

УДК 631.316

Т. В. Кожарина¹, С. В. Карпов¹, А. Р. Гороновский²¹Тамбовский государственный технический университет, Российская Федерация²Белорусский государственный технологический университет**РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

В данной статье представлено исследование, которое было проведено с целью изучения возможностей и проблем, связанных с применением 3D-сканирования в обратном проектировании и при контроле качества продукции. Исследование основано на применении методов вычислительной гидродинамики для комплексного анализа зон повышенной истираемости почвообрабатывающих инструментов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время существует все больше методов, которые способствуют восстановлению деталей с использованием принципов реверс-инжиниринга. Одним из таких методов является вычислительная гидродинамика (CFD), которая используется для моделирования и численного решения уравнений, описывающих движение жидкостей и газов. В данном случае CFD применяется для анализа воздействия почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин. При помощи методов CFD было проведено детальное исследование течения почвы вокруг рабочих органов, а также оценено воздействие давления и силы, которые возникают в процессе работы. Приведены ссылки на предыдущие исследования авторов, включающие анализ возможностей и проблемы технологии 3D-сканирования для обратного проектирования продукции с целью проведения конечно-элементных анализов деталей почвообрабатывающих машин.

Ключевые слова: абразивный износ, износ деталей, эрозия, 3D-сканирование, редактирование сеточной геометрии, твердотельная геометрия, конечно-элементный анализ, контроль качества, обработка почвы, моделирование почвообработки.

Для цитирования: Кожарина Т. В., Карпов С. В., Гороновский А. Р. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин для проведения конечно-элементного анализа // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 150–156. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20.

T. V. Kozharina¹, S. V. Karpov¹, A. R. Goronovsky²¹Tambov State Technical University, Russian Federation²Belarusian State Technological University**REVERSE ENGINEERING OF TILLAGE MACHINE PARTS
FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS**

This article presents a study that was conducted to explore the possibilities and problems associated with the use of 3D scanning in reverse engineering and product quality control. The study is based on the application of computational fluid dynamics methods for the complex analysis of zones of increased abrasion of tillage tools. The results obtained allow us to conclude that at present there are more and more methods that allow to rebuild a part using the principles of reverse engineering. One of such methods is computational fluid dynamics (CFD), which is used for modeling and numerical solution of equations describing the motion of liquids and gases. In this case, CFD is used to analyze the impact of soil on the working bodies of tillage machines. With the help of CFD methods, a detailed study of the soil flow around the working organs was carried out, and the impact of pressure and forces that arise during work was also evaluated. References to previous studies of the authors are given, including an analysis of the possibilities and problems of 3D scanning technology for reverse engineering of products in order to conduct finite element analyses of parts of soil-processing machines.

Keywords: abrasive wear, wear of parts, erosion, 3D scanning, editing of grid geometry, solid geometry, finite element analysis, quality control, tillage, modeling of tillage.

For citation: Kozharina T. V., Karpov S. V., Goronovsky A. R. Reverse engineering of tillage machines parts for finite element analysis. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 150–156 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20.

Введение. Обоснование параметров лесохозяйственных и сельскохозяйственных инструмен-

тов является важным и актуальным вопросом для рационального использования любого современ-

ного хозяйства. Это связано с тем, что такие инструменты используются для обработки почвы, посева, ухода за растениями и животными, сбора урожая и других работ на фермах, полях и лесах.

Неправильное использование или небрежное отношение к инструментам может привести к их поломке или неисправности, что затрудняет работу и снижает производительность хозяйств [1–3]. Кроме того, неисправные инструменты могут стать причиной травм и несчастных случаев на производстве.

Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин является актуальной темой в связи с необходимостью улучшения качества и производительности почвообрабатывающей техники, а также снижения затрат на ее производство и эксплуатацию. В условиях постоянного развития технологий и повышения требований к продукции реверс-инжиниринг деталей становится все более важным инструментом для разработки новых и улучшения существующих моделей почвообрабатывающей техники.

В данной работе восстановление геометрии инструмента основывается на 3D-сканировании. Для того чтобы начать процесс сканирования, необходимо провести предварительную настройку 3D-сканера. Важным этапом является подбор оптимальной мощности света и частоты лазера, которые будут соответствовать условиям освещения в помещении и характеристикам поверхности, которую нужно отсканировать. Благодаря высокой точности и возможности создания цифровой трехмерной модели объекта 3D-сканеры нашли широкое применение в инженерной сфере. Они помогают решать вопросы проектирования, контроля качества производства и инспектирования объектов. Полученную модель можно использовать для анализа и расчетов в CAD/CAE-системах. Существует множество различных моделей 3D-сканеров, каждый из которых обладает своими уникальными возможностями и свойствами, позволяющими оцифровывать объекты любой формы и размера – от колеса автомобиля до лица человека.

