

УДК 631.316.22

UDC 631.316.22

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.01-Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМПЛЕКСНОГО ПАХОТНОГО АГРЕГАТА****SIMULATION OF THE WORKING PROCESS OF A COMPLEX ARABLE UNIT**

Маслов Геннадий Георгиевич  
д-р техн.наук, профессор  
SPIN – код автора: 7115-7421  
[maslov-38@mail.ru](mailto:maslov-38@mail.ru)

Maslov Gennady Georgievich  
Dr.Sci.Tech., Professor  
RSCI SPIN - code: 7115-7421  
[maslov-38@mail.ru](mailto:maslov-38@mail.ru)

Цыбулевский Валерий Викторович  
канд. техн. наук, доцент

Tsybulevsky Valery Viktorovich  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor

Малашихин Николай Васильевич  
аспирант  
[malashikhin95@bk.ru](mailto:malashikhin95@bk.ru)

Malashikhin Nikolai Vasilyevich  
graduate student  
[malashikhin95@bk.ru](mailto:malashikhin95@bk.ru)

*Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044, Краснодар, Калинина, 13*

*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia 350044, St.Kalinina,13*

С использованием моделирования рабочего процесса комплексного пахотного агрегата обоснованы его оптимальные параметры и режимы работы. Особенность конструктивно-технологической схемы предлагаемого агрегата состоит в использовании в его составе оборотного скоростного плуга ПСК с усиленной конструкцией рамы, с низкой энергоемкостью процесса вспашки за счет упразднения полевых досок корпусов, с приспособлениями для крошения пласта и выравнивания поверхности поля и одновременного внесения минеральных удобрений. Внесение и заделка удобрений в почву без разрыва по времени повышает качество работы и снижение затрат. Разработана математическая модель и алгоритм оптимизации параметров и режимов работы комплексного агрегата с использованием в качестве критерия оптимизации минимального значения затрат совокупной энергии на выполнение рабочего процесса при ограничении рабочей скорости до 15 км/ч, ширина захвата плуга до 6 м, коэффициент удельного сопротивления плуга до 80 кН/м<sup>2</sup>, глубина вспашки до 0,3 м, емкости бункера для удобрений до 4 м<sup>3</sup>, длины гона до 2 км. В качестве энергосредства принят трактор К-701. При минимальном значении критерия оптимизации 966 МДж/га обоснованы: ширина захвата плуга 4,5 м, рабочая скорость 8,1 км/ч, расход топлива 11 кг/га, производительность 3,12 га/ч, тяговое усилие трактора 36 кН, тяговая мощность 117 кВт, емкость бункера для удобрений 4 м<sup>3</sup>. Получены зависимости критерия оптимизации от параметров агрегата и режимов его работы

This article justifies using the simulation of the working process of a complex arable unit, its optimal parameters and operating modes. The main feature of constructive and technological scheme of the proposed unit is in its composition of PSK high-speed plough with enhanced frame structure, with a low energy process of plowing through the field, lifting the sides of buildings, with tools for cutting formation and alignment field surface and simultaneous introduction of mineral fertilizers. Applying and embedding fertilizers in the soil without a temporary break increases the quality of work and reduces costs. The mathematical model and the algorithm optimization of the parameters and modes of operation of the unit complex, is used as optimization criterion is the minimum value of the total energy consumption of the workflow execution at maximum working speed up to 15 km/h, the width of the plow up to 6 m, the coefficient of the resistivity of the plow up to 80 kN/m<sup>2</sup>, the depth of plowing to 0.3 m, the capacity of the hopper fertilizer to 4 m<sup>3</sup>, length gauge to 2 km. The K-701 tractor was used as a power tool. At the minimum value of the optimization criterion of 966 MJ / ha, the following parameters are justified: plow width of 4,5 m, working speed of 8.1 km/h, fuel consumption of 11 kg / ha, productivity of 3,12 ha/h, tractor thrust of 36 kN, traction power of 117 kW, fertilizer hopper capacity of 4 m<sup>3</sup>. The work also obtains dependences of the optimization criterion on the parameters of the unit and its operating modes

