

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.51

DOI 10.31857/S2500262725010123 EDN CTGRTQ

ДЕФОРМАЦИЯ РЕБЕР И СМЯТИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПЛАСТА ПРИ ЕГО ОБОРОТЕ В СОБСТВЕННОЙ БОРОЗДЕ© 2025 г. **Ю. С. Ценч**, доктор технических наук, **Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН, **В. В. Шаров**, кандидат технических наук, **Н. В. Алдошин**, доктор технических наук*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: vimasp@mail.ru*

Почвенный пласт в процессе своего оборота подвергается сложным деформациям, под воздействием которых происходит его смятие и разрушение. Выявление характера и величин деформаций почвенного пласта в процессе оборота позволяет осуществлять проектирование плужных поверхностей с наиболее рациональными конструктивно-технологическими параметрами. Перспективный прием обработки почвы, обеспечивающий слитную выровненную поверхность пашини, – оборачивание почвенного пласта на 180 °С в собственную борозду. Технология вспашки с оборотом пласта в собственную борозду обеспечивает разрушение пласта по линиям наименьших почвенных связей. Цель исследований – количественная оценка деформационных изменений почвенного пласта при обороте в собственной борозде. Изучены деформация ребер и смятие поперечного сечения пласта в зависимости от его параметров и интенсивности закручивания при обороте. Проведена оценка величины смятия почвенного пласта в зависимости от его размерных характеристик. Обнаружены новые деформационные явления, возникающие в процессе его целенаправленного движения и установлены закономерности влияния геометрических параметров пласта на деформацию ребер и смятие поперечного сечения. В результате оптимизации параметров пласта возможен подбор варианта, когда почва будет разрушаться в основном под воздействием растягивающих деформаций, что выгодно с энергетической точки зрения.

DEFORMATION OF THE RIBS AND CRUMPLING OF THE SOIL LAYER CROSS-SECTION DURING ITS ROTATION IN ITS OWN FURROW**Yu. S. Tsench, Ya. P. Lobachevsky, V. V. Sharov, N. V. Aldoshin***Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moskva, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: vimasp@mail.ru*

In the process of its turnover, the soil layer undergoes complex deformations, under the influence of which it crumples and collapses. The identification of the nature and magnitude of deformations of the soil layer during turnover allows the design of plough surfaces with the most rational structural and technological parameters. A promising method of soil treatment, providing a cohesive leveled surface of arable land, is to wrap the soil layer by 180 °C into its own furrow. The technology of plowing with the turnover of the formation into its own furrow makes it possible to ensure the destruction of the formation along the lines of the least soil connections. The purpose of the work is to quantify the deformation changes of the soil layer during its rotation in its own furrow. Deformations of the ribs and crumpling of the cross-section of the formation are studied depending on its parameters and the intensity of twisting during rotation. The amount of crumpling of the soil layer has been estimated depending on its dimensional characteristics. Theoretical and experimental studies of the turnover of the soil stratum into its own furrow have made it possible to detect new deformation phenomena that occur during its purposeful movement and to establish patterns of influence of the geometric parameters of the stratum on the deformation of the ribs and the crumpling of the cross section. As a result of optimizing the formation parameters, it is possible to select an option when the soil will collapse mainly under the influence of tensile deformations, which is beneficial from an energy point of view.

Ключевые слова: обработка почвы, гладкая вспашка, оборот пласта, собственная борозда, деформация, смятие, конструктивные параметры.

Keywords: tillage, smooth plowing, reservoir turnover, own furrow, deformation, crumpling, structural parameters.

Существенным шагом в уменьшении энергоёмкости и повышении качества процесса вспашки является технология, обеспечивающая оборот почвенных пластов на 180° с укладкой их в свои собственные борозды (рис. 1). При таком способе вспашки разрушение пласта происходит в основном за счет деформаций растяжения по линиям наименьших почвенных связей, что обеспечивает некоторую экономию энергии на вспашке [1, 2].

Технология вспашки с оборотом пласта в собственную борозду сулит и агротехнические преимущества: возможна полная заделка растительных остатков, минеральных и органических удобрений на глубину вспашки; поле приобретает выровненный характер без развальных

борозд и свальных гребней; эрозионно-опасные частицы, которые накапливаются на поверхности поля после многократной поверхностной обработки и воздействия движителей трактора, заделываются на дно борозды; сокращается время основной обработки поля за счет четочного способа движения агрегата и исключения разбивки поля на загоны перед началом работы [3].

