Тип статьи: научная
УДК 631,314:631.515:631.412
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-4-7-15

МЕХАНИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ СУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ НАГРУЖЕНИЯ

Виктор Николаевич Ожерельев [1]
[1]*Брянский государственный уграрный университет, Брянкс, Россия*
[1]vicoz@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-2121-3481

Реферат. *В статье приведены результаты исследования механических свойств почвы актуальных с точки зрения эффективного применения планчатых катков. Установлено, что важнейшим технологическим свойством почвы является ее анизотропия. Вследствие этого предельные напряжения, достаточные для разрушения почвы, при разных способах воздействия на нее различаются в 6-10 раз. Минимальной является прочность на растяжение и производная от нее предельная прочность почвы на изгиб. Он является важнейшим способом воздействия на пахотный слой, поскольку обеспечивает минимальную энергоемкость крошения почвы. В частности, путем совместного воздействия изгиба и сжатия разрушает комки почвы планчатый каток. В связи с этим выполнено исследование суглинистой почвы разной влажности на ее сопротивление изгибу и крошению. Установлено, что прочность почвы увеличивается с уменьшением ее влажности. При этом минимальное предельное напряжение характерно для влажности 20-23%. При дальнейшем увеличении влажности прочность почвы вновь несколько возрастает. В целом, зависимость прочности почвы от влажности как на изгиб, так и на сжатие описывается квадратным уравнением. Для определения величины напряжения на изгиб предложен новый вариант расчета момента сопротивления изгибу прямоугольного сечения образца, учитывающий анизотропию почвы. Вместо срединного слоя в качестве «нейтрального» использован поверхностный (верхний). Это обусловлено тем, что при имеющейся разнице в прочности растяжения и сжатия почвы верхний слой практически не деформируется до момента разрушения нижнего слоя. Вследствие этого целесообразно в расчете принимать поперечное сечение как составное, сдвинутое от его геометрической оси на половину высоты.*

Ключевые слова: *почва, предельные напряжения, анизотропия, влажность, планчатый каток.*

MECHANICAL ANISOTROPY OF LOAMY SOIL UNDER DIFFERENT TYPES OF LOADING

Victor Ozherelev [1]
[1]*Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russian Federation*
[1]vicoz@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-2121-3481

Abstract. *The results of the study of the mechanical properties of the soil, relevant from the point of view of the effective use of slatted rollers, are given in the article. It has been established that the most important technological property of the soil is its anisotropy. As a result, the limiting stresses sufficient for the destruction of the soil differ by 6-10 times with different methods of impact on it. The minimum is the tensile strength and the ultimate bending strength of the soil derived from it. It is the most important way of influencing the arable layer, since it provides the minimum energy intensity of soil crumbling. In particular, the slatted roller destroys soil clods by the combined action of bending and compression. In this regard, a study was made of loamy soil of different moisture content for its resistance to bending and crumbling. It has been established that the strength of the soil increases with a decrease in its moisture content. At the same time, the minimum limiting stress is typical for a moisture content of 20-23%. With a further increase in moisture, the strength of the soil again slightly increases. In general, the dependence of soil strength on moisture both in bending and in compression is described by a quadratic equation. To*

determine the magnitude of the bending stress, a new version of the calculation of the moment of resistance to bending of a rectangular section of the sample is proposed, taking into account the anisotropy of the soil. Instead of the middle layer, the surface (upper) layer was used as a "neutral" layer. This is due to the fact that with the existing difference in the tensile and compression strength of the soil, the upper layer practically does not deform until the destruction of the lower layer. As a result, it is advisable in the calculation to take the cross section as a composite one, shifted from its geometric axis by half the height.

Keywords: *soil, ultimate stresses, anisotropy, humidity, slatted roller.*

Для цитирования: Ожерельев В.Н. Механическая анизотропность суглинистой почвы при разных типах нагружения // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022. Т. 58, № 4. С. 7-15. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-7-15.

