

Тип статьи: научная
УДК 631.431.3; 631.361.022
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-77-85

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЕННОГО СЛОЯ ДЛЯ УТОЧНЕННЫХ РАСЧЕТОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НА ПРОЧНОСТЬ

*Игорь Львович Абрамов*¹, *Михаил Михайлович Ковалев*², *Геннадий Анатольевич Перов*³

^{1,2,3} Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

¹ i.abramov@vniiml.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>,

² m.kovalev@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>,

³ g.perov@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Автор, ответственный за переписку: Игорь Львович Абрамов, i.abramov@vniiml.ru
Corresponding author: Igor Abramov, i.abramov@vniiml.ru

Реферат. В статье рассмотрены вопросы повышения надежности взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин. Предложена модель нагружения, основанная на учете микронеровностей поверхностного слоя почвы с использованием фрактальной модели поверхности, построенной по алгоритму diamond-square. Показано, что параметры микронеровностей поверхности почвы, рассчитанные при помощи предлагаемой модели, соответствуют экспериментальным данным, полученным при профилографировании поверхности почвы при предпосевной обработке и в период приготовления льностресты. Произведен сравнительный расчет нагружения зуба игольчатой бороны и зуба вспушивателя в соответствии с моделью ровной поверхности почвы и поверхностью почвы, имеющей микрорельеф, смоделированный по предлагаемой модели. Показано, что механические напряжения в рабочих органах, взаимодействующих с поверхностью почвы, нагруженных согласно предлагаемой модели, больше на 14% при предпосевной обработке, а при приготовлении льностресты на 25%, чем при расчете с использованием модели ровной поверхности почвы. Применение модели микрорельефа оптимально как при расчете почвообрабатывающих машин так и при расчете других льноуборочных машин (теребильных аппаратов, вспушивателей лент льностресты, пресс-подборщиков и прочих агрегатов), не предназначенных для непосредственной обработки почвы, но имеющих контакт с ней при выполнении технологического процесса.

Ключевые слова: надежность, фрактальная поверхность, расчет на прочность, моделирование поверхности почвы.

MODELING THE MICRORELIEF OF THE SURFACE OF THE SOIL LAYER FOR REFINED CALCULATIONS OF WORKING BODIES FOR STRENGTH

*Igor Abramov*¹, *Mikhail Kovalev*², *Gennady Perov*³

^{1,2,3} Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

¹ i.abramov@vniiml.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>,

² m.kovalev@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>,

³ g.perov@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Abstract. Issues of increasing the reliability of working parts of agricultural machines interacting with the soil surface are discussed in the article. A loading model based on taking into account microroughness of the surface soil layer using a fractal surface model constructed using the diamond-square algorithm is proposed. It is shown that the parameters of microroughness of the soil surface, calculated using the proposed model, correspond to experimental data obtained by profiling the soil surface during pre-sowing treatment and during the preparation of flax. A comparative calculation of the loading of the needle harrow tooth and the tiller tooth was carried out in accordance with the model of a flat soil surface and a soil surface with a microrelief, modeled according to the proposed model. It is

shown that the mechanical stresses in the working bodies interacting with the soil surface, loaded according to the proposed model, are 14% greater during pre-sowing treatment, and 25% greater when preparing flax trust, than when calculated using a model of a flat soil surface. The use of a microrelief model is optimal both when calculating soil tillage machines and when calculating other flax harvesting machines (pulling machines, flax sliver fluffers, balers and other units) that are not intended for direct tillage of the soil, but have contact with it during the technological process..

Keywords: reliability, fractal surface, strength calculation, soil surface modeling.

Для цитирования: Абрамов И.Л., Ковалев М.М., Перов Г.А. Моделирование микрорельефа поверхности почвенного слоя для уточнения расчетов рабочих органов на прочность // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 77-85. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>.

For citation: Abramov I., Kovalev M., Perov G. Modeling the microrelief of the surface of the soil layer for refined calculations of working bodies for strength. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 77-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment for the Federal Scientific Center for Bast Crops (No. FGSS-2022-0005).

Введение. Современное сельскохозяйственное производство характеризуется высокой интенсификацией, что предъявляет все более высокие требования к надежности применяемых в производстве машин и их отдельных узлов [1].

