосовой обработки почвы с модельной почвой в виртуальном почвенном канале.

На рисунке 4 представлены цифровой двойник технологического процесса работы посевной секции для прямого посева по нулевой технологии и посевные секции, которые были изготовлены на

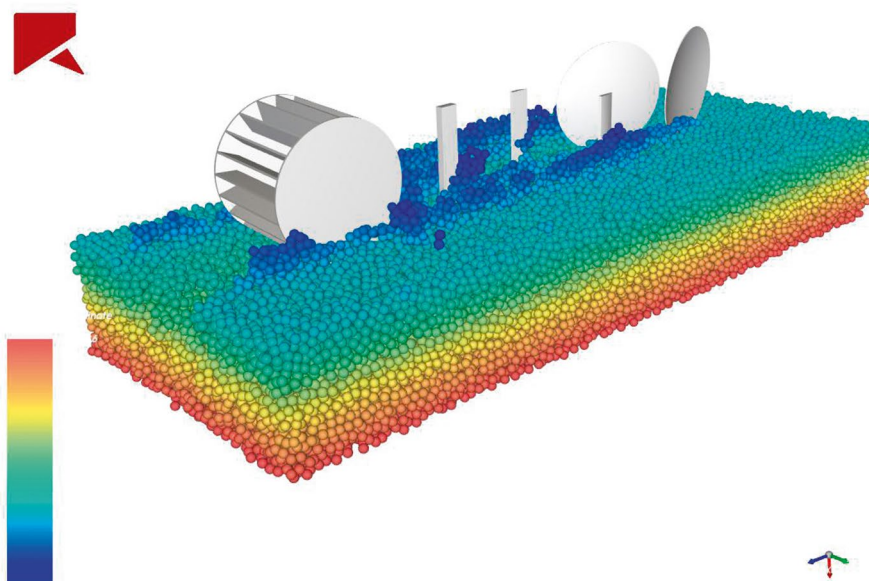


Рис. 3. Цифровая модель культиватора для полосовой обработки почвы

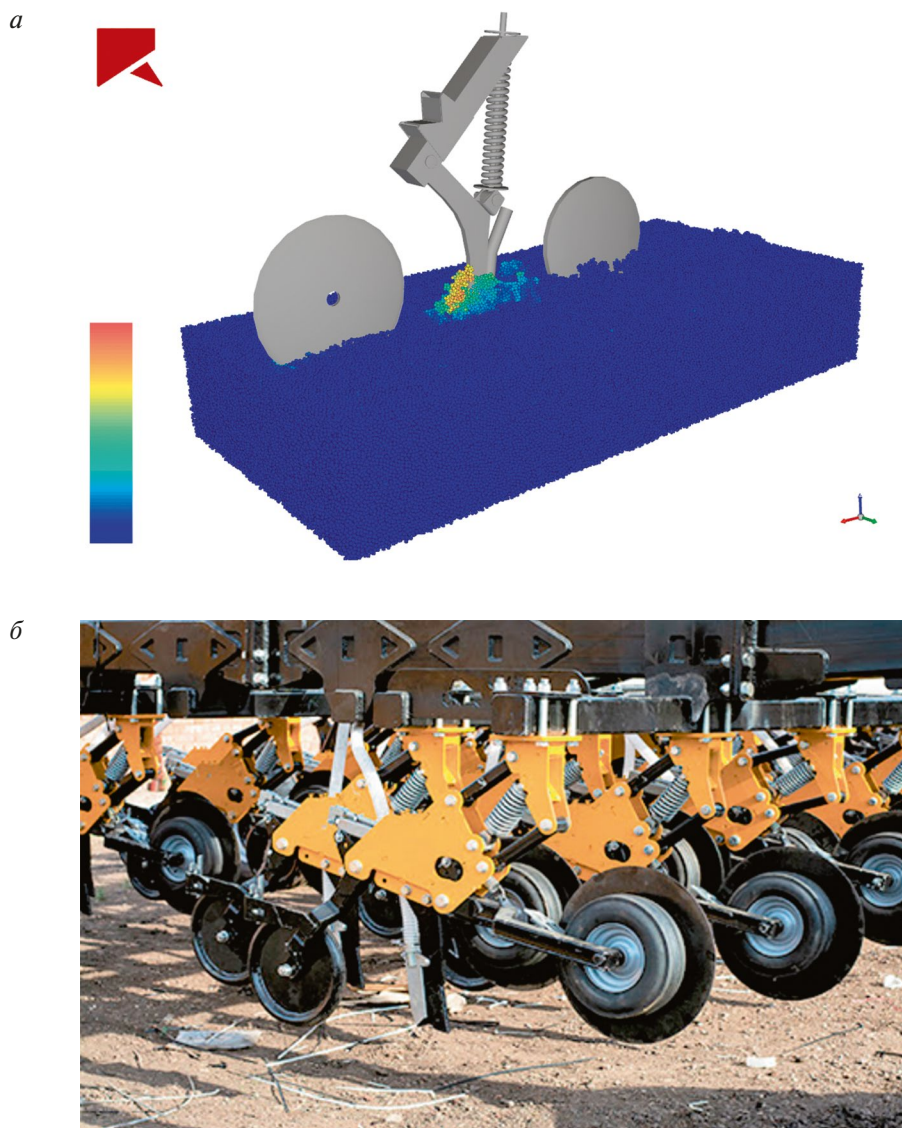


Рис. 4. Цифровой двойник посевной секции (а) и изготовленные посевные секции (б)

Челябинском компрессорном заводе по конструктивно-технологическим параметрам, обоснованным в цифровом двойнике. Испытание секций в полевых условиях доказало их работоспособность и соответствие качества выполнения процесса агротехническим требованиям. Использование цифрового двойника при разработке почвообрабатывающе-посевной части посевного комплекса позволило ускорить процесс его постановки на производство и сократить ресурсы на изготовление опытных образцов посевных секций, а также смоделировать их испытания в лабораторных и полевых условиях.

С помощью метода дискретных элементов было воссоздано взаимодействие рабочих органов с почвой с учётом таких параметров контактной модели, как поверхностная энергия и диаметр