В процессе оборота при вспашке пласт почвы подвергается сложным деформациям, под воздействием которых происходит его смятие и разрушение. Деформации возникают как от растяжения, так и от сжатия пласта. Зона сжимающих усилий, возникающих в пласте при его обороте в соседнюю борозду, находится в районе опорного ребра Д, относительно которого происходит вра-

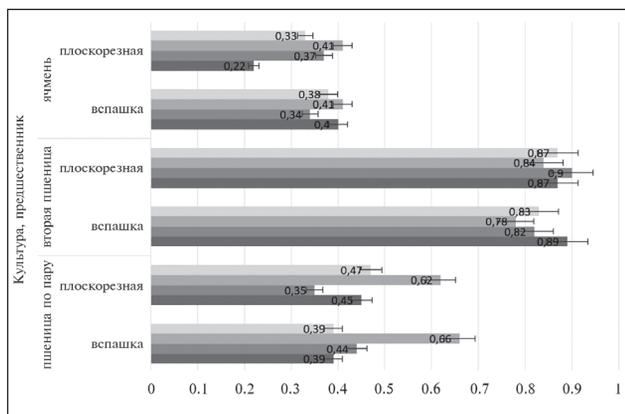


Рис. 1. Схема оборота теоретического пласта в собственную борозду: ABCD – начальное положение поперечного сечения пласта, A'B'C'D' – положение поперечного сечения пласта при повороте на 90°, A''B''C''D'' – положение поперечного сечения пласта при повороте на 180°. ZXY – оси прямоугольной системы координат. S – расстояние, на котором происходит оборот поперечного сечения пласта на 180°.

щение. Величина зоны сжатия очерчивается радиусом вращения центра тяжести поперечного сечения пласта и зависит от его параметров: ширины (соответствует ширине корпуса плуга) и высоты (глубина обработки) [4, 5].

Исследование характера и величины деформаций почвенного пласта позволит осуществлять проектирование плужных поверхностей с наиболее рациональными конструктивно-технологическими параметрами, обеспечивающими требуемые воздействия на обрабатываемую среду [6, 7].

Такой подход согласуется с подходом основоположника земледельческой механики, академика В. П. Горячкина, изложенной в работе, посвященной поверхности отвала. Он писал: «Рациональный способ проектирования поверхностей отвала должен заключаться в следующем: сначала надо было бы выяснить ту деформацию, которую должен претерпеть пласт при прохождении по отвалу, а затем подобрать подходящую, математически правильную поверхность. Но пока этот идеал является недостижимым. Можно поставить обратную задачу: задаться какой-либо поверхностью и рассмотреть задачу о том, как эта поверхность может деформировать пласт...» [8].

Цель исследований – количественная оценка деформационных изменений ребер и сечения почвенного пласта при его обороте в собственной борозде.

Методика. Рассмотрим деформацию характерных ребер теоретического пласта. Зная длину ребра до (L_0) и после закрутки пласта (L_i), можно определить его деформацию E_r (удлинение или сжатие):

$$E_r = \frac{L_i - L_0}{L_0} \cdot 100\% = \left(\frac{L_i}{L_0} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Деформации ребер A-A'-A'', B-B'-B'', C-C'-C'', D-D'-D'' определялись при различной толщине пласта (0,15; 0,20; 0,25; 0,30 м) и с изменяющимися параметрами коэффициента устойчивости пласта k (отношение ширины пласта b к его толщине a) в интервале 1,0...2,6 с шагом 0,2 и коэффициента закрутки пласта μ (отношение длины, на которой пласт оборачивается S к его ширине b) в интервале 1,5...4,0 с шагом 0,5. Многовариантные расчеты проводились на ЭВМ с помощью программы электронных таблиц Excel.

Выполненные с помощью математических моделей исследования кинематики полного (на 180°) оборота пласта в свою борозду на длине S с размерами, $a \times b \times L_0$ позволили определить виды и значения возникающих деформаций характерных ребер и их зависимости от геометрических параметров. Установлено, что в интервале от 0 до $\pi/2$ рад. все ребра пласта подвергаются растяжению. Динамика деформаций различна, но в итоге суммарные деформации в интервале от 0 до π радиан у ребер A-A'-A'' и B-B'-B'' равны между собой, также как и у ребер C-C'-C'' и D-D'-D''.