Задача надежности взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин, является одной из важнейших в настоящее время, поскольку снижение простоев в связи с поломками оборудования и увеличение межсервисного интервала, позволит значительно повысить производительность труда. Кроме того, важной остается задача снижения затрат при производстве и эксплуатации современного парка сельскохозяйственных машин и механизмов. Это, в свою очередь, требует применения как новых материалов, так и новых методик расчета при проектировании сельскохозяйственных машин [2].

При проектировании этих рабочих органов, необходимо с достаточной степенью точности оценить действующие на них силы, так как от этого зависит долговечность и надежность рабочих органов и всей машины в целом. В настоящее время при оценке действующих сил, применяется модель, имеющая ровную поверхность почвы [3, 4]. Тем не менее, данные профилографирования поверхности почвенного слоя показывают [4, 5], что характерный перепад высот микрорельефа может достигать значений более 100 мм, что сравнимо с глубиной предпосевной обработки почвы. Также для учета собственных колебаний рабочих органов при расчете на усталостную прочность необходимо знать характерный размер микронеровностей и их частотное распределение. Таким образом, необходимость учета влияния микрорельефа поверхности почвы на испытываемые рабочими органами нагрузки очевидна, а значит необходима модель поверхности почвы, которая учитывала бы наличие микрорельефа и позволяла оценивать размеры и высоту микронеровностей. Из сказанного выше видно, что полученная модель также позволит более точно оценить энергетические затраты на выполнение технологического процесса и снизить затраты на проектирование [6].

Таким образом, необходимость в создании математической модели, способной описывать поверхность почвенного слоя с достаточной точностью очевидна.

Проведенные ранее исследования показали, что размер микронеровностей поверхности почвенного слоя имеет нормальное распределение величины выступов и впадин поверхности [5, 6], поэтому для моделирования поверхности, имеющей случайный характер распределения выступов и впадин микрорельефа, подойдут алгоритмы машинной графики, используемые для построения случайных ландшафтов. В частности, учитывая самоподобный характер многих природных элементов ландшафта, удовлетворительные результаты моделирования поверхности могут дать методы, использующие фрактальную модель [6].

Цель исследования – повышение точности расчета на прочность взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

В задачи исследования входило: – разработать математическую модель, более точно описывающую микрогеометрию поверхности почвы, с которой взаимодействуют рабочие органы сельскохозяйственных машин; – получить в лабораторно-полевых опытах микрогеометрию поверхности почвы в период предпосевной ее обработки и в период приготовления льнотресты; сравнить теоретическую и реальные микрогеометрии поверхности почвы с учетом их изменения за период возделывания и уборки льна-долгунца; получить экспериментальные данные для повышения точности расчета на прочность взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы. После анализа возможных для применения алгоритмов, использующих фрактальную модель (симплексный шум, шум Перлина, diamond-square), было принято решение использовать алгоритм diamond square, в связи с тем, что именно он позволяет построить наиболее реалистичный рельеф [7,8]. В качестве способа построения поверхности использовался метод генерации карты высот [8-11]. Для разработки программного обеспечения было использовано средство разработки MicroSoft Visual Studio 2019. При обработке карты высот и построении поверхности использовался программный пакет MicroSoft Excel. Использование указанных выше программных продуктов и ограниченность аппаратных вычислительных ресурсов накладывает ограничение на размер генерируемой карты (128*128 ячеек), тем не менее этого размера карты вполне достаточно для анализа, в тоже время, в отличие от программ-рендеров (например, Maya) – MS Excel предоставляет инструменты для анализа геометрии поверхности. Координаты высот рассчитывались в долях от минимума и максимума, принятых равными ± 1 .

При проведении лабораторно-полевых исследований профиля поверхности почвы был использован ультразвуковой бесконтактный профилограф, обеспечивающий точность измерения (± 3 мм) [5]. Применено разработанное в среде Arduino IDE программное обеспечение, позволяющее записывать поток входящих данных в таблицу, а также визуализировать профиль поверхности в режиме реального времени. Для обработки полученных данных и визуализации сечений поверхности использовался пакет MS Excel, 3D моделирование осуществлялось в среде разработки MathLab 2018b.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлена сгенерированная карта высот с построенной по заданным параметрам поверхностью (размер поля – 128*128). На построенной поверхности цветом выделены интервалы уровней одинаковых высот.