For citation: Ozherelev V. Mechanical anisotropicity of loamy soil under different types of loading // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022; 58(4): 7-15. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-7-15.

Благодарности: работа выполнена при техническом содействии кафедры природообустройства и водопользования института энергетики и природопользования Брянского ГАУ.

Acknowledgments: the work was carried out with the technical assistance of the Department of Environmental Engineering and Water Management of the Institute of Energy and Environmental Management of the Bryansk State Agrarian University.

Введение. С точки зрения агрономии, почва – это поверхностный слой земной коры, обладающий плодородием. С точки зрения механизации сельского хозяйства она представляет собой объект воздействия для рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин. В тоже время – это сложная многокомпонентная среда, состоящая из продуктов выветривания горных пород, органических остатков, живых организмов, воды и воздуха. Как плодородие почвы, так и ее механические характеристики зависят от соотношения между компонентами и степени измельчения базовой горной породы. В наибольшей степени значимым для характера взаимодействия почвы с рабочими органами является содержание в пахотном слое физической глины, воды и гумуса.

Одной из особенностей почвы является анизотропия ее свойств в разных направлениях [1-4]. Это касается как биохимических свойств и водопроницаемости, так и механических. Так, для суглинистых почв установлено, что наименьший предел их прочности характерен при растяжении и составляет 5…6 кПа, при сдвиге (средний) - 10…12 кПа. Максимальных значений указанный показатель достигает при сжатии (65…108 кПа) [5].

В связи с такой разницей в прочностных свойствах почвы при различных типах ее деформирования отчасти осознанно, а отчасти эмпирически были созданы рабочие органы, воздействующие на пахотный слой путем его деформации преимущественно на изгиб. Простейшим вариантом реализации указанного подхода является прямой двугранный клин, трансформирующийся, в частности, в *L*-образный нож фрезы [6], а наиболее сложным и максимально адаптированным к технологическим особенностям почвы можно считать традиционный плужной корпус.

В составе комбинированных почвообрабатывающих агрегатов широко используются катки, в частности - планчатые [7]. Не смотря на относительную простоту их конструкции и рутинность самой технологической операции прикатывания резервы совершенствования указанной техники не исчерпаны. В частности, об этом свидетельствуют соответствующие научные публикации [8, 9]. Они касаются как чисто конструктивных особенностей орудий, так и использования в качестве меры дополнительного воздействия на почву при ее уплотнении вибрации, что на протяжение многих десятилетий успешно применяется в дорожных машинах [10].

Одной из проблем при работе комбинированного почвообрабатывающего агрегата является достижение наиболее эффективного разрушения катком крупных комков и глыб. При

использовании планчатого катка возможны два крайних (идеальных) варианта взаимодействия планки 1 с объектом (комком почвы) 2 и бесконечное число промежуточных (рисунок 1).