Структура методики. В работе [4] представлена технология 3D-сканирования, применяемая в обратном проектировании. Использование 3D-сканирования в процессе реверс-инжиниринга включает в себя три основных этапа: сканирование, точечную обработку и разработку геометрической модели для конкретного приложения.

Для достижения более точного сканирования поверхности образцов рекомендуется использовать специальный матирующий спрей. Этот спрей позволяет улучшить качество сканирования, делая поверхность более однородной и устраняя возможные блики и отражения.

Оптимальным способом проведения сканирования является стационарное расположение сканера с последующим перемещением или вращением образцов. Данный подход позволяет достичь более высокой точности результатов, так как образцы могут быть сканированы с разных углов и позиций.

Однако при таком сканировании могут возникать графические артефакты, такие как блики от поворотного стола. Для устранения этих артефактов необходимо провести последующую ручную обработку данных. Это позволит получить более чистые и точные результаты сканирования.

Следующим этапом после сканирования является конвертация облака точек в полигональную модель с использованием треугольников. Количество треугольников, которые будут составлять модель, зависит от размеров сканируемой детали и точности используемого оборудования. Большие модели со сложной формой могут требовать большего количества треугольников для достижения достаточной детализации.

Однако при конвертации облака точек возможно появление отверстий в полигональной сетке. Для их устранения могут применяться различные алгоритмы заполнения, основанные на идентичной кривизне, касательности в окрестности отверстия или на основе плоской полигональной сетки.

В случае если применение этих алгоритмов не дает удовлетворительных результатов, таких как искажение поверхности или появление выпуклостей, рекомендуется повторное сканирование. Это позволит получить более точную модель поверхности образца. В исследовании [5] проработаны возможные ошибки размеров в процессе сканирования, а также показаны наилучшие технологические параметры для использования 3D-сканера.

Таким образом, использование специального матирующего спрея, стационарного сканирования с перемещением или вращением образцов, а также последующая ручная обработка данных и конвертация в полигональную модель с помощью треугольников являются важными шагами для достижения высокой точности и качества сканирования.

Полученная полигональная геометрия, по сути, является трехмерной геометрической моделью, которую можно назвать растровой. Она не поддается традиционным методам редактирования B-Rep-геометрии, которые обычно используются в системах автоматизированного проектирования. В связи с этим возникает необходимость применения методов обратного инжиниринга для восстановления геометрии объекта. Данные методы основаны на аппроксимации

полигональных поверхностей и сечений. Обратный инжиниринг – это процесс анализа и восстановления информации о продукте или объекте, основанный на их физической структуре, функциях и характеристиках. В случае полигональной геометрии этот процесс включает в себя анализ полигональных поверхностей и сечений, чтобы получить более точное представление о форме и структуре объекта.

Развитие вычислительных мощностей компьютерной техники и систем автоматизированного проектирования позволило достоверно воспроизводить трехмерную геометрию почвообрабатывающих рабочих органов. Это открыло возможности для преодоления недостатков аналитических и эмпирических методов исследования почвенных взаимодействий за счет применения методов численного моделирования [6]. Среди численных методов можно выделить две большие группы – континуальные и дискретные. Метод конечных элементов FEM (Finite Element Method) является континуальным методом и заключается в разбиении на конечное количество элементов области, в которой ищется решение дифференциальных уравнений. Наиболее известные программы для расчетов с помощью метода конечных элементов – ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS/M, LS-DYNA, SOLIDWORKS Simulation. Вычислительная гидродинамика CFD (Computational Fluid Dynamics) также относится к континуальным методам. Она является подразделом механики сплошных сред, включающим в себя комплекс математических, физических и численных методов, используемых для исследования потоковых процессов. Данный метод реализован в таких программах, как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, FlowVision, Flow Simulation, OpenFOAM.