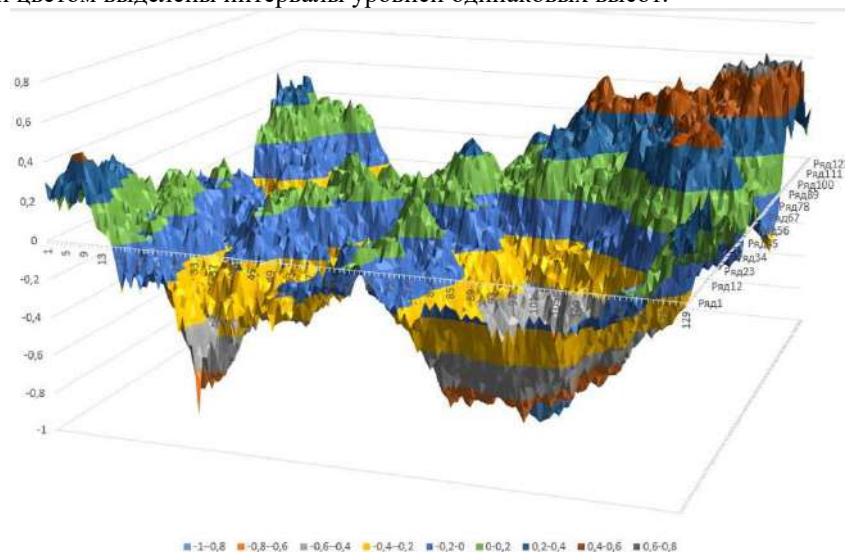


Рисунок 1 – Сгенерированная карта высот с построенной по заданным параметрам поверхностью (размер поля – 128*128)

По сгенерированной карте высот можно построить произвольные сечения поверхности. На рисунке 2 представлено продольное (а) и поперечное (б) сечение поверхности, представленной на рисунке 1.

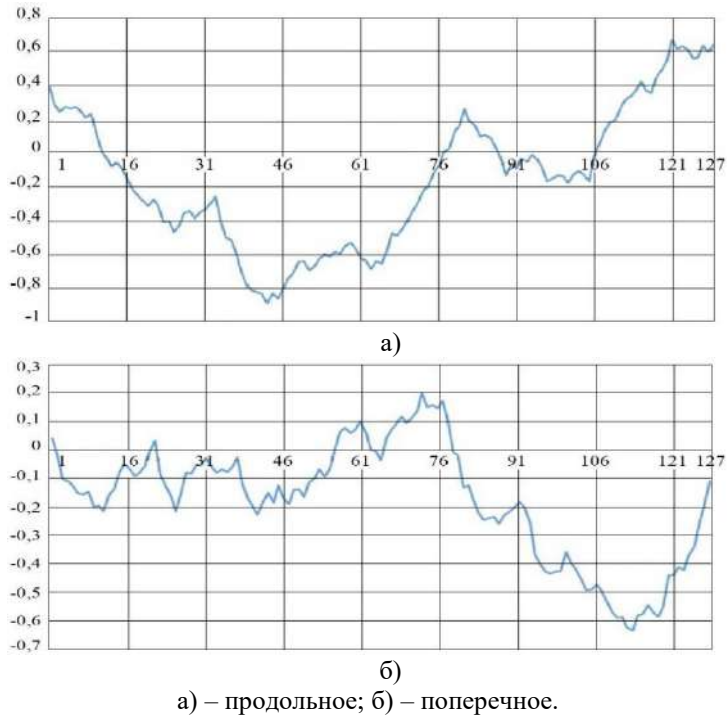
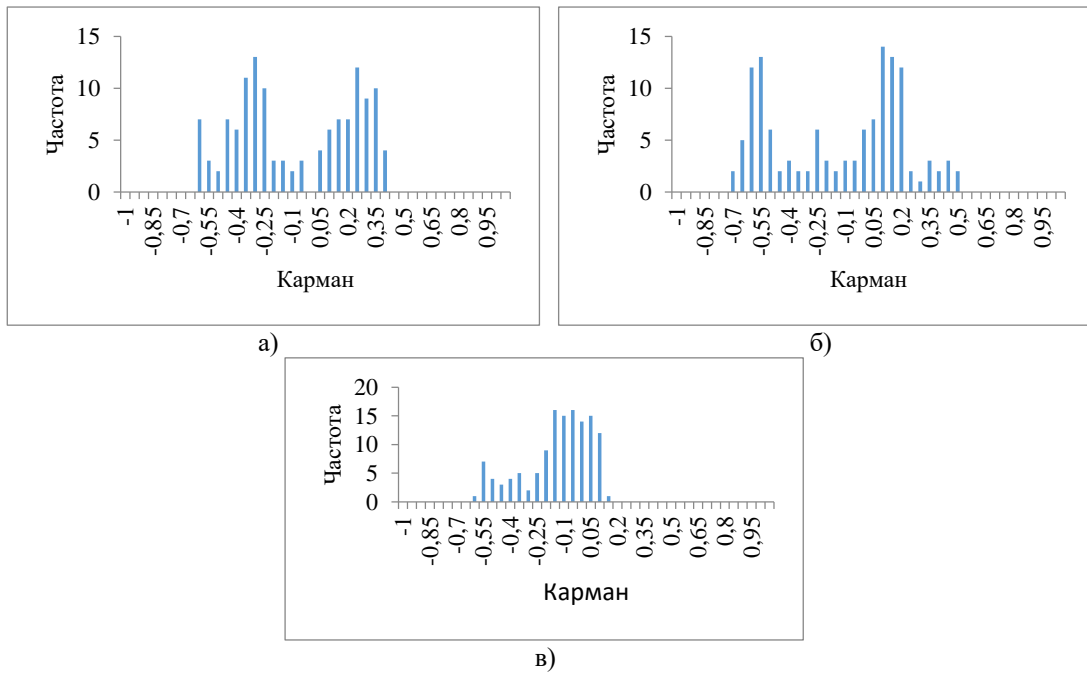