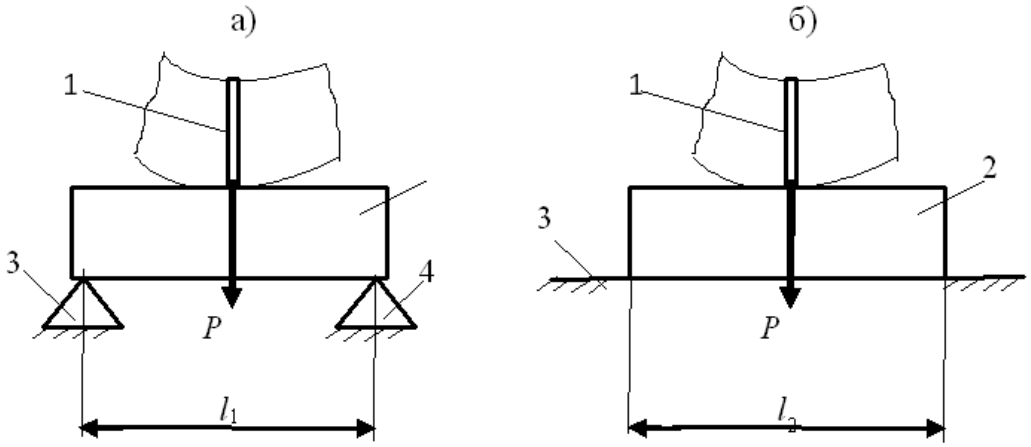


Рисунок 1 - Экстремальные варианты взаимодействия планки катка с комком почвы:
а) – с расположением комка на двух опорах; б) – на плоской, абсолютно жесткой поверхности;
1 – планка катка; 2 – комок почвы; 3, 4 – опоры

В первом случае (рисунок 1а) комок 2 опирается на две жесткие опоры 3 и 4 своими краями, а планка 1 осуществляет вертикальное воздействие на него по центру между опорными точками, то есть имеет место чистый изгиб. Во втором случае (рисунок 1б) комок 2 опирается своей нижней плоскостью на горизонтальную и абсолютно жесткую поверхность 3. Следовательно, такое напряженное состояние целесообразно считать чистым сжатием.

В реальности оба идеальных случая в чистом виде могут встретиться крайне редко. Чаще всего комок почвы под действием силы *P* будет частично вдавливаться в разрыхленную поверхность поля, подвергаясь одновременно и сжатию, и изгибу. Наиболее вероятно, что его разрушение, в конечном итоге, произойдет по наименьшему предельному напряжению.

Приведенные выше данные [5] свидетельствуют о том, что поскольку наиболее опасным является предельное напряжение растяжения, то, скорее всего, для сложного напряженного состояния, характерного для взаимодействия планки катка с комком почвы, лимитирующим является напряжение изгиба. Это обусловлено тем, что, в конечном итоге, при изгибе разрушение комка должно начинаться со слоя, подвергающегося наибольшей деформации растяжения.

В связи с этим, для более глубокого понимания процесса взаимодействия планки катка с комком почвы целесообразно получить значения предельных напряжений изгиба и сжатия и установить их зависимость от влажности почвы. Данных, полученных посредством твердомера Ревякина для такого анализа недостаточно, поскольку корреляционная связь между твердостью почвы и ее предельным сопротивлением на изгиб не установлена [11]. Исследования в этом направлении продолжаются, но объем имеющейся в литературе информации пока далек от необходимой полноты и возможности ее практического применения во всех вероятных вариантах взаимодействия, типа почвы и ее влажности [12, 13]. В связи с этим целью исследования является установление корреляционной связи прочностных свойств почвы, подвергающейся изгибающим нагрузкам и сжатию с ее влажностью.

Материал и метод. Объектом исследования является типичная для Брянской области серая лесная почва суглинистого состава. Содержание гумуса в ней варьируется в пределах 2,1 – 2,3%. Показатель кислотности pH = 6,0.

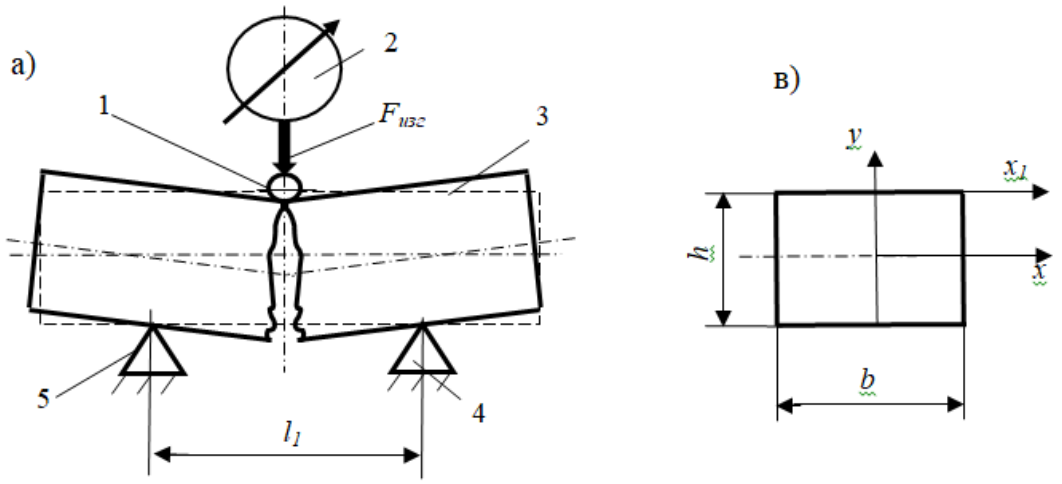
Предметом исследования являются физико-механические свойства почвы при изгибающем нагружении и сжатии и характер их варьирования в зависимость от ее влажности.