Ключевые слова: КОМПЛЕКСНЫЕ ПАХОТНЫЙ АГРЕГАТ, ОПТИМИЗАЦИЯ, КРИТЕРИЙ, ПАРАМЕТРЫ, РЕЖИМЫ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, ЗАТРАТЫ

Keywords: INTEGRATED ARABLE UNIT, OPTIMIZATION, CRITERIA, PARAMETERS, MODES, PERFORMANCE, COSTS

DOI: <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-167-008>

<http://ej.kubagro.ru/2021/03/pdf/08.pdf>

Современные технологии возделывания полевых сельскохозяйственных культур по-прежнему отличаются высокой энергоемкостью и затратами [1 – 4]. Это связано с низкими темпами совершенствования конструктивно-технологических схем машин и агрегатов, способных в корне заменить устаревшие технологии [5]. Новые машины [6, 7] и их эффективная эксплуатация [8] выгодно совершенствуют процесс работы и повышают его качество, что отражается на повышении урожайности и снижении затрат. Одним из эффективных направлений совершенствования сельскохозяйственной техники является моделирование и оптимизация производственных процессов [9]. Они позволяют с меньшей трудоемкостью найти оптимальное решение в улучшении конструкций устаревших машин. Цель нашей статьи – оптимизировать рабочий процесс комплексного пахотного агрегата для повышения его производительности и снижения энергоемкости.

Современная вспашка – самый трудоемкий процесс в системе возделывания полевых культур, однако уже серийно выпускаются новые конструкции плугов ПСК («СУР» г. Энгельс Саратовской области), которые обеспечили повышение производительности на вспашке на 70%, снижение расхода топлива на 30% [10]. Этот оборотный плуг с пониженной энергоемкостью принят нами для предлагаемого комплексного агрегата (рис. 1).

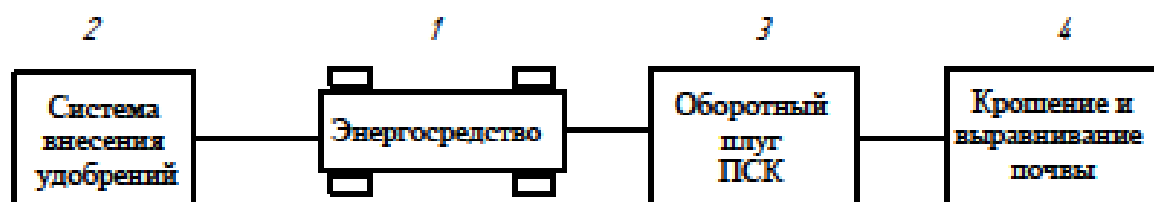


Рисунок 1 – Подсистемы предлагаемого комплексного пахотного агрегата: 1 -энергосредство; 2 - приспособление для внесения удобрений; 3 - оборотный плуг без полевых досок; 4 – приспособление для крошения и выравнивания пласта.

Составные части предлагаемой системы : 1 – энергосредство – трактор К-701; 2 – приспособление для внесения минеральных удобрений – 3 оборотный плуг ПСК; 4- приспособление ПВР-3,5 или КубГАУ.

Взаимодействие представленных подсистем увязано между собой блок – схемой алгоритма оптимизации параметров комплексного агрегата (рис.2.)