Рисунок 2 – Сечения смоделированной поверхности

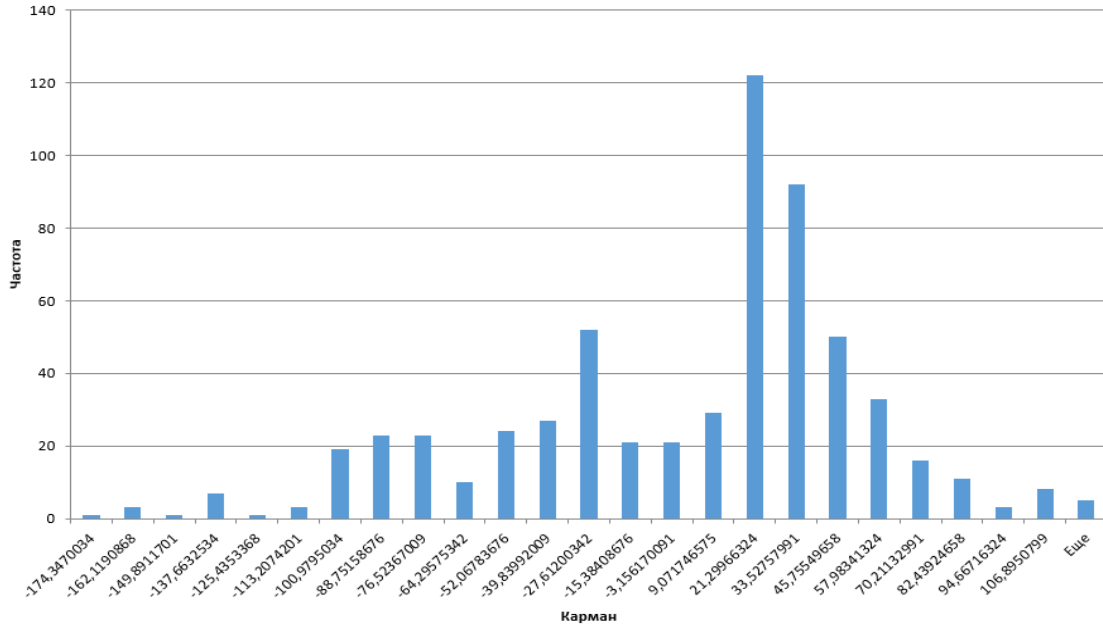


а), б), в) – произвольно взятые продольные сечения поверхности

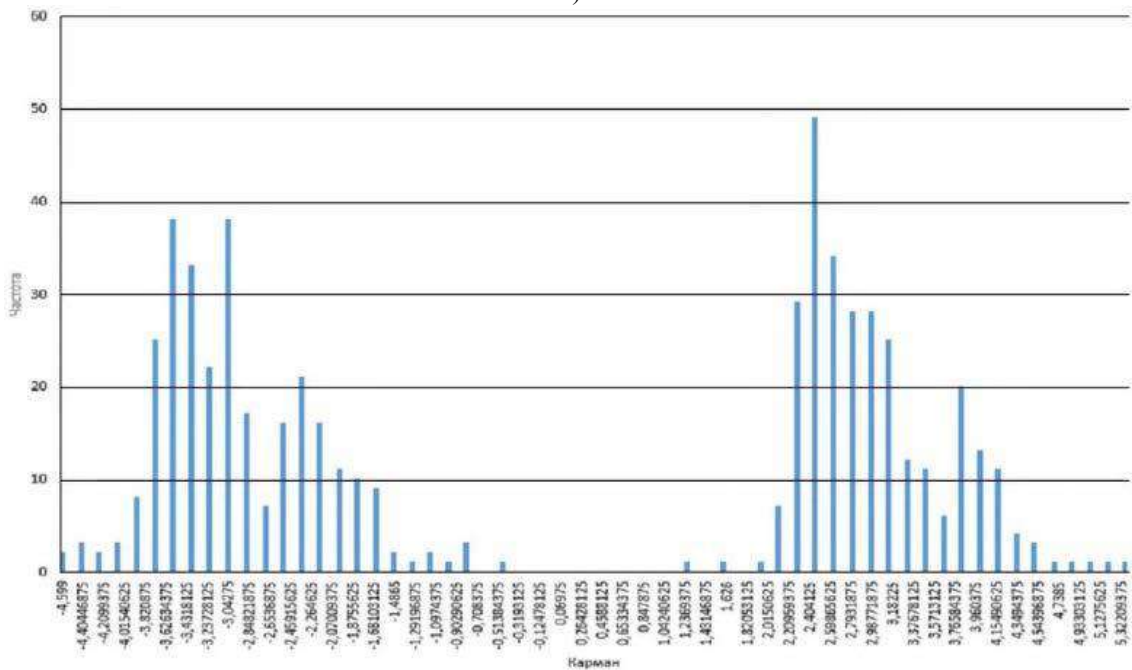
Рисунок 3 – Частотное распределение микронеровностей поверхности почвы, источник данных – моделирование

На рисунке 4 представлены гистограммы распределения частот высот микронеровностей по данным профилографирования реальной поверхности после пахоты (4, а) и после предпосевной обработки игольчатой бороной (4, б) [5] и в период приготовления льнотресты (4, в).

