

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ПОСЛОЙНОЙ БЕЗОТВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE CURVILINEAR WORKING ELEMENT FOR LAYERWISE SOIL-FREE TILLAGE

Г.Г. ПАРХОМЕНКО, к.т.н.

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства
ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия, parkhomenko.galya@yandex.ru

G.G. PARHOMENKO, PhD in Engineering

Federal State Budgetary Scientific Institution
«Agrarian Science Center «Donskoy», Zernograd, Russia,
parkhomenko.galya@yandex.ru

Для эффективного функционирования в условиях недостаточного и неустойчивого увлажнения юга России почвообрабатывающие машины разрабатываются на основе блочно-модульного принципа построения с различными рабочими органами со сменными элементами. Возможность комбинации сменных элементов заложена в конструкции рабочего органа для послойной безотвальной обработки почвы. Данный рабочий орган оснащается криволинейным, плоскорезным рыхлителями или элементами из пластика. Качественные показатели технологического процесса послойной безотвальной обработки почвы рабочего органа с криволинейным рыхлителем по сравнению с другими достигают более высокого уровня: 97,4...98,5 % фракций размером до 50 мм; резкое снижение содержания эрозионно-опасных частиц в поверхностном слое до 15,12...18,13 %. Затраты энергии на функционирование рабочего органа с элементами из пластика на 6 % меньше, чем с криволинейным рыхлителем. Цель исследования: снижение энергозатрат за счет оптимизации параметров рабочего органа с криволинейным рыхлителем при сохранении качества технологического процесса послойной безотвальной обработки почвы. Проведены экспериментальные исследования по трехфакторному плану Бокса для определения параметров рабочего органа с криволинейным рыхлителем, обеспечивающим снижение энергозатрат на послойную безотвальную обработку почвы. Критерием оценки выбрано тяговое сопротивление рабочего органа, от которого напрямую зависят энергозатраты на выполнение технологического процесса послойной безотвальной обработки почвы. Наибольшее влияние на рост тягового сопротивления оказывает увеличение угла крошения долота. С ростом скорости наблюдается снижение тягового сопротивления с меньшей интенсивностью. Это объясняется менее существенным влиянием скорости перемещения рабочего органа на его тяговое сопротивление по сравнению со скоростью распространения волны напряжения. С увеличением глубины обработки почвы тяговое сопротивление возрастает. При фиксации скорости перемещения рабочего органа на уровне 2,5 м/с оптимальное значение глубины обработки почвы 28...29 см, угла крошения долота 31...31,5 град.

Ключевые слова: почва, рабочий орган, послойная безотвальная обработка, криволинейный рыхлитель, параметрическая оптимизация.

For effective functioning in conditions of insufficient and unstable moistening of the south of Russia, tillage machines are developed on the basis of the block-modular construction principle with various working elements with replaceable elements. The possibility of a combination of replaceable elements is incorporated in the design of the working element for layer-by-layer soil-free tillage. This working body is equipped with curved, planar rippers or plastic elements. Qualitative indices of the technological process of layer-by-layer soil-free tillage of the working body with a curvilinear ripper, in comparison with others, reach a higher level: 97,4...98,5 % of fractions up to 50 mm, a sharp decrease in the content of erosion-hazardous particles in the surface layer to 15,12...18,13 %. The energy consumption for the functioning of the working element with plastic elements is 6 % less than with the curved ripper. The purpose of the research is energy reduction of energy costs due to optimization of the parameters of the working body with a curved ripper while maintaining the quality of the technological process of layered soil-free tillage. Experimental studies on the three-factor Box plan for determining the parameters of the working body with a curvilinear ripper have been carried out, which ensures a reduction in energy costs for layer-by-layer soil-free tillage. The criterion for evaluation is the traction resistance of the working body, on which the energy costs directly depend on the performance of the technological process of layer-by-layer soil-free tillage. The greatest influence on the growth of traction resistance is due to an increase in the crumbling bit angle of the barpoint. With increasing speed, a reduction in traction resistance with a lower intensity is observed. This is explained by the less significant effect of the speed of movement of the working member on its traction resistance in comparison with the propagation velocity of the stress wave. With an increase in the depth of cultivation of the soil, the traction resistance increases. When fixing the speed of moving the working element at a level of 2,5 m/s, the optimal value of the depth of tillage is 28...29 cm, the angle of crumbling of the bit is 31...31,5 degrees.