В исследовании [7] приводятся данные об использовании дискретных элементов FEM для изучения взаимодействия с почвой двугранного клина и лемешно-отвальной поверхности плуга. Моделирование осуществлялось с применением программы LS-DYNA. Используемые в исследовании численные модели, описывающие взаимодействие рабочих органов с почвенной средой, могут достаточно успешно применяться для моделирования процессов почвообработки. Такой подход позволяет производить оценку напряжений и деформаций, возникающих в почвенном пласте, а также характер их распределения.

Ранее проведенные исследования [8] указывают на перспективность применения методов вычислительной гидродинамики (CFD) при анализе взаимодействия рабочих органов с почвой. Экспериментально подтверждено, что модель ньютоновской вязкой жидкости может использоваться в качестве аналога грунта. Однако

стоит отметить, что скорости и давления, моделируемые воздействием почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин, сильно зависят от вязкости моделируемой среды.

Численное решение уравнений динамики позволяет определить поле скоростей среды, распределение давлений и траектории движения частиц почвы. В данном исследовании используется среда SolidWorks Flow Simulation, которая также предоставляет возможность численного моделирования взаимодействия почвы с рабочими органами.

Дополнительно стоит отметить, что использование методов CFD позволяет не только анализировать воздействие рабочих органов на почву, но и оптимизировать их конструкцию. Например, путем изменения формы рабочего органа или его параметров можно достичь более эффективного воздействия на почву, что в свою очередь может повысить производительность почвообрабатывающих машин.

Экспериментальная часть. Для выполнения данной работы использовали лапку сошника Amazone в качестве прототипа. Это устройство представлено на рис. 1.



Рис. 1. Лапка сошника Amazone

Для того чтобы избежать бликов и отражений во время сканирования, деталь была предварительно очищена. Затем на поверхность нанесли специальный матирующий спрей, как показано на рис. 2. После нанесения спрея приступили к сканированию.

Для выполнения дальнейших работ использовали 3D-сканер Einscan Pro 2X Plus, который монтировался на неподвижный штатив. Лапка сошника располагалась на специальном поворотном столе. Для достижения оптимальной точности воспроизведения геометрии детали в производстве было использовано 15 поворотов стола. Каждый цикл поворота стола регистрировал положение около миллиона точек поверхности и на основе этой информации была создана полигональная поверхность, содержащая большое количество треугольников. Работа на данном этапе была реализована в программе EXScanPro.



Рис. 2. Лапка сошника Amazone перед сканированием

Дальнейшая работа с полигональной геометрией проводилась в системе SolidWorks. Из-за возможных погрешностей при сканировании полученная модель может немного отличаться от исходного инструмента.

На первом этапе необходимо полученную геометрию выровнять относительно трех базовых плоскостей, так как после сканирования модель не имеет никаких привязок и зависимостей в пространстве. Выравнивание показано на рис. 3.

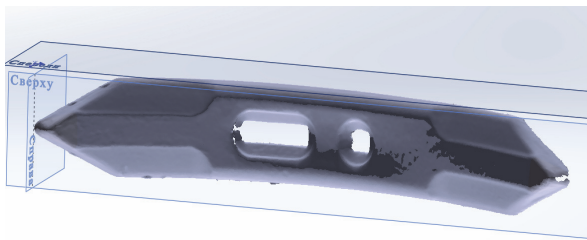


Рис. 3. Выравнивание модели

Далее на задней плоскости необходимо создать эскиз, в данном случае геометрией эскиза является проекция объекта. Для дальнейшей работы создается твердотельная модель. В силу погрешности сканирования возможны незначительные отклонения от размеров натуральной модели. Чтобы получить более точные размеры, необходимо вернуться к эскизам на последних этапах моделирования, промежуточный этап процесса показан на рис. 4.

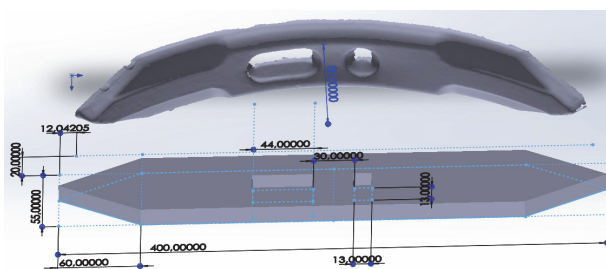


Рис. 4. Процесс создания модели

После создания модели сгибаем ее с помощью инструмента «Гибкие» и проверяем все поверхности и размеры, как показано на рис. 5. Если обнаружены значительные отличия, то следует вернуться к эскизам на более ранние этапы и внести изменения в размеры [5].