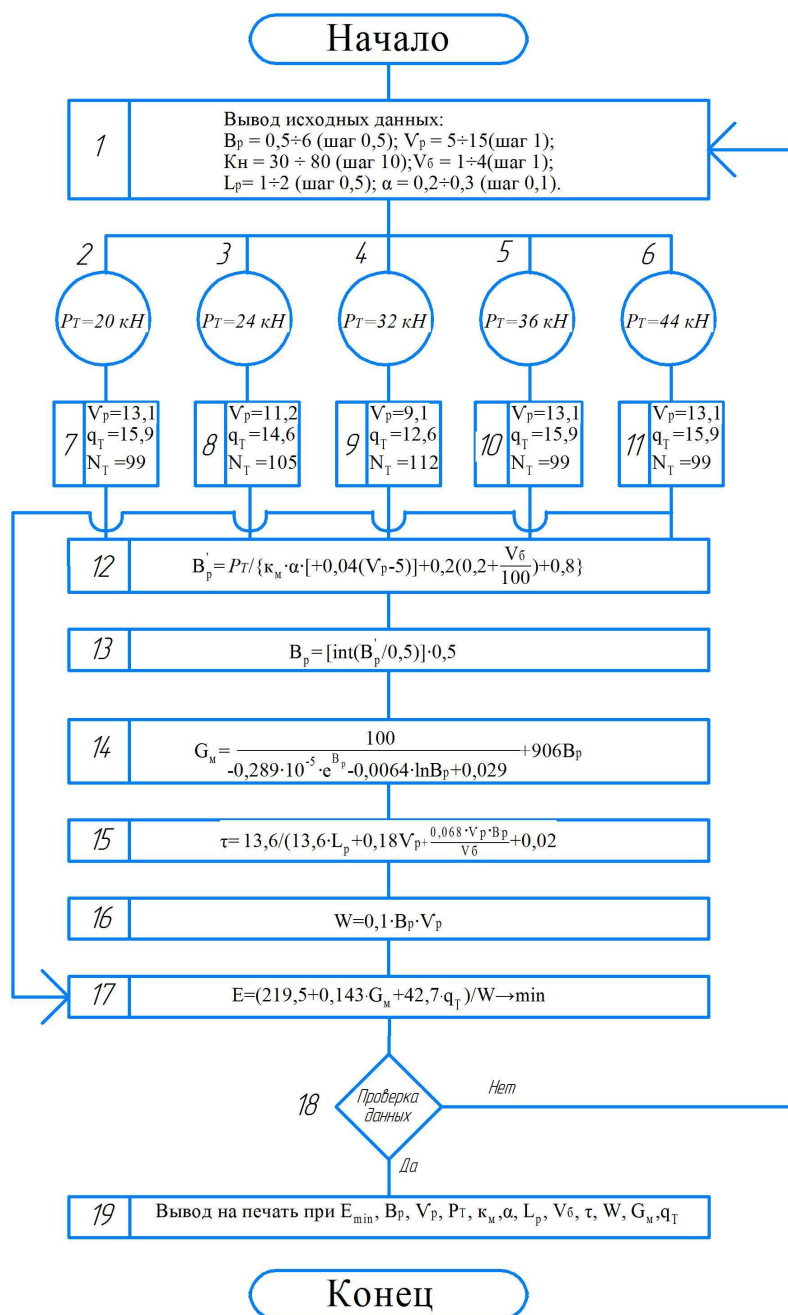


Рисунок 2 – Блок - схема алгоритма оптимизации параметров многофункционального пахотного агрегата.

Предлагаемая схема включает 19 операторов, из которых первый обеспечивает вывод исходных данных с их ограничениями и передает управление 2 - 6 блокам для расчета параметров по каждому из вариантов тягового усилия трактора К-701 (20 кН, 24; 32; 36; 44 кН). Для каждого тягового усилия  $P_T$  вводятся дополнительные данные из тяговой характеристики трактора (блоки 7-11) : рабочая скорость  $V_p$ , часовой расход топлива  $q_T$  и тяговая мощность  $N_T$  трактора.

В двенадцатом арифметическом операторе рассчитывается для всех тяговых усилий  $P_T$  (блоки 7-11) расчетная ширина захвата агрегата  $B_p$ , которая округляется до целого числа, кратного 0,5 м – ширине захвата серийного корпуса плуга ПСК (арифметический оператор 13).

По выведенной нами формуле в операторе 14 рассчитывается масса машины  $G_m$  с учетом массы плуга и его приспособлений и передается управление оператору 15, который рассчитывает для каждой ширины захвата  $B_p$ , скорости  $V_p$  и длины гона  $L_p$  коэффициент  $\tau$  – использования рабочего времени смены.

Далее рассчитывается производительность агрегата за 1 час сменного времени (оператор 16).

В семнадцатом арифметическом операторе выполняется расчет критерия оптимизации – затраты совокупной энергии на выполнение вспашки на заданную глубину  $\alpha$  и коэффициент удельного сопротивления почвы  $K_n/m^2$ . В этот блок добавляются также данные рабочей скорости для каждого тягового усилия  $P_T$  и удельного расхода топлива  $q_T$ .