частиц. Калибровка модели на основе данных полевых испытаний обеспечила высокую точность прогнозирования тягового сопротивления и других параметров. Цифровой двойник позволил оптимизировать конструкцию плуга и культиватора, сократив тем самым время на разработку и испытания. Пневматические дозирующие и распределительные устройства данного посевного комплекса были обоснованы в двойниках, созданных с использованием методов двухфазных течений вычислительной гидродинамики. На рисунке 5 показаны трёхмерная модель распределительной системы посевного комплекса и модель технологического процесса транспортировки и распределения семян воздушным потоком.

Цифровой двойник пневмосистемы помог обосновать конструктивные параметры пневмокана-

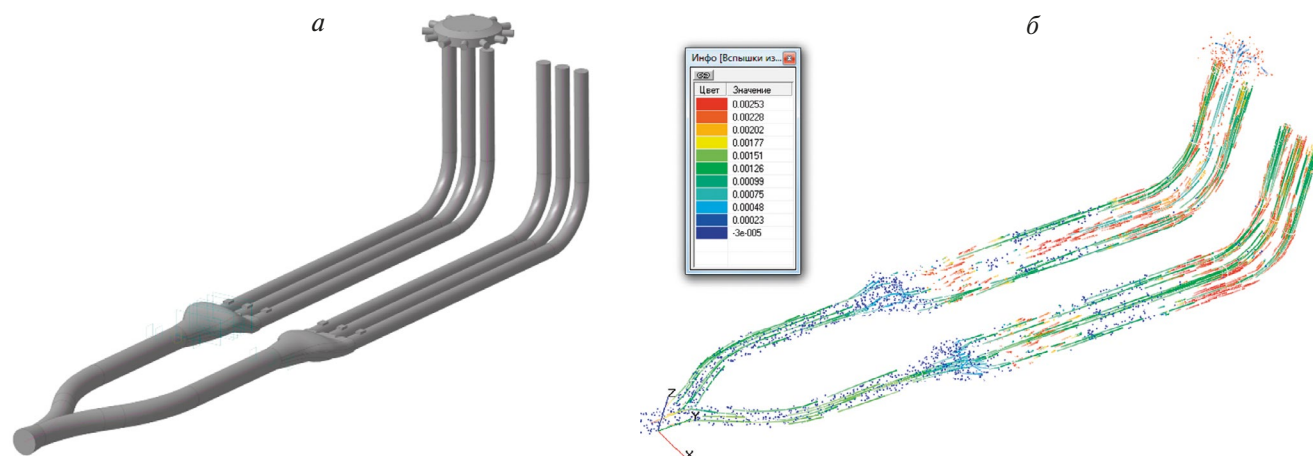


Рис. 5. Трёхмерная модель распределительной системы посевного комплекса (а) и её цифровой двойник (б)

лов, распределительных устройств и вертикальных коллекторов. Пневматическая система обеспечивает равномерное поступление семян в выходы коллектора, а скорость воздушного потока позволяет транспортировать и распределять семена и удобрения.