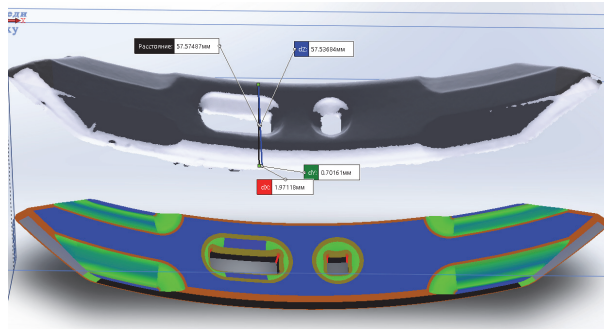


Рис. 5. Анализ поверхностей

На рис. 6 показан окончательный результат. Сверху изображена лапка сошника после сканирования, а снизу после реверс-инжиниринга.



Рис. 6. Лапка сошника до и после реверс-инжиниринга

Для решения внешней задачи обтекания неподвижного твердого тела детали движущейся несжимаемой средой (почвой) использовался модуль SolidWorks Flow Simulation [1, 9]. Исследуемый образец располагался в центре прямоугольного канала, в котором с постоянной скоростью 10 км/ч двигалась среда, характеризующая коэффициентом динамической вязкости $\mu_s = 150 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и плотностью $\rho_s = 1500 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 7 представлены линии потока слоев почвы, которые непосредственно взаимодействуют с поверхностью лапки сошника.

На основе распределения скоростей движущейся среды с использованием модели эрозии [10] было найдено значение суммарной массовой интенсивности эрозии R_e .

На рис. 8 представлено распределение скорости эрозии R_e на поверхности лапки сошника при значениях массового расхода элементарных потоков почвы $m_p = 4 \text{ кг/с}$ и их количества $N_p = 1000$.

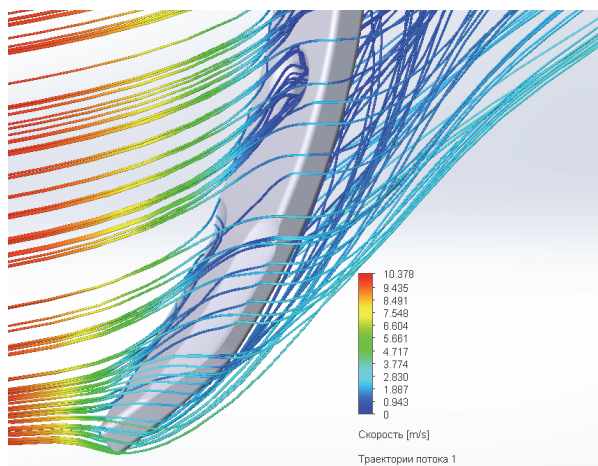


Рис. 7. Линии потока слоев почвы, контактирующих с лапкой

Важным результатом при анализе зон повышенной истираемости является поле давлений непосредственно на поверхности детали (рис. 8).

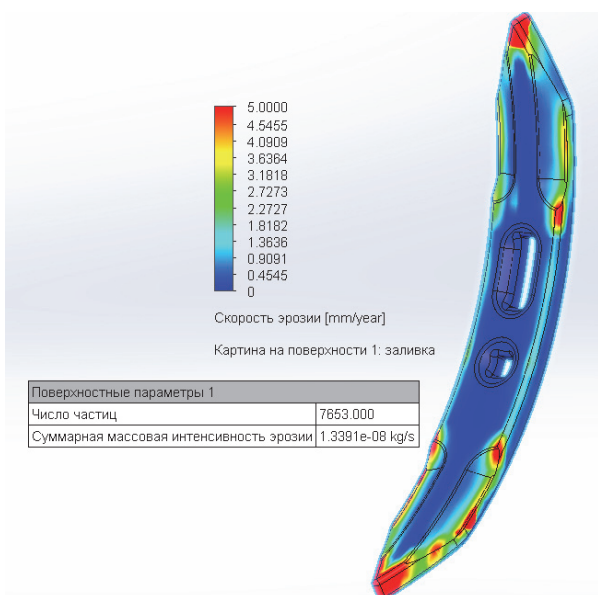


Рис. 8. Распределение скорости эрозии на поверхности лапки сошника

Для рассмотренного примера максимальное давление, около 720 кПа, имело место на передней рабочей поверхности инструмента (рис. 9), среднее значение давления на поверхности – 120 кПа. При этом распределение давления не было равномерным.