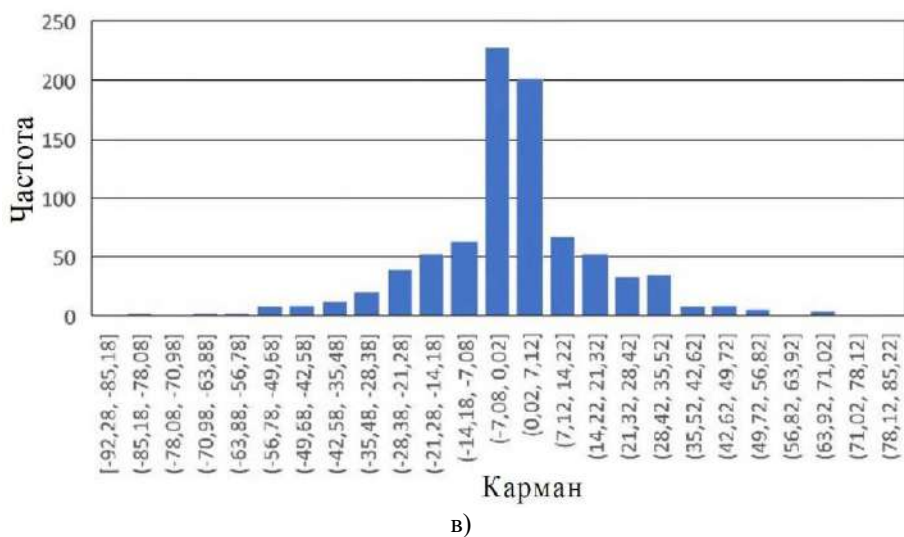
Анализ данных, полученных измерением профиля поверхности почвы, показывает, что распределение размера микронеровностей имеет нормальный характер с двумя выраженными максимумами, один в отрицательной части значений, другой – в положительной [5]. Аналогичная картина наблюдается и в данных моделирования, то есть можно говорить о том, что характер распределения размера микронеровностей одинаков и является нормальным.