По минимальному значению критерия оптимизации  $E$  оператор 19 выводит на печать все параметры и режимы работы агрегата. Предварительно логический оператор 18 проверяет со всеми ли исходными данными выполнены расчеты.

После этого 19-й оператор выводит на печать оптимальные параметры пахотного комплексного агрегата, технологические и конструктивные

параметры при минимальных затратах совокупной энергии  $E_{\min}$  и дает команду остановки расчета.

На основании решения задачи получены зависимости критерия оптимизации  $E$  от параметров агрегата и режимов его работы (рис. 3-5).

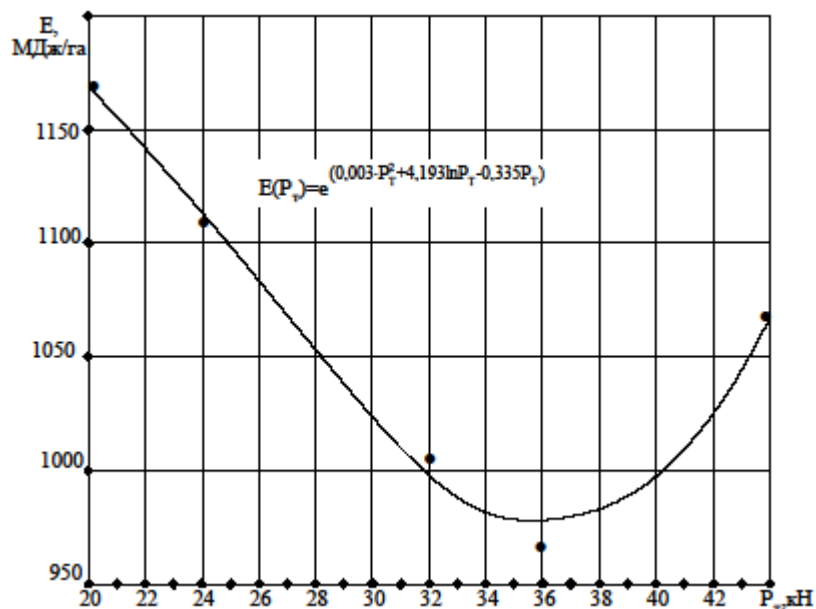


Рисунок 3 – Зависимость совокупных затрат энергии  $E$  от величины тягового усилия трактора  $P_T$  при работе пахотного агрегата

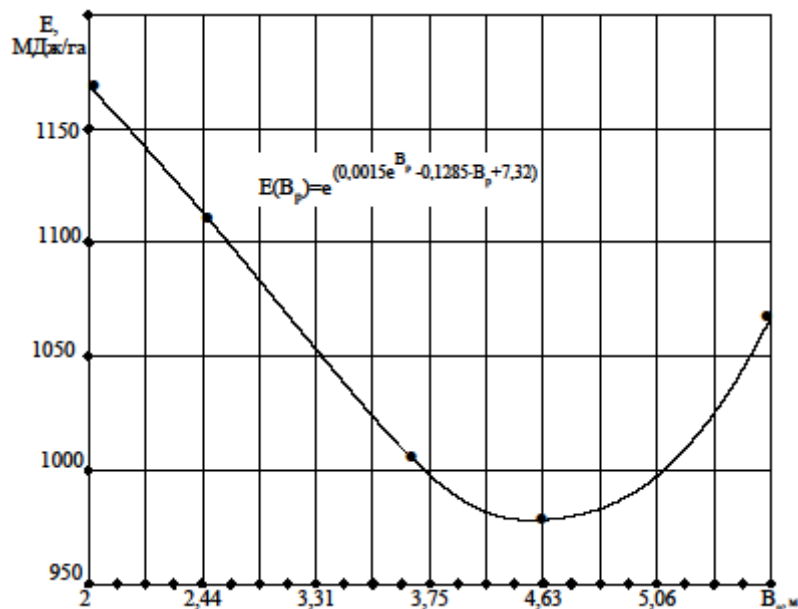


Рисунок 4 – Зависимость совокупных затрат энергии  $E$  от ширины захвата  $B_p$  агрегата