Исследованию подвергались образцы в виде брусков прямоугольного сечения длиной 100-150 мм, взятые без нарушения их естественного сложения. Каждый образец дополнительно формировали, срезая излишки почвы, обеспечивая таким образом форму поперечного сечения, близкую к прямоугольной. Поскольку естественные дефекты и пустоты не позволяли обеспечить полное единообразие образцов, то ширина поперечного сечения b варьировалась в пределах 38-60 мм, а высота h в пределах 30-50 мм. Для обеспечения возможности варьирования влажности почвы в достаточно широких пределах образцы брали в разных точках поля, ориентируясь визуально на предполагаемую влажность, зависящую от особенностей микрорельефа поверхности. Точное измерение влажности осуществляли весовым методом после выполнения каждого эксперимента.

При измерении предельной нагрузки на изгиб образец 3 (исходный профиль обозначен пунктирными линиями) укладывали на две опоры 4 и 5 (рисунок 2а) с расстоянием между ними l_1 = 75 мм. Нагружение осуществляли посредством давления на плунжер 1, имеющий круглое поперечное сечение диаметром d = 12 мм и длину 60 мм. При разрушении образца (продольные профили его половин обозначены сплошными линиями) предельную вертикальную нагрузку $F_{изг}$ фиксировал электронный динамометр 2.

Поскольку образец 3 разрушался на два фрагмента, структура каждого из которых оставалась практически неизменной, то один из них использовали для измерения предельного усилия сжатия. Для этого его помещали целиком на твердую (стальную) поверхность 4, после чего прикладывали вертикальное усилие $P_{сж}$ к тому же (что и при изгибе) плунжеру 1, увеличивая его до тех пор, пока не происходило полное разрушение монолита в заштрихованной зоне 6. Одновременно с этим растрескивалась почва в локальных областях 7, граничащих с зоной 6 ее сплошного разрушения.

Результаты эксперимента обработаны на ПК в программе Excel.