а)



б)



- а) – после пахоты; б) – после предпосевной обработки игольчатой бороной;
 в) – в период приготовления льнотресты

Рисунок 4 – Частотное распределение микронеровностей поверхности почвы по данным профилографирования

Однако, сравнение модельных и экспериментальных данных показывает, что по данным профилографирования на поверхности предпосевной обработки игольчатой бороной максимум частоты впадин микронеровностей приходится примерно на 15% от максимального значения, тогда как по данным моделирования его значение составляет около 40% для отрицательных значений, в тоже время для положительной части значений высот микронеровностей эти параметры составляют 14% и 19% соответственно. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении модельных и экспериментальных данных поверхности почвы в период приготовления льнотресты, но с более выраженным перепадом выступов и впадин микронеровностей. Данный процесс происходит вследствие воздействия на почву в период от посева до уборки погодных условий, в частности дождей. Следовательно, размер выступов модель описывает гораздо более точно, чем размер впадин.

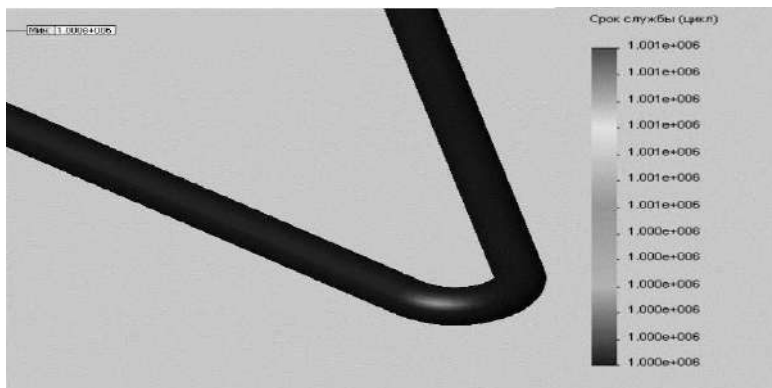
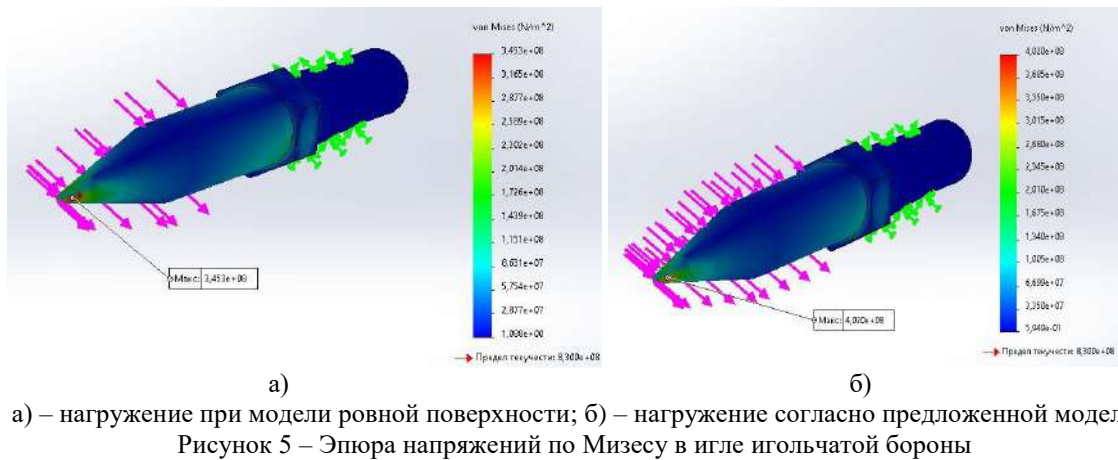
Объяснить такое расхождение можно тем, что при построении модели не принимался в расчет тот факт, что после обработки почвы и формирования микрорельефа сразу же начинается его разрушение, что приводит к снижению среднего значения величины впадины микрорельефа. А поскольку заполнение впадин рельефа происходит гораздо менее плотно, чем было до обработки почвы, то и заполнение впадин происходит сильнее, чем разрушение выступов.