Keywords: soil, working element, layer-by-layer without-till treatment, curvilinear ripper, parametric optimization.

Введение

Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия намечен ряд задач, к которым относится воспроизводство и повышение эффективности использования земельных ресурсов, экологизация производства, увеличение объема производства продукции растениеводства на основе роста урожайности основных видов с/х культур, обеспеченность сельхозтоваропроизводителей современными видами сельскохозяйственной техники, внедрение инновационных разработок технологий [1–5] в АПК в условиях недостаточного и неустойчивого увлажнения юга России.

Это позволит определить направления по формированию комплекса технических средств качественно нового поколения [6], позволяющих повысить производительность труда и энергоэффективность [7], надежность при эксплуатации машин [8], улучшить показатели технологического процесса [9], создать благоприятные условия для производства сельскохозяйственной продукции и обеспечить ее конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках.

Возможен переход от интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на так называемые высокие технологии, рассчитанные на достижение урожайности культуры, близкой к ее биологическому потенциалу.

Разрабатываемые почвообрабатывающие машины за счет блочно-модульного принципа построения и комплектования их различными рабочими органами на основе синергистической комбинации сменных элементов [10] способны выполнять технологические операции в различных почвенно-климатических условиях, в том числе в условиях недостаточного и неустойчивого увлажнения южных регионов России.

Возможность комбинации сменных элементов заложена в конструкции разработанного рабочего органа для послойной безотвальной обработки почвы [11]. Рабочий орган для послойной безотвальной обработки почвы оснащается криволинейным, плоскорезным рыхлителями или элементами из пластика.

В результате проведенных ранее исследований [11] установлено, что наименьшее тяговое сопротивление возникает при функционировании рабочего органа с элементами из пласти-

ка. При этом разница тягового сопротивления (рис. 1, *а*) и рабочего органа с криволинейным рыхлителем (рис. 1, *б*) не превышает 6 %.



а



б

Рис. 1. Исследуемые рабочие органы:
а – с элементами из пластика;
б – с эллиптическим рыхлителем

Однако качественные показатели технологического процесса послойной безотвальной обработки почвы рабочего органа с криволинейным рыхлителем достигают более высокого уровня: 97,4...98,5 % фракций размером до 50 мм; резкое снижение содержания эрозионно-опасных частиц в поверхностном слое до 15,12...18,13 %. Рабочий орган с элементами из пластика обеспечивает получение 82,0...84,8 % фракций размером до 50 мм и снижение на 2,95...3,41 % содержания эрозионно-опасных частиц в поверхностном слое почвы [12].

Цель исследования

Целью исследования является снижение энергозатрат за счет оптимизации параметров рабочего органа с криволинейным рыхлителем

при сохранении качества технологического процесса послышной безотвальной обработки почвы.

Материалы и методы исследования

Проведены экспериментальные исследования по параметрической оптимизации [13] рабочего органа с криволинейным рыхлителем, обеспечивающим снижение энергозатрат на послышную безотвальную обработку почвы.

Оптимизация параметров и режимов функционирования рабочего органа для послышной безотвальной обработки почвы предусматривала проведение полевых исследований. Экспериментальные значения измеряемых величин подвергали статистической обработке в соответствии с СТО АИСТ 1.17-2010 «Испытания сельскохозяйственной техники и агротехнологий. Методы сравнительной оценки с использованием многофакторного корреляционно-регрессивного анализа»; введен 15.09.2011. (взамен СТП 13.046-80).