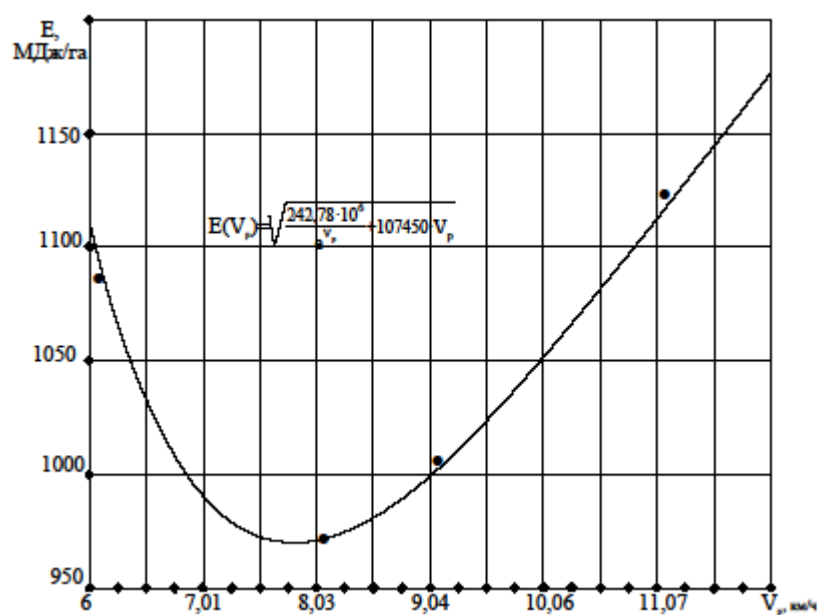


Рисунок 5 – Зависимость совокупных затрат энергии  $E$  от рабочей скорости  $V_p$  агрегата.

Достоверность полученных зависимостей подтверждается критерием Кохрена: для первой зависимости (рис.3) расчетное значение критерия  $G_p$  составило 0,445, табличное  $G_T=0,768$  ( $G_p \leq G_T$ ); для второй зависимости, соответственно  $G_p=0,561$ ,  $G_T=0,768$  и для третьей  $G_p=0,396$ ,  $G_T=0,768$

На всех графиках наглядно просматриваются экстремальные точки функции. При минимальном значении критерия оптимизации 966 МДж/га оптимальным значением рабочей скорости агрегата на вспашке будет 8,1 км/ч при ширине захвата плуга 4,5 м и тяговом усилии трактора 36 кН.

Оптимальные конструктивные параметры предлагаемого пахотного агрегата, кроме ширины захвата плуга 4,5м, включают также такую же ширину захвата прикатывающего катка для выравнивания поверхности вспашки и емкость бункера для удобрений  $4\text{м}^3$ . Технологические параметры при выполнении технологического процесса глубина вспашки  $\alpha = 0,2$  м, коэффициент удельного сопротивления почвы  $K_M = 30 \text{ кН/м}^2$ , длина гона на рабочем участке  $L_p=1000$  м. Принимается ровный рельеф поля, обрабатываемый фон – стерня озимой пшеницы, последующая культура – также озимая пшеница. Согласно научно обоснованной системе земледелия [5]

после колосовых предшественников под озимые необходима только вспашка, поверхностная обработка почвы в таком сочетании снизит урожай. А вспашка должна выполняться оборотными плугами с описанными выше приспособлениями по нашим изобретениям [11, 12].

Полученная на рисунке 3 зависимость совокупных затрат энергии от тягового усилия на крюке трактора К-701 имеет оптимум при  $P_T = 34$  кН (1):

$$E(P_T) = e^{0,003 \cdot P_T^2 + 4,193 \cdot \ln \cdot P_T - 0,335 P_T} \quad (1)$$

где  $E$  – совокупные затраты энергии на выполнение рабочего процесса предлагаемым пахотным агрегатом МДж/га;  
 $P_T$  – номинальное тяговое усилие трактора К-701 на рабочей скорости 8,1 км/ч, кН.