Наибольший интерес представляет исследование деформаций, возникающих на участке от 0 до $\pi/2$ рад., так как именно на нем происходит основное разрушение почвенного пласта в процессе оборота.

Анализ проведенных расчетов показывает, что величины деформаций ребер пласта идентичны для всех значений толщины пласта a при условии, что коэффициенты k и μ одинаковы.

Ребра A-A'-A'' и B-B'-B'' в интервале от 0 до 90° имеют различные значения деформаций. Так, при $k = 1,0$ и $\mu = 1,5$ деформация ребра B-B'-B'' максимальна и составляет 77,37 %, что на 25,70 % больше, чем деформация ребра A-A'-A''. При $k = 2,6$ и $\mu = 4,0$ деформация ребра B-B'-B'' минимальна (12,33 %), что на 0,64 % меньше, чем деформация ребра A-A'-A''. Примерно одинаковые значения деформаций ребер A-A'-A'' и B-B'-B'' отмечается при $k = 2,0$ и $\mu = 4,0$, соответственно, 12,84 % и 12,75 %. Графические зависимости деформации ребра A-A'-A'' в зависимости от коэффициента устойчивости пласта k в интервале оборота от 0 до 90° приведены на рис. 2.

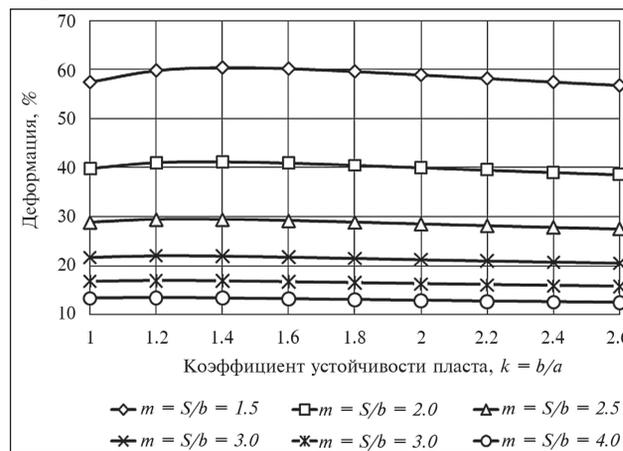


Рис. 2. Зависимости деформаций ребра A-A'-A'' теоретического пласта от коэффициента устойчивости пласта k при различных значениях μ в интервале от 0 до 90°.

С ростом коэффициента m от 1,5 до 4,0 деформация ребра B-B'-B'' уменьшается по плавной зависимости с 77,25 % до 18,13 %, при $k = 1$, то есть ее величина изменяется на 76,53 % (рис. 3).

При $k = 2,6$ деформация ребра B-B'-B'' уменьшается на 78 %, с 56,05 % до 12,33 %. При одних и тех же значениях μ , но с увеличением коэффициента k деформация ребра B-B'-B'' уменьшается на 27,53 %, с 77,25 % ($k = 1$) до 56,05 % ($k = 2,6$) при $\mu = 1,5$. При $\mu = 4,0$ деформация ребра B-B'-B'' с ростом k уменьшается на 31,99 %, с 18,13 % ($k = 1$) до 12,33 % ($k = 2,6$). Интенсивность изменения деформации ребра B-B'-B'' с ростом коэффициента k замедляется.

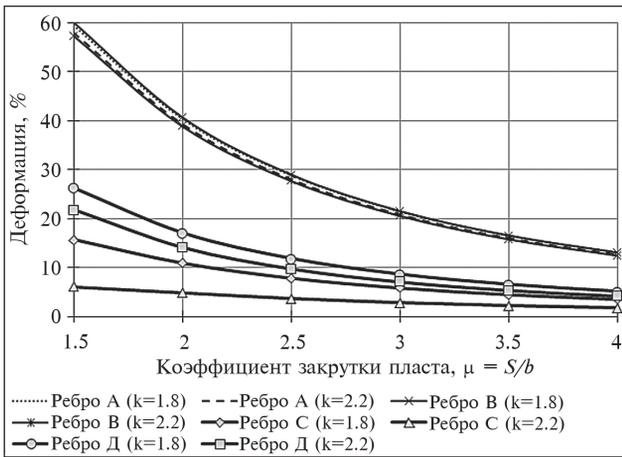


Рис. 3. Зависимости деформаций ребер А-А'-А'', В-В'-В'', С-С'-С'' и Д-Д'-Д'' теоретического пласта от его геометрических параметров в интервале от 0 до 90°.