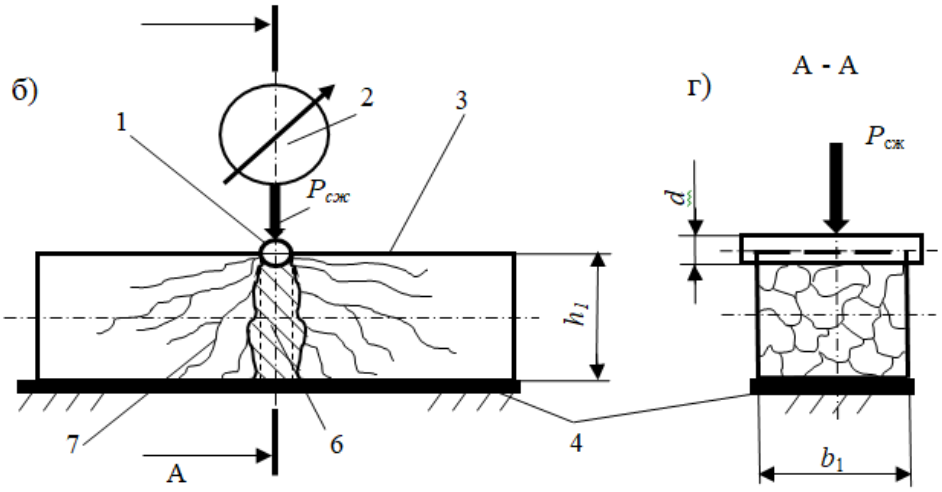


Рисунок 2 - Принципиальная схема измерения:
а) – изгиб; б) – сжатие; в), г) – поперечное сечение образца, подвергающегося изгибу и сжатию, соответственно;
1-плунжер; 2 – динамометр; 3 – образец почвы; 4, 5 – опоры; 6 – зона разрушения почвы при сжатии; 7 – зона растрескивания почвы

Результаты и их обсуждение

Результаты непосредственных измерений приведены в таблице.

Таблица – предельные усилия нагружения образцов почвы на изгиб ($F_{изг}$) и сжатие ($P_{сж}$)

№	Поперечное сечение образца		Предельные усилия, Н		Влажность, %	№	Поперечное сечение образца		Предельные усилия, Н		Влажность, %
	b, мм	*h*, мм	$F_{изг}$	$P_{сж}$			*b*, мм	*h*, мм	$F_{изг}$	$P_{сж}$	
1	80	50	25,5	105	35,9	6	45	40	21,5	40	15,5
2	38	30	100	220	11,1	7	46	30	23	30	23,4
3	48	45	45	130	8,5	8	43	35	25	60	15
4	60	40	14	40	20,4	9	58	35	2	54	23,1
5	45	38	13	35	20,8	10	58	50	30	70	22,4

Поскольку размеры поперечных сечений образцов варьировались в широких пределах, то непосредственное сопоставление вариантов опыта по величине измеренных усилий не представляется возможным. Кроме того, сопоставить два принципиально различных по характеру нагружения варианта представляется возможным только по величине предельно допустимых напряжений. В случае с изгибом это должно быть $[\sigma_{изг}]$, тогда как при сжатии в качестве критерия оценки целесообразно использовать $[\sigma_{сж}]$.

При нахождении предельного напряжения сжатия можно воспользоваться известной формулой

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{сж}}{d \cdot b_1} \text{ Па} \quad (1)$$

В случае изгиба методика расчета более сложная, поскольку поперечное сечение образца нагружается не просто поперечным усилием, а изгибающим моментом. То есть

$$\sigma_{изг} = \frac{F_{изг} \cdot l_1}{2W} \text{ Па} \quad (2)$$

где W – момент сопротивления изгибу поперечного сечения образца.

В случае с механически изотропными материалами проблема решается путем использования общеизвестной формулы для прямоугольного сечения

$$W = \frac{b \cdot h^2}{4} \quad (3)$$

Если же учитывать механическую анизотропию почвы, то условный «нейтральный» слой целесообразно совместить с верхней плоскостью образца, так как, как было отмечено выше, предел прочности на сжатие у почвы в 10 – 20 раз больше, чем на растяжение [5]. Тогда момент сопротивления изгибу наиболее адекватно может быть представлен как в случае с составным сечением, осевая линия которого переносится на величину $0{,}5h$ вверх от осевой линии исходного образца (от оси x до x_1 – рисунок 2в). В результате формула (3) трансформируется следующим образом

$$W_1 = \frac{b \cdot h^2}{3} \quad (4)$$

То есть, величина предельного напряжения на изгиб для почвы получается несколько меньше, чем при ориентации на формулу (3). Рассчитанные по формулам (1) и (2) результаты представлены на графиках (рисунок 3).