Минимальное значение критерия оптимизации 966 МДж/га повышается как при меньших значениях тягового усилия, так и при более высоких по сравнению с  $P_T = 44$  кН – до 1077, или в 1,12 раз.

Аналогично растут затраты энергии по сравнению с оптимальным значением от изменения ширины захвата  $B_p$  агрегата и скорости движения  $V_p$ . Так, при оптимальной ширине захвата  $B_p = 4,5$  м затраты энергии составляет 966 МДж/га, при ее увеличении до 5,5 м они возрастают на 10,3 процента, а при  $P_T = 20$  кН – уже на 17,8 процентов. Зависимость изменения совокупных затрат энергии от ширины захвата агрегата (рис.4) позволяет установить ее оптимальное значение (2):

$$E(B_p) = e^{(0,0015 \cdot e^{B_p} - 0,1285 \cdot B_p + 7,32)} \quad (2)$$

Полученное на основе моделирования процесса зависимость совокупных затрат энергии от рабочей скорости движения (рис.5) имеет вид (3):

$$E(V_p) = \sqrt{\frac{242,78 \cdot 10^6}{e^{V_p}} + 107450 \cdot V_p} \quad (3)$$

Значение критерия оптимизации по сравнению с оптимумом (966 МДж/га) варьируется от 10,3 процентов до 17,8.

Все результаты моделирования комплексного пахотного агрегата с трактором К-701 приведены в таблице.

Таблица – Результаты моделирования комплексного пахотного агрегата с трактором

Наименование параметров		Значение параметров				
1	Номинальное тяговое усилие трактора на разных передачах трактора $P_t$ , кН	20	24	32	36	44
2	Оптимальная ширина захвата агрегата $V_p$ , м	2,0	2,5	3,5	4,5	5,5
3	Оптимальная емкость бункера для удобрений $V_b$ , м <sup>3</sup>	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
4	Оптимальная масса комплексного агрегата $G_m$ , кг	5887	6594	7959	9305	10736
5	Удельный расход топлива $q_t$ , кг/га	15,9	14,6	12,6	11,0	11,5
6	Оптимальная рабочая скорость $V_p$ , км/ч	13,1	11,2	9,1	8,1	6,2
7	Коэффициент использования времени смены $\tau$	0,82	0,85	0,85	0,86	0,88
8	Оптимальная производительная агрегата $W$ , га/ч	2,15	2,34	2,71	3,12	2,99
9	Номинальная тяговая мощность трактора $N_t$ , кВт	99	105	112	117	120
10	Рабочая длина гона $L_p$ , км	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
11	Глубина вспашки $\alpha$ , м	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
12	Коэффициент удельного сопротивления почвы $K_m$ , кН/м <sup>2</sup>	30-35	30-35	30-35	30-35	30-35
13	Совокупные затраты энергии $E$ , МДж/га	1177	1120	1040	966	1077

Представленные в таблице результаты исследований позволяют сделать вывод о высокой значимости метода моделирования, разработанного авторами комплексного пахотного агрегата, который принципиально меняет технологический процесс вспашки, повышая производительность труда в 1,05 – 1,5 раза и снижая затраты совокупной энергии в МДж/га в



1,08 – 1,22 раза при работе одной и той же конструкции плуга, но с разной шириной захвата применительно к тяговым возможностям трактора К-701. Минимальное значение затрат совокупной энергии 966 МДж/га обеспечивается при тяговом усилии трактора 36 кН и ширине захвата агрегата 4,5 м. Увеличение ширины захвата до 5,5 м с данным трактором ведет к снижению рабочей скорости и, соответственно, производительности, что повышает удельные затраты энергии на процесс вспашки. Предложенный метод моделирования агрегата позволил принять правильное решение по составу и режиму работы комплексного пахотного агрегата.