Примерно такие же процентные показатели деформации, как у ребра В-В'-В'', присущи и деформации ребру А-А'-А'', а их характеры графических зависимостей аналогичны.

Ребра С-С'-С'' и Д-Д'-Д'' деформируются в меньшей степени, чем ребра А и В, а при возрастании коэффициента k свыше 2,5 проявляется сжатие ребра С-С'-С''. Деформация ребра С-С'-С'' максимальна при $k = 1,0$ и $\mu = 1,5$, ее значение составляет 57,37 %. Ребро Д-Д'-Д'' в этом случае деформируется на 42,13 %. Минимальное значение деформации ребра С-С'-С'' составляет 0,32 % (ребро сжимается) при $k = 2,6$ и $\mu = 1,5$, при этом деформация ребра Д-Д'-Д'' составляет 18,55 %. Деформации ребер С-С'-С'' и Д-Д'-Д'' примерно одинаковы. При значениях $k = 1,4$ и $\mu = 2,5$ их величины соответственно равны 14,97 % и 15,02 %.

Результаты и обсуждение. Проведенные исследования показывают, что ребра пласта деформируются в довольно большом диапазоне. Манипулируя параметрами k и μ , всегда можно подобрать необходимую величину деформации, при которой пласт остается цельным или

разрушается. Так, при проектировании отвала для работы на задерненных почвах необходимо стремиться к минимальной деформации ребер пласта, это дает возможность оборачивать его сплошной неразрывной лентой, что обеспечивает выровненную поверхность пашни. Наоборот, при вспашке старопахотных почв деформация должна быть максимальной, при которой обеспечивается разрушение целостности пласта на отдельные структурные агрегаты.

Суммарные деформации ребер А-А'-А'' и В-В'-В'' пласта в интервале от 0 до 180° так же, как и ребер С-С'-С'' и Д-Д'-Д'', равны между собой.

Величина деформаций ребер зависит от геометрических параметров пласта a , b и длины S , на которой происходит оборот пласта. Анализ расчетных данных показывает, что величина деформаций ребер А-А'-А'', В-В'-В'' больше, чем ребер С-С'-С'', Д-Д'-Д'' в 2,2...2,3 раза. Это существенная разница в принципе указывает на то, что в процессе оборота пласта на 180° по его объему создаются неодинаковые растягивающие деформации, что может привести к неравномерному крошению почвы в пахотном слое [9].

Проведенными исследованиями установлено, что все ребра пласта А-А'-А'', В-В'-В'', С-С'-С'' и Д-Д'-Д'' подвергаются деформациям растяжения. Отсюда можно сделать вывод о разрушении почвенного пласта преимущественно под воздействием растягивающих усилий, что является рациональным с энергетической точки зрения.

Однако при осуществлении оборота в собственную борозду в пласте присутствует зона (в районе центральной линии пласта), в которой деформации сжатия и растяжения близки к нулю. Это значит, что в этом месте разрушение почвы минимально или вообще не происходит (во многом это зависит от физико-механических свойств почвы) [10, 11] (рис. 4).

Выявленные теоретические зависимости деформаций ребер пласта создают предпосылку к обоснованию рациональных параметров лемешно-отвальных поверхностей на стадии проектирования. При этом на первом этапе создания нового корпуса плуга можно задаваться необходимой деформацией почвенного пласта, а затем уже проектировать под эти условия рабочую поверхность.

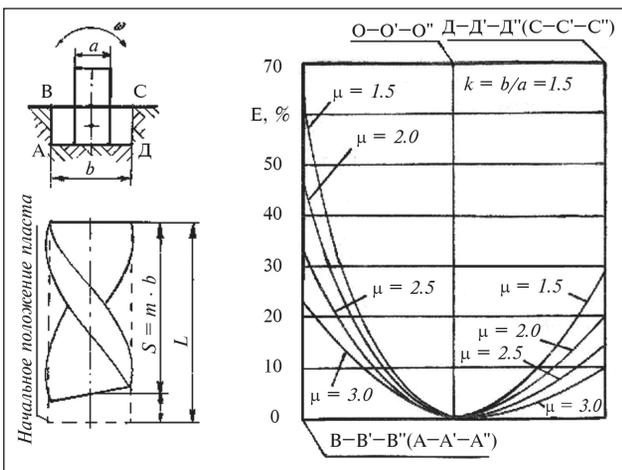


Рис. 4. Деформации ребер А-А'-А'', В-В'-В'', С-С'-С'', Д-Д'-Д'' теоретического пласта при его обороте в собственную борозду на 180°: a – толщина пласта, b – ширина пласта, L – первоначальная длина пласта, S – расстояние, на котором происходит полный оборот пласта, ΔL – продольное перемещение поперечного сечения пласта, E – деформация ребер пласта.