Варьируемыми факторами в эксперименте по трехфакторному плану Бокса были выбраны: скорость перемещения рабочего органа; глубина обработки почвы; угол крошения (входа в почву в поперечно-вертикальной плоскости) долота.

Пределы изменения этих факторов представлены в табл. 1.

Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически и учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования.

Максимальными значениями для первого фактора являются значения скорости перемещения рабочего органа от 2 до 3 м/с, для второго фактора – максимальной глубины обработки почвы от 25 до 35 см, третьего – максимального угла крошения долота от 30 до 35 град.

Критерием оценки (отклика) является тяговое усилие энергосредства [14], затрачиваемое

Таблица 1

Пределы изменения факторов

Варьируемые в опыте факторы	Кодированные обозначения факторов	Пределы изменения		
		-1	0	+1
Скорость перемещения рабочего органа, м/с	X_1	2	2,5	3
Глубина обработки почвы, см	X_2	25	30	35
Угол крошения долота, град.	X_3	30	32,5	35

Таблица 2

План эксперимента и выходные параметры опытов

№ опыта	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходные параметры (тяговое сопротивление), кН
	X_1	X_2	X_3	Скорость перемещения рабочего органа, м/с	Глубина обработки почвы, см	Угол крошения долота, град.	
1	+1	+1	0	3	35	32,5	6,5
2	+1	-1	0	3	25	32,5	7,2
3	-1	+1	0	2	35	32,5	9,1
4	-1	-1	0	2	25	32,5	7,4
5	0	0	0	2,5	30	32,5	5,2
6	+1	0	+1	3	30	35	7,2
7	+1	0	-1	3	30	30	6,3
8	-1	0	+1	2	30	35	9,1
9	-1	0	-1	2	30	30	6,9
10	0	0	0	2,5	30	32,5	8,2
11	0	+1	+1	2,5	35	35	10,1
12	0	+1	-1	2,5	35	30	7,3
13	0	-1	+1	2,5	25	35	8,1
14	0	-1	-1	2,5	25	30	7,2
15	0	0	0	2,5	30	32,5	6,3

на преодоление силы сопротивления почвы, действующей на рабочий орган (тяговое сопротивление рабочего органа). От величины тягового сопротивления напрямую зависят энергозатраты на выполнение технологического процесса послойной безотвальной обработки почвы. Поэтому необходимо подобрать рациональные значения факторов, обеспечивающих минимальное тяговое сопротивление.

План эксперимента и выходные параметры опытов представлены в табл. 2.

Результаты и их обсуждение

В результате исследований влияния скорости перемещения рабочего органа, глубины обработки почвы, угла крошения долота на тяговое сопротивление получено регрессионное уравнение в кодированных обозначениях:

$$Y = 2,252 - 0,663X_1 + 0,378X_2 + 0,85X_3 - 0,6X_1X_2 + 0,325X_1X_3 + 0,475X_2X_3 - 0,092X_1^2 + 0,089X_2^2 + 0,71X_3^2.$$

Проверка адекватности математической модели показала, что по критерию Фишера ($F = 8,16 < F_{\text{таб}} = 9,55$) уравнение математической модели является адекватным. Модель применима для решения научно-исследовательских задач.

Анализ влияния факторов на критерий оптимизации по уравнению регрессии выявил следующее.

Угол крошения долота рабочего органа (X_3) оказывает наиболее сильное влияние. Этот фактор имеет наибольший коэффициент при X_3 в уравнении регрессии, а знак «плюс» у коэффициента, характеризующего влияние данного фактора, указывает на увеличение критерия оптимизации.

Меньшее влияние на критерий оптимизации оказывает скорость перемещения рабочего органа (X_1). Знак «минус» у коэффициента при X_1 , характеризующего влияние данного фактора, указывает на то, что с ростом его значения происходит уменьшение критерия оптимизации.