Заключение. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин является важным этапом для проведения конечно-элементного анализа. Этот процесс позволяет получить точную модель деталей, которые будут использоваться в анализе, что в свою очередь поможет определить их прочность и надежность.

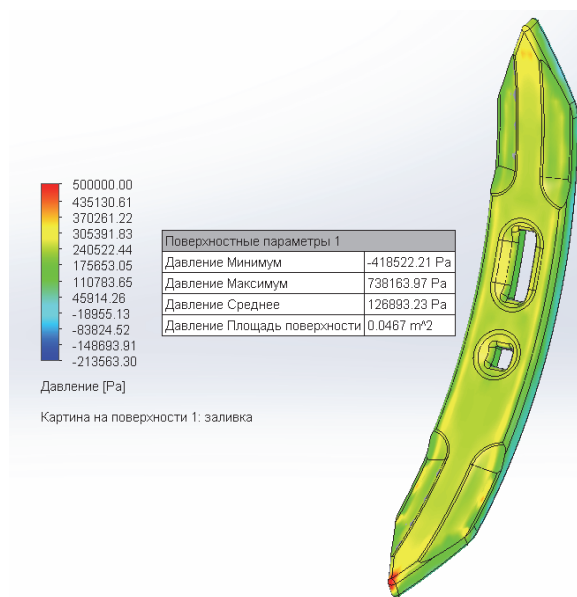


Рис. 9. Распределение давления на поверхности лапки сошника

В данной статье рассмотрены возможность и результаты использования технологии 3D-сканирования для обратного проектирования и контроля качества продукции. Полученные результаты исследований схожи по специфике с результатами, представленными в работе [3] по использованию 3D-сканирования для обратного проектирования и контроля качества. Технология в целом предоставляет возможности для проведения повторного проектирования путем сканирования объекта и преобразования его в САПР с использованием различных методов реконструкции поверхности.

Исходя из данного примера работы, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существуют методы, позволяющие восстановить деталь с использованием реверс-инжиниринга. Однако помимо этого также можно применять методы вычислительной гидродинамики (CFD) для более детального анализа воздействия почвы на рабочие органы.

Анализ полученных в результате виртуального эксперимента силовых характеристик и их сравнение с данными других исследований [11–13] позволили подтвердить их достаточно высокую достоверность. Следовательно, можно сделать вывод об адекватности данного исследования. Таким образом, с применением методов вычислительной гидродинамики, описывающих почву как сплошную деформируемую среду, можно эффективно проводить силовой анализ рабочих органов почвообрабатывающих машин. При этом выполнить оценку комплекса качественных параметров обработки почвы (например, формы поперечного профиля, степени разрыхления или уплотнения почвы, характера

перемешивания почвенных слоев и др.) с применением данного метода крайне сложно.

CFD является методом моделирования и численного решения уравнений, описывающих движение жидкостей и газов. В данном случае, CFD применяется для анализа воздействия почвы на рабочие органы почвообрабатывающих машин.

Используя методы CFD, можно провести детальное исследование течения почвы вокруг рабочих органов, оценить воздействие давления и силы. Это позволяет оптимизировать конструкцию рабочих органов, чтобы они максимально эффективно выполняли свои функции, минимизируя негативное воздействие на почву.