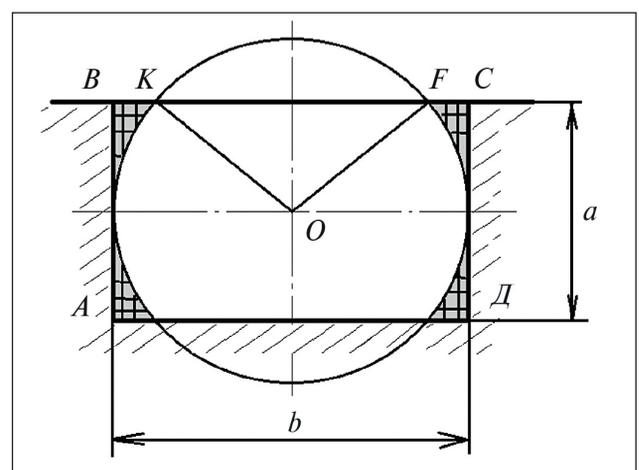


Рис. 5. Места смятия (заштрихованы) поперечного сечения пласта размером $a \times b$ в процессе оборота: АВСД – поперечное сечение пласта, О – центр поперечного сечения пласта, точки К и F – места пересечения окружности (с центром в точке О) радиусом $b/2$ с гранью поперечного сечения пласта ВС.

Смятие поперечного сечения пласта. Анализ оборота поперечного сечения пласта в габаритах собственной борозды показывает, что его поперечные габариты выходят за границы стенок борозды (рис. 5).

При осуществлении вспашки это может привести либо к уплотнению (смятию) поперечного сечения пласта, либо к частичному скалыванию сминаемого объема и перераспределению его по другим местам. В любом случае это должно сказываться на качественных и энергетических показателях работы плуга, поэтому целесообразно провести теоретические исследования такого явления применительно к различным размерам пласта [12, 13, 14].

Величину смятия поперечного сечения пласта можно определить как часть деформируемой площади, выраженной в процентах от полной площади поперечного сечения пласта:

$$\delta = \frac{S_{CM}}{S_{\Pi}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где S_{Π} – полная площадь поперечного сечения пласта, m^2 ; S_{CM} – часть площади поперечного сечения пласта, сминаемой в процессе оборота, m^2 .

На рис. 5 показана величина площади смятия S_{CM} поперечного сечения пласта при его обороте на 180° . Площадь смятия определяется как разность между площадью прямоугольника ABCD – S_{Π} и площадью части круга S_{KP} радиусом $b/2$, отсекаемой большими сторонами AD и BC прямоугольника ABCD. Часть площади круга определяется как разность между площадью круга S_{KP} и площадями двух сегментов, отсекаемых от круга сторонами AD и BC прямоугольника ABCD.

В формализованном виде определение площади смятия можно записать следующим образом:

$$S_{CM} = S_{\Pi} - S_{KP} + 2 \cdot S_{CEK.OKF} - 2 \cdot S_{TP.OKF} \quad (3)$$

где S_{KP} – площадь круга радиусом $R = b/2$, m^2 ; $S_{CEK.OKF}$ – площадь сектора OKF, m^2 ; $S_{TP.OKF}$ – площадь треугольника OKF, m^2 .

Выразив значение площадей через толщину пласта a и коэффициент устойчивости k , формула по определению смятия поперечного сечения SCM примет вид:

$$S_{CM} = k^2 \cdot a^2 \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \arccos \frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} \cdot \sqrt{k^2 - 1} \right). \quad (4)$$

Процентное содержание сминаемой площади поперечного сечения пласта составит:

$$\delta = k \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \arccos \frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} \cdot \sqrt{k^2 - 1} \right) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Зависимость смятия поперечного сечения пласта δ от значения коэффициента его устойчивости k носит плавный, ниспадающий характер (рис. 6). При $k = 1$ значение процентного смятия поперечного сечения пласта максимально и равняется 21,5 %, при $k = 3$ величина смятия поперечного сечения пласта равно 2 %. То есть при изменении k в три раза величина смятия изменяется в 10,5 раза.