Характер влияния глубины обработки почвы рабочим органом (X_2) показывает, что с увеличением его значения происходит рост тягового сопротивления.

Влияние скорости перемещения рабочего органа и глубины обработки почвы на изменение тягового сопротивления представлено на рис. 2.

При фиксации значения угла входа в почву долота рабочего органа на уровне 32,5 градуса критерий оптимизации последовательно уменьшается с увеличением скорости в пределах ее варьирования в опыте. Наименьшее значение критерия оптимизации достигается при глубине обработки почвы от 30 до 31,5 см.

Влияние угла входа в почву долота рабочего органа и глубины обработки почвы на изменение тягового сопротивления представлено на рис. 3.

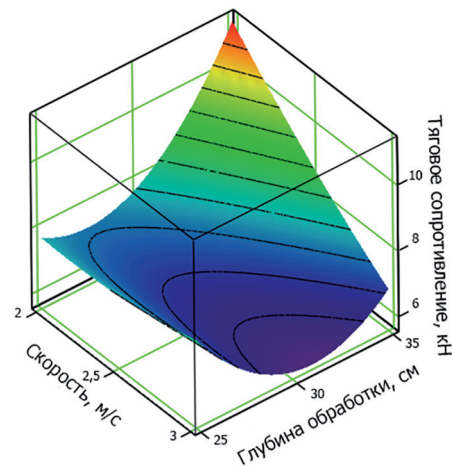


Рис. 2. Поверхность отклика тягового сопротивления при изменении глубины обработки почвы и скорости рабочего органа с криволинейным рыхлителем

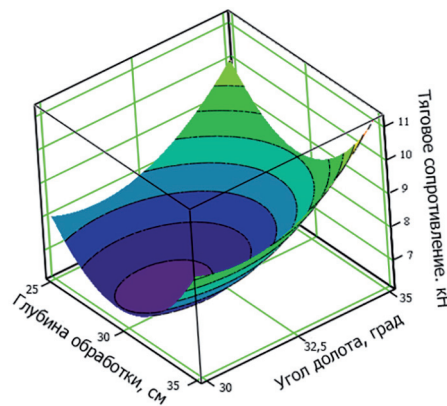


Рис. 3. Поверхность отклика тягового сопротивления при изменении глубины обработки и угла крошения долота рабочего органа с криволинейным рыхлителем

При фиксации значения скорости перемещения рабочего органа на уровне 2,5 м/с получено оптимальное значение глубины обработки почвы (от 28 до 29 см) и угла крошения долота (от 31 до 31,5 град.).

Влияние изменения угла входа в почву долота рабочего органа и скорости перемещения рабочего органа на тяговое сопротивление представлено на рис. 4.

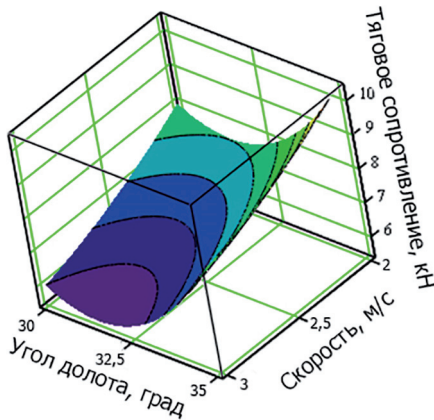


Рис. 4. Поверхность отклика тягового сопротивления при изменении скорости и угла входа в почву долота рабочего органа с криволинейным рыхлителем

При фиксации значения глубины обработки почвы рабочим органом на уровне 30 см критерий оптимизации последовательно уменьшается с увеличением скорости в пределах ее варьирования в опыте. Наименьшее значение критерий оптимизации достигает при угле крошения долота рабочего органа от 31 до 31,5 град. Оптимальный угол крошения долота рабочего органа составляет от 31 до 31,5 град и при глубине обработки почвы от 28 до 29 см зафиксировано оптимальное тяговое сопротивление.