* * *

Цифровые двойники способны значительно повысить эффективность сельскохозяйственного машиностроения, сокращая время и затраты на внедрение новой техники, оптимизируя конструктивные и технологические параметры, улучшая точность прогнозирования и снижая риски, связанные с физическими испытаниями. Их разработка требует комплексного подхода, включающего сбор данных, создание математических моделей и их валидацию, различные методы численного моделирования (МКЭ, МДЭ, ВГД и др.) и их комбинации, в зависимости от задач и характеристик процессов, что позволяет учитывать сложные физико-механические свойства сельскохозяйственных материалов. Цифровые двойники почвообрабатывающих машин и пневматических систем для посевных комплексов нацелены на оптимизацию их конструктивно-технологических параметров.

Несмотря на очевидные преимущества, технология цифровых двойников пока недостаточно широко применяется в сельскохозяйственном машиностроении. Чтобы решить эту проблему, необходимо совершенствовать методологические подходы, включая использование виртуальных датчиков, машинного обучения и более точную калибровку моделей. Важно интегрировать данные цифровых двойников с реальными данными от датчиков, установленных на технике, что значительно увеличит точность прогнозирования и позволит оптимизировать разработку новой техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник М. Интеграция цифровых двойников оборудования и процесса // Control Engineering Россия. 2020. № 2 (86). С. 63–66.
Dudnik M. Integration of digital twins of equipment and process // Control Engineering Russia. 2020, no. 2 (86), pp. 63–66. (In Russ.)
2. Чигиринский Ю.Л., Плотников А.Л., Фирсов И.В., Жданов А.А. К вопросу о необходимости создания цифровых двойников технологических процессов механической обработки деталей машин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 3 (286). С. 37–41.
Tchigirinsky Yu.L., Plotnikov A.L., Firsov I.V., Zhdanov A.A. About the necessity to create digital twins of technological processes for mechanical processing of machine parts // Izvestia Volgograd State Technical University. 2024, no. 3 (286), pp. 37–41. (In Russ.)
3. Гавриленков С.И., Старостин И.Е. История становления метода математического прототипирования энергетических процессов как математической основы цифровых двойников авиационного оборудования // Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы. 2022. № 12. С. 90–96.
Gavrilenkov S.I., Starostin I.E. The history of the formation of method of mathematical prototyping of energy processes as the mathematical basis of digital twins of aircraft equipment // Science. Technic. Man: historical, ideological and methodological problems. 2022, no. 12, pp. 90–96. (In Russ.)
4. Митрофанов Д.Ю., Перерва О.Л. Оптимизация производственных процессов с использованием цифровых двойников // Экономика и предпринимательство. 2023. № 9 (158). С. 884–888.
Mitrofanov D.Yu., Pererva O.L. Optimization of production processes using digital doubles // Economics and entrepreneurship. 2023, no. 9 (158), pp. 884–888. (In Russ.)