Однако, учитывая тот факт, что при оценке максимального нагружения почвообрабатывающего рабочего органа основным фактором является его заглубление [3] (то есть размер именно выступов микрорельефа), данная модель позволяет оценить этот параметр точнее, чем при использовании модели ровной поверхности.

В качестве примеров применения разработанной модели для расчета почвообрабатывающего рабочего органа, на рисунке 5 приведены эпюры механических напряжений в игле игольчатой бороны, а на рисунке 6 расчетные значения предела выносливости зуба вспушвателя ВЛЛ-3 [12].

Проведенные расчеты показывают, что при учете неровного характера обрабатываемой поверхности, напряжения на рабочий орган возрастают при предпосевной обработке на 14%, а при приготовлении льнотресты до 25% при сохранении действующей силы сопротивления почвы обработке постоянной. Соответственно, коэффициент запаса прочности уменьшается на такую же величину.

Таким образом, предложенная модель позволяет более точно проводить расчеты на прочность почвообрабатывающих рабочих органов на их максимальные нагрузки.



Кроме того, следует отметить, что использование предложенной модели микрорельефа поверхностного слоя не ограничивается только расчетом рабочих органов, предназначенных для контактного взаимодействия с почвой. Применение модели микрорельефа оптимально при расчете других льноуборочных машин (теребильных аппаратов, вспушвателей лент льнотресты, пресс-подборщиков и прочих агрегатов), не предназначенных для непосредственной обработки почвы, но имеющих контакт с ней при выполнении технологического процесса. Моделирование микрорельефа поверхности почвы в соответствии с предлагаемой моделью, позволит более точно установить рабочий орган относительно поверхности почвы и обеспечить его работу без поломок.

Заключение. Обоснована необходимость учета параметров микрорельефа поверхности почвы в расчетах на прочность, взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Разработано программное обеспечение для моделирования микрорельефа почвы по алгоритму diamond-square, проведен сравнительный анализ соответствия характера микронеровностей математической модели и реальных данных, полученных профилографированием. Установлено соответствие общего характера зависимости размера микронеровностей почвы с данными профилографирования.

Проведены расчеты на прочность почвообрабатывающего рабочего органа иглы игольчатой бороны и предела выносливости зуба вспушвателя ВЛЛ-3 с учетом влияния микрорельефа поверхности почвы. Установлено, что учет микрорельефа поверхности почвы повышает расчетные механические напряжения иглы игольчатой бороны на 14%, а зуба вспушвателя до 25%, что в свою очередь требуют увеличение диаметра зуба игольчатой бороны с 0,16 м (у

существующей игольчатой бороны) до 0,18 м, а зуба вспушвателя с 0,08 м (у существующих вспушвателей) до 0,1 м.

Список источников

1. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р. А. Ростовцев, В. Г. Черников, И. В. Ушаповский, Р. А. Попов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14, № 3. – С. 45-52. – <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>.
2. Терновых К. С. Развитие инноваций в сельском хозяйстве: тенденции, перспективы / К. С. Терновых, В. В. Куренная, А. В. Агибалов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 2(65). – С. 96-103. – <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.96>.
3. Анализ работы игл игольчатой бороны при их качении по почве / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев, Н. Н. Толстухко, В. В. Шевчук // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 5. – С. 25-29.
4. Мударисов С.Г. Повышение обработки почвы путем совершенствования рабочих органов машин на основе моделирования технологического процесса: автореф. дисс. ...докт. техн. наук: 05.20.01 / Мударисов Салават Гумерович. – Челябинск, 2007. – 40 с.
5. Абрамов И. Л. Исследование микрорельефа поверхности почвенного слоя и его влияние на силу сопротивления почвы обработке / И. Л. Абрамов // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 8. – С. 87-90. – <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp87-90>.
6. Тишанинов И. А. Математическая модель оценки среза грунта с помощью фрактального анализа / И. А. Тишанинов, А. С. Свиридов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2021. – № 10. – С. 20-22. – <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2021-10-20-22>.
7. Voss R., Fractals in nature: from characterization to simulation, in The Science of Fractal Images, H.O. Peitgen and D. Saupe, Editor, 1988, Springer-Verlag, New York, pp. 21-70.
8. Musgrave F.K., C.E. Kolb, and R.S. Mace, The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains, Computer Graphics, July, 1989, 23:3, pp. 41-50.
9. Снук Г. Создание 3D-ландшафтов в реальном времени с использованием C++ и DirectX9: Пер. с англ. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2007. – 368 с.
10. Санжаров А.И. К вопросу использования ГИС-технологий для агроэкологической оценки земель в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / А.И. Санжаров, Г.П. Глазунов, Ю.А. Соловьева // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – №7. – С.24-32.
11. Самсонова В.П. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья / В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина // Вестник Московского Университета, сер. 17. Почвоведение. – 2014. – №3. – С. 36-44.
12. Абрамов И. Л. Исследование причин разрушения проволочного зуба вспушвателя лент лентострелы / И. Л. Абрамов // Известия Великолукской ГСХА. – 2018. – № 3. – С. 51-55.