В результате проведенного анализа экспериментальных данных было выявлено снижение тягового сопротивления с увеличением скорости, что подтверждают предыдущие исследования [11] (рис. 5). Цифрами на рисунке указаны значения тягового сопротивления.

Снижение тягового сопротивления с увеличением скорости можно объяснить характером взаимодействия рабочего органа с почвой в соответствии с конструкцией криволинейных стойки и рыхлителя, которые при крошении пласта за счет формы способствуют возникновению разнонаправленных деформаций, в том числе наименее энергоемких (растяжения). При оптимальном угле крошения наблюдается достаточный подпор пласта, отсутствует процесс сгуживания почвы перед рабочим органом [15], мощность энергосредства не расходуется на перемещение призмы волочения, и тяговое сопротивление снижается.

Снижение тягового сопротивления с ростом скорости при заблокированном резании, которое возникает при взаимодействии долота с почвой в подпахотном слое при достижении критической глубины резания, подтверждено исследованиями В.И. Пындака, А.Е. Новикова. Сжатие в условиях заблокированного резания носит циклический характер, сопровождающийся смещением пласта вверх по поверхности наклонного долота. При этом от нагруженных и переуплотненных фрагментов почвы распространяются волны напряжений и деформаций – создается вибрационное воздействие на почву. Скорость распространения волны напряжения напрямую зависит от модуля упругости, который при высокой уплотненности и твердости подпахотных слоев почвы резко возрастает и соизмеряется со скоростью звука. Это объясняет несущественное влияние скорости перемещения рабочего органа на его тяговое сопротивление по сравнению со скоростью распространения волны напряжения [16]. При вибрационном воздействии угол внутреннего трения периодически стремится к нулю и при определенном угле крошения долота рабочего органа разрушение пласта происходит под углом скола, совпадающим с направлением наименьшего сопротивления почвы.

Исследуемый рабочий орган разработан на основе чизельного с рыхлителем для мелкой обработки почвы, расположенным в верхней части стойки. Из анализа формулы Горячкина следует, что при уменьшении обрабатываемой площади в поперечном сечении при использовании чизеля, функционирующего с недорезом

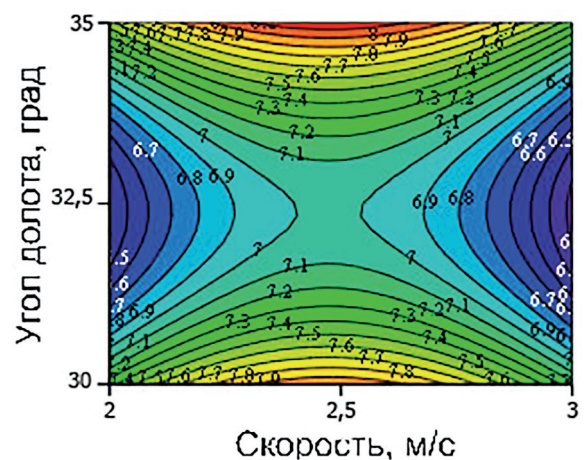


Рис. 5. Сечение поверхности отклика при изменении угла крошения долота и скорости перемещения рабочего органа с элементами из пластика [11]

пласта по ширине захвата машины, а также при изменении коэффициентов, характеризующих сопротивление деформациям растяжения, увеличение скорости рабочего органа с криволинейными стойкой и рыхлителем не приводит к повышению тягового сопротивления, а при оптимальных параметрах даже способствует его снижению.

Снижение тягового сопротивления при увеличении скорости рабочего органа с элементами из пластика объясняется уменьшением первой составляющей формулы Горячкина за счет положительных свойств используемого высокомолекулярного полиэтилена низкой плотности, выраженных в значительном уменьшении массы конструкции и коэффициента внешнего трения.