Таким образом, при осуществлении оборота пласта в собственной борозде важное значение имеет величина отношения ширины пласта b к его толщине a . Согласно зависимости (рис. 6), чем больше величина k , тем меньше деформация поперечного сечения пласта, а значит, больше вероятность его оборота без заклини-

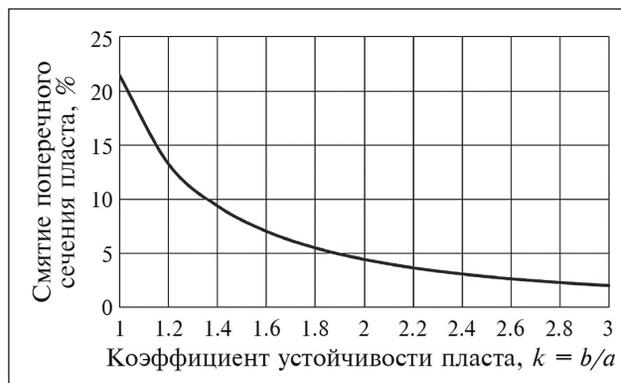


Рис. 6. Изменение смятия поперечного сечения пласта δ в зависимости от значения коэффициента устойчивости пласта k .

вания в габаритах борозды. Однако при обосновании размеров поперечного сечения необходимо учитывать, что с ростом коэффициента устойчивости k возрастают подъем центра тяжести и продольное перемещение пласта, а также увеличивается неравномерность деформаций его ребер.

Явление смятия поперечного сечения пласта необходимо учитывать при проектировании лемешно-отвальных поверхностей с целью обеспечения точного оборота пласта, исключения забивания корпусов плуга почвой.

Выводы. Теоретические исследования оборота почвенного пласта в собственную борозду позволило оценить деформационную картину, возникающую в процессе его целенаправленного движения, и установить закономерности влияния геометрических параметров пласта на деформацию ребер и смятие поперечного сечения. Установлено, что путем варьирования параметров пласта возможен подбор режима его оборота, когда почва будет разрушаться в основном под воздействием растягивающих деформаций, что выгодно с энергетической точки зрения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования выполнены по госзаданию. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 4. С. 4–10.
2. *Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия* / В. М. Косолапов, А. С. Цыгуткин, Н. В. Алдошин и др. // *Кормопроизводство*. 2022. № 3. С. 41–47.
3. Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Методологические аспекты стандартизации машинных технологий производства продукции растениеводства // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. № 1(34). С. 61–67.

4. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы / С. И. Старовойтов, Ю. С. Ценч, В. М. Коротченя и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 1. С. 16–21.
5. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing / S. G. Mudarisov, Ya. P. Lobachevsky, I. M. Farkhutdinov, et al. // *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. P. 37–44.
6. Развитие технологий полосной энергоресурсосберегающей обработки почвы / Б. Х. Ахалая, Ю. Х. Шогенов, Ю. С. Ценч и др. // *Технический сервис машин*. 2018. Т. 132. С. 232–237.
7. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, Ю. С. Ценч и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. № 4. С. 63–68.
8. Сақун В. А., Лобачевский Я. П., Сизов О. А. Современный этап и пути дальнейшего развития пахотных агрегатов // *Техника в сельском хозяйстве*. 1991. № 3. С. 9–12.
9. Шаров В. В. Оборота пласта без поперечного и продольного смещения (кинематика) // *Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин: сборник научных трудов*. М.: МИИСП, 1986.
10. Лобачевский Я. П. Разработка технологических основ создания фронтальных плугов для гладкой вспашки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М, 1987. 245 с.
11. Теоретические аспекты оборота пласта в габаритах собственной борозды / Я. П. Лобачевский, В. В. Шаров, Н. В. Алдошин и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. № 4. С. 4–9.
12. Ценч Ю. С., Шаров В. В., Миронова А. В. Обоснование длины отвала плужного корпуса винтового типа // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. № 4. С. 123–129.
13. Миронова А. В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 1. С. 63–68.
14. Технология восстановления целинных и залежных земель / А. В. Миронова, И. В. Лискин, А. И. Панов // *Технический сервис машин*. 2020. № 2 (139). С. 111–121.

Поступила в редакцию 14.12.2024
После доработки 18.01.2025
Принята к публикации 11.02.2025