Общей для обоих вариантов нагружения образцов является закономерность влияния на прочностные параметры почвы ее влажности. При уменьшении влажности прочность увеличивается. Минимальные значения предельного напряжения характерны для влажности 20 – 23%. Именно такие параметры почвы соответствуют понятию ее «спелости» и минимальной энергоемкости процесса механической обработки [2]. При дальнейшем увеличении влажности структурные составляющие почвы начинают слипаться, что способствует упрочнению всего объема испытываемого образца. В большей степени это характерно для процесса сжатия (рис. 3). Таким образом, зависимость прочностных характеристик суглинистой почвы от ее влажности имеет полиномиальной характер вне зависимости от типа нагружения.

При любой влажности предельное напряжение, достаточное для разрушения почвенного монолита, меньше при изгибе, чем при сжатии. Если считать по усредненным значениям, то разница составляет 2 – 3 раза. Если же учитывать высокую степень дифференциации показателей, то разница между величиной предельных напряжений может достигать 6 – 10 раз, что согласуется с литературными данными [5].

Специфика методики эксперимента позволяет сравнивать значения предельных напряжений изгиба и сжатия попарно, поскольку в каждом измерении использовался один и тот же образец с гарантированно одинаковой влажностью и теми же дефектами структуры (поры, включения и т.п.). В результате можно констатировать, что только в одном из опытов значение предельного напряжения изгиба незначительно превысило аналогичный параметр, характерный для сжатия. В принципе, этот вариант опыта можно считать «выбросом» и не учитывать при анализе. Максимальная разница между параметрами в парах характерна для влажности 23,1% и составляет 24,5 раза (в пользу сжатия).