Следует отметить, что условия проведения экспериментальных исследований [12] характеризовались экстремальной твердостью на глубине более 25 см (7,49 МПа при допустимой 4 МПа). Поэтому необходимо продолжить исследования при различных условиях функционирования для подтверждения выдвинутой гипотезы о менее существенном влиянии скорости перемещения рабочего органа на его тяговое сопротивление (по сравнению со скоростью распространения волны напряжения).

Заключение

В результате экспериментальных исследований по трехфакторному плану Бокса по критерию минимума тягового сопротивления определены параметры рабочего органа с криволинейным рыхлителем, обеспечивающим снижение энергозатрат на послынную безотвальную обработку почвы: при фиксации значения скорости перемещения рабочего органа на уровне 2,5 м/с получено оптимальное значение глубины обработки почвы (от 28 до 29 см) и угла крошения долота (от 31 до 31,5 град.).

Литература

1. Пахомов В.И., Рыков В.Б., Камбулов С.И. Результаты сравнительной оценки механизированных технологий возделывания зерновых культур // Зерновое хозяйство России. 2016. № 1. С. 58–62.
2. Алабушев А.В., Сухарев А.А., Попов А.С., Камбулов С.И., Н.Г. Янковский, Овсянникова Г.В. Минимизация обработки почвы под пропашные культуры и их продуктивность // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 6 (55). С. 30–33.

3. Пахомов В.И., Рыков В.Б., Камбулов С.И., Шевченко Н.В., Ревякин Е.Л. Опыт возделывания озимой пшеницы в условиях недостаточного увлажнения. М.: Росинформагротех, 2015. 160 с.
4. Алабушев А.В., Сухарев А.А., Попов А.С., Камбулов С.И., Логвинов А.Я. Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур под воздействием однотипных способов основной обработки почвы // Земледелие. 2015. № 8. С. 25–28.
5. Янковский Н.Г., Алабушев А.В., Жидков Г.А., Камбулов С.И., Сухарев А.А. Совершенствование основных элементов технологии возделывания озимой пшеницы. Ростов-на-Дону, 2011. 174 с.
6. Tverdohlebov S.A., Parkhomenko G.G. Research of the new generation chisel plow // Mechanization in agriculture. 2017. № 1. С. 33–36.
7. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Повышение энергоэффективности мобильных почвообрабатывающих агрегатов // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3 (18). С. 40–47.
8. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Повышение эксплуатационной надежности САР почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 87–91.
9. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Оптимизация показателей технологических процессов сельскохозяйственного производства в растениеводстве // Хранение и переработка зерна. 2017. № 1 (209). С. 55–60.
10. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Моделирование следящих систем почвообрабатывающих агрегатов // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 1. С. 22–31.
11. Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Громаков А.В., Пахомов В.И. Использование пластика в конструкциях почвообрабатывающих рабочих органов для послынной безотвальной обработки почвы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 8. С. 8–15.
12. Пархоменко Г.Г., Семенихина Ю.А., Громаков А.В., Божко И.В. Анализ агротехнических показателей рабочих органов для послынной безотвальной обработки почвы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 5. С. 32–38.
13. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Параметрическая оптимизация комбинированной следяще-силовой системы автоматического регулирования пахотного агрегата // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: сборник научных до-

кладов Междунар. научно-практ. конф. Тамбов. 2015. С. 18–22.

14. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 4. С. 15–19.
 15. Пархоменко Г.Г., Щириков В.Н. Теория глубокого рыхлителя: Расчет взаимодействия рабочих органов с почвой в засушливых условиях. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 78 с.
 16. Пындак В.И., Новиков А.Е. Энергоэффективность глубокого чизелевания почвы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2013. № 4 (32). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-glubokogo-chizelevaniya-pochvy> (дата обращения 26.01.2018).
- ### References
1. Pahomov V.I., Rykov V.B., Kambulov S.I. The results of the comparative evaluation of mechanized technologies for the cultivation of cereals. *Zernovoe hozyajstvo Rossii*. 2016. No 1, pp. 58–62 (in Russ.).
 2. Alabushev A.V., Suharev A.A., Popov A.S., Kambulov S.I., Yankovskij N.G., Ovsyannikova G.V. Minimization of soil cultivation for tilled crops and its productivity. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2016. No 6 (55), pp. 30–33 (in Russ.).
 3. Pahomov V.I., Rykov V.B., Kambulov S.I., Shevchenko N.V., Revyakin E.L. Opyt vozdevaniya ozimoy pshenicy v usloviyah nedostatochnogo uvlazhneniya [The experience of cultivation of winter wheat in conditions of insufficient moisture]. Moscow: Rosinformagrotekh Publ., 2015. 160 p.
 4. Alabushev A.V., Suharev A.A., Popov A.S., Kambulov S.I., Logvinov A.YA. Change in the productivity of agricultural crops under the influence of the same type of basic tillage. *Zemledelie*. 2015. No 8, pp. 25–28 (in Russ.).
 5. Yankovskij N.G., Alabushev A.V., Zhidkov G.A., Kambulov S.I., Suharev A.A. Sovershenstvovanie osnovnykh ehlementov tekhnologii vozdevaniya ozimoy pshenicy [Improvement of the main elements of the technology of winter wheat cultivation]. Rostov-na-Donu, 2011. 174 p.
 6. Tverdohlebov S.A., Parkhomenko G.G. Research of the new generation chisel plow. *Mechanization in agriculture*. 2017. No 1, pp. 33–36.
 7. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Increase in energy efficiency of mobile tillage units. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016. No 3 (18), pp. 40–47 (in Russ.).
 8. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Increasing the operational safety of systems of automatic regulation tillage machines. *Trudy GOSNITI*. 2016. Vol. 122, pp. 87–91 (in Russ.).
 9. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Optimization of indicators of technological processes of agricultural production in plant growing. *Hranenie i pererabotka zerna*. 2017. No 1 (209), pp. 55–60 (in Russ.).
 10. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Modeling of tracking systems of tillage units. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. No 1, pp. 22–31 (in Russ.).
 11. Parhomenko G.G., Bozhko I.V., Gromakov A.V., Pahomov V.I. The use of plastics in the construction of soil-working tools for layer-by-layer wasteless tillage. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. No 8, pp. 8–15 (in Russ.).
 12. Parhomenko G.G., Semehina YU.A., Gromakov A.V., Bozhko I.V. Analysis of agrotechnical indicators of working bodies for layer-by-layer surface tillage. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. No 5, pp. 32–38 (in Russ.).
 13. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Parametric optimization of the combined tracking-power automatic regulation system of arable unit. *Povyshenie ehffektivnosti ispol'zovaniya resursov pri proizvodstve sel'skohozyajstvennoj produkcii – novye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya dlya rasteniyevodstva i zhivotnovodstva: sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. [Increasing the efficiency of resource use in the production of agricultural products – new technologies and techniques of a new generation for crop production and livestock: a collection of scientific reports of the international scientific and practical conference]*. Tambov. 2015, pp. 18–22 (in Russ.).
 14. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Measuring the traction force on the tractor hook in a unit with a mounted agricultural machine. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2016. No 4, pp. 15–19 (in Russ.).
 15. Parhomenko G.G., Shchirikov V.N. Teoriya glubokoryhlytelya: Raschyot vzaimodejstviya rabochih organov s pochvoj v zasushliviye usloviyah [The theory of the deep loosener: Calculation of the interaction of working bodies with soil in arid conditions]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 78 p.
 16. Pyndak V.I., Novikov A.E. Energy efficiency of deep chisel soil. *Proceedings of Nizhnevolskhs Agro-University Complex*. 2013. No 4 (32) (in Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-glubokogo-chizelevaniya-pochvy> (accessed 26.01.2018).