5. Сычев В., Кулаков С., Шишин А. Цифровой двигатель. Применение технологии цифровых двойников позволяет ускорить разработку и сертификацию авиационных двигателей // САПР и графика. 2020. № 8 (286). С. 44–47.
Sychev V., Kulakov S., Shishkin A. Digital engine. The use of digital twin technology makes it possible to accelerate the development and certification of aircraft engines // CAD and Graphics. 2020, no. 8 (286), pp. 44–47. (In Russ.)
6. Цыганов В.Н. Влияние цифровых двойников на улучшение производственных процессов и экономическое обоснование их применения // Вопросы природопользования. 2024. № 1. С. 55–63.
Tsyganov V.N. The influence of digital twins on the improvement of production processes and the economic justification of their use // Environmental management issues. 2024, no. 1, pp. 55–63. (In Russ.)
7. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Инновационные достижения агроинженерных научных учреждений в условиях развития цифровых систем в сельском хозяйстве // Техника и оборудование для села. 2024. № 5 (323). С. 2–9.
Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.K. Innovative achievements of agricultural engineering scientific institutions in the context of the development of digital systems in agriculture // Machinery and equipment for rural areas. 2024, no. 5 (323), pp. 2–9. (In Russ.)
8. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Инновационные достижения агроинженерных научных учреждений в условиях развития цифровых систем в сельском хозяйстве // Техника и оборудование для села. 2024. № 6 (324). С. 2–5.
Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Innovative achievements of agricultural engineering scientific institutions in the context of the development of digital systems in agriculture // Machinery and equipment for rural areas. 2024, no. 6 (324), pp. 2–5. (In Russ.)
9. Дидманидзе О.Н., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Формирование подхода к созданию цифрового двойника трактора сельскохозяйственного назначения // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. № 61. С. 33–37.
Didmanidze O.N., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Forming an approach to creating a digital twin of agricultural tractor // Proceedings of the International Academy of Agrarian Education. 2022, no. 61, pp. 33–37. (In Russ.)
10. Stark R., Freseman C., Lindow K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services // CIRP Annals. 2019, vol. 68, no. 1, pp. 129–132.
11. Kritzinger W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // Ifac-PapersOnline. 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022.
12. Schluse M. et al. Experimentable digital twins – Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0 // IEEE Transactions on industrial informatics. 2018, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1731.
13. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технологии цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // Агроинженерия. 2023. № 4. С. 14–25.
Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Technology of digital twins in agriculture: prospects for use // Journal of Agricultural Engineering. 2023, no. 4, pp. 14–25. (In Russ.)
14. Кислицкий М.М., Миронов Д.А., Лылов А.С. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы // Теория и практика мировой науки. 2022. № 12. С. 27–29.
Kislitsky M.M., Mironov D.A., Lylov A.S. Digital twins of agricultural machinery and equipment in the food security system: significance and prospects // Theory and Practice of the World Science. 2022, no. 12, pp. 27–29. (In Russ.)
15. Хитрых Д. Цифровые двойники в промышленности: истоки, концепции, современный уровень развития и примеры внедрения // САПР и графика. 2022. № 7 (309). С. 4–11.
Hitryh D. Digital twins in industry: origins, concepts, current level of development and examples of implementation // CAD and graphics. 2022, no. 7 (309), pp. 4–11. (In Russ.)
16. Мударисов С.Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27–30.
Mudarisov S.G. Modeling the process of interaction of working bodies with the soil // Tractors and agricultural machine. 2005, no. 7, pp. 27–30. (In Russ.)
17. Мударисов С.Г., Рахимов З.С., Ямалетдинов М.М., Фархутдинов И.М. Оценка технологического процесса обработки почвы на основе уравнений динамики сплошных сред // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 1. С. 63–65.
Mudarisov S.G., Rahimov Z.S., Yamaletdinov M.M., Farkhutdinov I.M. Assessment of technological process of soil treatment on the basis of continuum dynamics equations // Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2010, no. 1, pp. 63–65. (In Russ.)
18. Мударисов С.Г., Габитов И.И., Лобачевский Я.П. et al. Modeling the technological process of tillage // Soil & Tillage Research. 2019, vol. 190, pp. 70–77.

19. *Shmulevich I.* State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method // *Soil and Tillage Research*. 2010, vol. 111, no. 1, pp. 41–53.
20. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Течения газа с частицами. М.: Физматлит, 2008.
Volkov K.N., Yemelyanov V.N. Gas flows with particles. Moscow: Fizmatlit, 2008. (In Russ.)
21. *Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al.* Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing // *Journal of Terramechanics*. 2023, vol. 109, pp. 37–44.
22. *Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R. et al.* Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method // *Soil & Tillage Research*. 2022, vol. 215, 105228.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL MACHINERY DESIGN USING DIGITAL TWINS

Yu.F. Lachuga^{a,*}, S.G. Mudarisov^{b,c,}, I.M. Farkhutdinov^{b,***}, Yu.Kh. Shogenov^{d,****},
B.G. Ziganshin^{d,e,*****}, N.N. Ustinov^{d,*****}**

^a*Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia*

^c*Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia*

^d*Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia*

^e*Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia*

*E-mail: akadema1907@majl.ru

**E-mail: salavam@gmail.com

***E-mail: ildar1702@mail.ru

****E-mail: yh1961s@yandex.ru

*****E-mail: zigan66@mail.ru

*****E-mail: UstinovNikNik@mail.ru

Digital twins are a tool for improving the efficiency of design, optimization and acceleration of agricultural machinery market launch, which will allow for its comprehensive modeling and analysis at all stages of the life cycle. Methodological approaches to the creation of digital twins are considered, their advantages are analyzed, which help accelerate the transition between different stages of technology readiness. Practical recommendations aimed at rapid product launch are offered. The use of digital twins reduces development time, helps optimize design parameters and reduce the cost of field testing of domestic agricultural machinery, and therefore significantly increase its efficiency and competitiveness.

Keywords: digital twins, agricultural machinery, agricultural machinery design, finite element method, discrete element method, computational fluid dynamics, soil modeling, pneumatic systems, product lifecycle, acceleration of market launch, technology availability levels.