Список литературы

1. Карпов С. В., Кожарина Т. В. Анализ абразивного износа бионических структур // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы XIII Междунар. науч.-инновац. молодеж. конф., Тамбов, 11–12 нояб. 2021 г. Тамбов, 2021. С. 192–194.
2. Кожарина Т. В., Карпов С. В. Разработка алгоритма 3д-сканирования изношенных деталей для проведения конечно-элементного анализа // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 12–14 окт. 2021 г. Тамбов, 2021. Вып. 7. С. 211–216.
3. Карпов С. В., Кожарина Т. В. Анализ взаимодействия почвы с обрабатывающими инструментами для создания конструкций повышенной абразивной стойкости // Цифровизация агропромышленного комплекса: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 25–27 окт. 2022 г. Тамбов, 2022. С. 115–118.
4. Helle R. H., Lemu H. G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 5255–5262.
5. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Dimensional errors during scanning of product using 3D scanner // *Advances in Engineering Design*. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 727–736. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_67.
6. Assaf Z., Rubinstein D., Shmulevich I. Determination of the parameters of the model of discrete elements necessary for soil cultivation // *Soil research and tillage*. 2007. No. 92 (1). P. 227–242.
7. Ovsyanko V., Petrovsky A. The computer modeling of interaction between share-mouldboard surface of plough and soil // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2014. Vol. 59, no. 1. P. 100–103.
8. Comparative assessment of discrete element methods and computational fluid dynamics for energy estimation of the cultivator working bodies / S. Mudarisov [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. No. 18. P. 198–206.
9. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics / J. Sun [et al.] // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 119. P. 30–37.
10. Effect of sand particles on the Erosion-corrosion for a different locations of carbon steel pipe elbow / M. Amara [et al.] // *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 13. P. 2137–2142.
11. Обзор методов моделирования взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и почвенных сред / М. Н. Лысыч [и др.] // *Современные наукоемкие технологии*. 2021. № 9. С. 86–93.
12. Finite element simulation of moldboard-soil interaction / H. Bentaher [et al.] // *Soil and Tillage Research*. 2013. Vol. 134. P. 11–16.
13. Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine / M. Topakci [et al.] // *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010. Vol. 8, no. 2. P. 531–536.

References

1. Karpov S. V., Kozharina T. V. Analysis of abrasive wear of bionic structures. *Sovremennyye tverdofaznyye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyy menedzhment: materialy XIII Mezhduнародной nauchno-innovatsionnoy molodezhnoy konferentsii* [Modern solid-phase technologies: Theory, Practice and Innovation Management: materials of the XIII Scientific and Innovative International Youth Conference]. Tambov, 2021, pp. 192–194 (In Russian).
2. Kozharina T. V., Karpov S. V. 3d-scanning algorithm Development of worn parts for finite element analysis. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy VII Mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the VII International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2021, issue 7, pp. 211–216 (In Russian).
3. Karpov S. V., Kozharina T. V. Analysis of the interaction of soil with processing tools for creating structures of increased abrasive resistance. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy*

III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Digitalization of the agro-industrial complex: materials of the III International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2022, pp. 115–118 (In Russian).

4. Helle R. H., Lemu H. G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 5255–5262.

5. Javaid M., Haleem A., Kumar L. Dimensional errors during scanning a product using 3D scanner. *Advances in engineering design*. Singapore, Springer Singapore, 2019, pp. 727–736. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_67.

6. Assaf Z., Rubinstein D., Shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and tillage research*, 2007, no. 92 (1), pp. 227–242. DOI: 10.1016/j.still.2006.03.06.

7. Ovsyanko V., Petrovsky A. Computer modeling of the interaction of the ploughshare surface with soil. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 100–103.

8. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Aminov R., Rakhimov Z., Bagautdinov R., Rakhimov I., Gainullin I., Comparative assessment of discrete element methods and computational fluid dynamics for energy estimation of the cultivator working bodies. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2020, no. 18, pp. 198–206.

9. Sun J., Wang Y., Ma Y., Tong J. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*, 2018, vol. 119, pp. 30–37.

10. Amara M., Muthanna B., Abbes M. T., Meliani M. H. Effect of sand particles on the Erosion-corrosion for a different locations of carbon steel pipe elbow. *Procedia Structural Integrity*, 2018, vol. 13, pp. 2137–2142.

11. Lysych M. N., Shabanov M. L., Nagaytsev V. M., Chernyshov V. V. Review of methods for modeling the interaction of working bodies of tillage machines and soil media. *Sovremennye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2021, no. 9, pp. 86–93 (In Russian).

12. Bentaher H., Ibrahmi A., Hamza E., Hbaieb M., Kantchev G., Maalej A., Arnold W. Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 2013, vol. 134, pp. 11–16.

13. Topakci M., Mehmet C., Kursat H., Rennie M., Akinci A., Karayel I. Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 531–536.

Информация об авторах

Кожарина Татьяна Владимировна – магистрант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Российская Федерация). E-mail: tata.vladimirovna@gmail.com

Карпов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Российская Федерация). E-mail: karpov.sv@mail.tstu.ru

Гороновский Андрей Романович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

Information about the authors

Kozharina Tatiana Vladimirovna – master’s degree student, the Department “Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering”. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: tata.vladimirovna@gmail.com

Karpov Sergey Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department “Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering”. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: karpov.sv@mail.tstu.ru

Goronovsky Andrey Romanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: arg@belstu.by

Поступила 23.10.2023