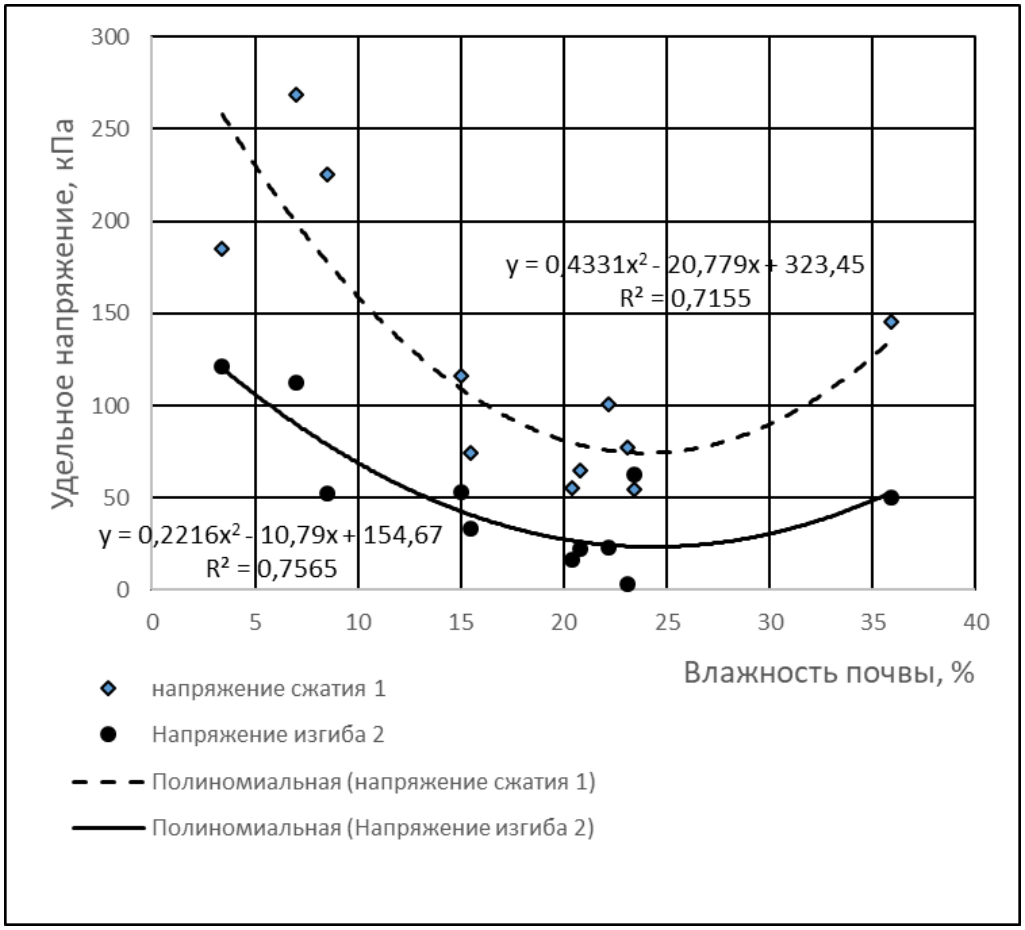


Рисунок 3 - Зависимость предельного напряжения изгиба и сжатия для суглинистой почвы от ее влажности

Выводы

1. Предел прочности для суглинистой почвы зависит от ее влажности, причем зависимость имеет полиномиальный характер. Минимальное значение предельные напряжения почвы принимают при ее влажности 20-23%.

2. Предельные напряжения изгиба для суглинистой почвы от 2 - 3 до 6 – 10 раз меньше, чем при ее сжатии.

3. Разница между пределом прочности почвы на изгиб и сжатие уменьшается по мере уменьшения ее влажности.

4. Характерная для почвы механическая анизотропия предопределяет особый подход как к конструированию рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин, так и к их расчету.

Список источников

1. Анизотропия свойств некоторых антропогенно-преобразованных почв подзолистого типа / А.И. Поздняков, А.В. Русаков, С.М. Шалагинова, А.Д. Позднякова // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1308-1319.

2. Ожерельев В.Н. Исследование и конструирование фрезерных машин: монография. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2019. 196с.

3. Скворцова Е.Б., Рожков В.А. Анизотропия строения и микропространственной изменчивости пор на агрегатном уровне организации текстурно-дифференцированной почвы // Почвоведение. 2011. №7. С. 785-794.

4. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В. Компьютерное моделирование и параметризация в среде MATHCAD контуров увлажнения при капельном орошении. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. №4(64). С. 367-378.

5. Технологические свойства почвы [Электронный ресурс] / Код доступа. https://mehanik-ua.ru/lektsii-po-tekhnicheskim-temam/182-tekhnologicheskie-svojstva-pochvy.html, свободный. – (дата обращения: 05.08. 2022).

6. Агрегат для ухода за высокостебельными культурами: а. с. 1724040 СССР №4654677 / Блохин В.Н.; заявл. 24.02.89; опубл. 07.04.92, Бюл. №13. 3с.

7. Курдюмов В.И., Шаронов И.А., Прошкин В.Е. Экспериментальные исследования почвообрабатывающего катка // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. №2(26). С. 141-145.

8. Шаронов И.А., Курдюмов В.И., Прошкин В.Е. Результаты исследований цилиндро-спирального почвообрабатывающего катка // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13. №4(51). С. 135-139.

9. Полевые испытания почвообрабатывающего катка вибрационного действия / В.Е. Прошкин, Е.С. Зыкин, В.И. Курдюмов, Е.Н. Прошкин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. №24(56). С. 6-12.

10. Машины для земляных работ: Учебник / Н.Г. Гаркави [и др.]. М.: Высшая школа, 1982. 335с.

11. Сельскохозяйственные машины. Практикум / М.Д. Адиньяев [и др.]. М.: Колос, 2000. 240с.

12. Смильский В.В., Сидорчук А.В. Масштабный эффект в механике почв. // В сб. «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве». Мат-лы Международной научно-технической конфер. В 3-х томах. Респ. Беларусь. Минск: Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2012. С. 93-100.

13. Семенихина Ю.А. Исследование вязкоупругого состояния почвы под воздействием активной поверхности почвообрабатывающего катка // Тракторы и сельхозмашины. 2017. №7. С. 32-36.