References

1. The main problems of scientific support of flax growing / R. A. Rostovtsev, V. G. Chernikov, I. V. Shchapovsky, R. A. Popov // Agricultural machines and technologies. - 2020. – Vol. 14, No. 3. – pp. 45-52. – <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>.
2. Ternov K. S. Development of innovations in agriculture: trends, prospects / K. S. Ternov, V. V. Kurennaaya, A.V. Agibalov // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. - 2020. – vol. 13, No. 2(65). – pp. 96-103. – <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.96>.
3. Analysis of the work of needle harrow needles during their rolling on the soil / G. A. Khailis, M. M. Kovalev, N. N. Tolstushko, V. V. Shevchuk // Tractors and agricultural machines. - 2014. – No. 5. – pp. 25-29.
4. Mudarisov S.G. Improvement of soil tillage by improving the working bodies of machines based on process modeling: the author's abstract. diss. ...doct. Technical sciences: 05.20.01 / Mudarisov Salavat Gumerovich. – Chelyabinsk, 2007. – 40 p.

5. Abramov I. L. Investigation of the microrelief of the surface of the soil layer and its effect on the strength of soil resistance to processing / I. L. Abramov // Agrarian Scientific journal. – 2021. – No. 8. – pp. 87-90. – <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp87-90>.
6. Tishaninov I. A. Mathematical model for estimating the soil section using fractal analysis / I. A. Tishaninov, A. S. Sviridov // Computer-aided design in mechanical engineering. – 2021. – No. 10. – pp. 20-22. – <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2021-10-20-22>.
7. Voss R., Fractals in nature: from characterization to simulation, in The Science of Fractal Images, H.O. Peitgen and D. Saupe, Editor, 1988, Springer-Verlag, New York, pp. 21-70.
8. Musgrave F.K., C.E. Kolb, and R.S. Mace, The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains, Computer Graphics, July, 1989, 23:3, pp. 41-50.
9. Snuk G. Creating 3D landscapes in real time using C++ and DirectX9: Translated from English – М.: KUDITS-OBRAZ, 2007. – 368 p.
10. Sanzharov A.I. On the issue of using GIS technologies for agroecological assessment of lands in adaptive landscape farming systems / A.I. Sanzharov, G.P. Glazunov, Yu.A. Solovyova // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. – 2019. - No.7. – pp.24-32.
11. Samsonova V.P. Assessment of the role of relief in the spatial variability of agrochemically important soil properties for intensively cultivated agricultural land / V.P. Samsonova, Yu.L. Meshalkina // Bulletin of the Moscow University, ser. 17. Soil science. - 2014. - No. 3. – pp. 36-44.
12. Abramov I. L. Investigation of the causes of destruction of the wire tooth of the flax belt fluffer / I. L. Abramov // Izvestiya Velikolukskaya GSHA. – 2018. – No. 3. – pp. 51-55.

Информация об авторах

И.Л. Абрамов – кандидат технических наук; М.М. Ковалев – доктор технических наук; Г.А. Перов – кандидат технических наук.

Information about the authors

I. Abramov – Candidate of Technical Sciences; M. Kovalev – Doctor of Technical Sciences; G. Perov – Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2024

Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024