References

1. Anizotropiya svojstv nekotory`x antropogenno-preobrazovanny`x pochv podzolistogo tipa / A.I. Pozdnyakov, A.V. Rusakov, S.M. Shalaginova, A.D. Pozdnyakova // Pochvovedenie. 2009. № 11. S. 1308-1319.

2. Ozherelev V.N. Issledovanie i konstruirovanie frezerny`x mashin: monografiya. Bryansk: Izd-vo Bryanskij GAU, 2019. 196s.

3. Skvorczova E.B., Rozhkov V.A. Anizotropiya stroeniya i mikroprostranstvennoj izmenchivosti por na agregatnom urovne organizacii teksturno-differencirovannoj pochvy` // Pochvovedenie. 2011. №7. S. 785-794.

4. Rogachev A.F., Melixova E.V. Komp`yuternoe modelirovanie i parametrizaciya v srede MATHCAD konturov uvlazhneniya pri kapel`nom oroshenii. // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vy`sshee professional`noe obrazovanie. 2021. №4(64). S. 367-378.

5. Texnologicheskie svojstva pochvy` [E`lektronny`j resurs] / Kod dostupa. https://mehanik-ua.ru/lektsii-po-tekhnicheskim-temam/182-tekhnologicheskie-svojstva-pochvy.html, svobodny`j. – (data obrashheniya: 05.08. 2022).

6. Agregat dlya uxoda za vy`sokostebel`ny`mi kul`turami: a. s. 1724040 SSSR №4654677 / Bloxin V.N.; zayavl. 24.02.89; opubl. 07.04.92, Byul. №13. 3s.

7. Kurdyumov V.I., Sharonov I.A., Proshkin V.E. E`ksperimental`ny`e issledovaniya pochvoobrabaty`vayushhego katka // Vestnik Ul`yanovskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii. 2014. №2(26). S. 141-145.

8. Sharonov I.A., Kurdyumov V.I., Proshkin V.E. Rezul`taty` issledovanij cilindro-spiral`nogo pochvoobrabaty`vayushhego katka // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. T. 13. №4(51). S. 135-139.

9. Polevy`e ispy`taniya pochvoobrabaty`vayushhego katka vibracionnogo dejstviya / V.E. Proshkin, E.S. Zy`kin, V.I. Kurdyumov, E.N. Proshkin // Vestnik Ul`yanovskoj gosudarstvennoj sel`skoxozyajstvennoj akademii. 2021. №24(56). S. 6-12.

10. Mashiny` dlya zemlyany`x rabot: Uchebnik / N.G. Garkavi [i dr.]. M.: Vy`sshaya shkola, 1982. 335s.

11. Sel`skoxozyajstvenny`e mashiny`. Praktikum / M.D. Adin`yaev [i dr.]. M.: Kolos, 2000. 240s.

12. Smil`skij V.V., Sidorchuk A.V. Masshtabny`j e`ffekt v mexanike pochv. // V sb. «Nauchno-texnicheskij progress v sel`skoxozyajstvennom proizvodstve». Mat-ly` Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konfer. V 3-x tomax. Resp. Belarus`. Minsk: Respublikanskoe unitarnoe predpriyatie «Nauchno-prakticheskij centr Nacional`noj akademii nauk Belarusi po mexanizacii sel`skogo xozyajstva», 2012. S. 93-100.

13. Semenixina Yu.A. Issledovanie vyazkouprugogo sostoyaniya pochvy` pod vozdejstviem aktivnoj poverxnosti pochvoobrabaty`vayushhego katka // Traktory` i sel`xozmashiny`. 2017. №7. S. 32-36.

Информация об авторах

В.Н. Ожерельев – доктор сельскохозяйственных наук, профессор.

Information about the authors

V.N. Ozherelev - Doctor of Agricultural Sciences, Professor.

Поступила в редакцию (Received): 08.08.2022 Принята к публикации (Accepted): 10.08.2022