### Список литературы

1. Агротехнические требования к основным технологическим операциям при адаптивных технологиях возделывания озимых колосовых и кукурузы и новые технические средства для их выполнения в Краснодарском крае / Рыбалкин П.Н., и др. // Рекомендации: Департамент сельского хозяйства и продовольствия Краснодарского края, Краснодарский НИИСХ им П.П. Лукьяненко – Краснодар 2001.
2. Maslov G.G., Tkachenko V.T., Yudina E.M., Kadyrov M.R., Kalitko S.A. The improvement of the technology of winter wheat grain production for the purpose of energy saving // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Т.12. № 3. С.2071-2080.
3. Maslov G.G., Trubilin E.I. Rational process machines system for producing sunflower seeds and its efficiency // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 29. № 12. С.1615-1620.
4. Maslov G.G., Trubilin E.I., Truflyak E.V. Parameters optimization for multifunctional aggregates in plant growing mechanization // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. - Т.7. № 3. С.1919-1926.
5. Система земледелия Краснодарского края на агроландшафтной основе. – Краснодар, 2015. – 315 с.
6. Патент на изобретение RU 2246195 С2, 20.02.2005. Протравливатель семян. Авторы: Борисова С.М., Маслов Г.Г., Мечкало А.Л., Трубилин Е.И / Заявка № 2003109126/12 от 31.03.2003.
7. Маслов Г., Палапин А., Ринас Н. Многофункциональный уборочный агрегат // Международный сельскохозяйственный журнал. - 2014. № 1-2. С. 16-19.
8. Маслов Г.Г., Карабаницкий А.П., Кочкин Е.А. Техническая эксплуатация МТП. / Учебное пособие для студентов агроинженерных вузов // Краснодар, 2008.
9. Бурда А.Г. Исследование операций в экономике АПК. / Учебное пособие // Кубанский государственный аграрный университет. – Краснодар, 2014. – 566 с.
10. Серии плугов ПСК/ООО «Sur». [www.sur.psk@mail.ru/](http://www.sur.psk@mail.ru/) - 2018
11. Устройство для внесения минеральных удобрений / Патент на изобретение RU 2726558. Заявка № 2019115573. Дата госрегистрации в государственном реестре изобретений РФ 14.07.2020.
12. Многофункциональный агрегат для обработки почвы / Патент на изобретение RU 2687201. Заявка № 2018114385. Дата госрегистрации в государственном реестре изобретений РФ 07.05.2019

### References

1. Agrotexnicheskie trebovaniya k osnovny`m texnologicheskim operaciyam pri adaptivny`x texnologiyax vozdey`vaniya ozimy`x kolosovy`x i kukuruzy` i novy`e texnicheskie sredstva dlya ix vy`polneniya v Krasnodarskom krae / Ry`balkin P.N., i dr. // Rekomendacii: Departament sel`skogo xozyajstva i prodovol`stviya Krasnodarskogo kraya, Krasnodarskij NIISX im P.P. Luk`yanenko – Krasnodar 2001.
2. Maslov G.G., Tkachenko V.T., Yudina E.M., Kadyrov M.R., Kalitko S.A. The improvement of the technology of winter wheat grain production for the purpose of energy saving // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. T.12. № 3. S.2071-2080.
3. Maslov G.G., Trubilin E.I. Rational process machines system for producing sunflower seeds and its efficiency // World Applied Sciences Journal. 2014. T. 29. № 12. S.1615-1620.
4. Maslov G.G., Trubilin E.I., Truflyak E.V. Rarameters optimization for multifunctional aggregates in plant growing mechanization // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. - T.7. № 3. S.1919-1926.
5. Sistema zemledeliya Krasnodarskogo kraya na agrolandshaftnoj osnove. –Krasnodar, 2015. – 315 s.
6. Patent na izobrenie RU 2246195 C2, 20.02.2005. Protravlivatel` semyan. Avtory`: Borisova S.M., Maslov G.G., Mechkalo A.L., Trubilin E.I / Zayavka № 2003109126/12 ot 31.03.2003.
7. Maslov G., Palapin A., Rinas N. Mnogofunkcional`ny`j uborochny`j agregat // Mezhdunarodny`j sel`skoxozyajstvenny`j zhurnal. - 2014. № 1-2. S. 16-19.
8. Maslov G.G., Karabaniczkiy A.P., Kochkin E.A. Texnicheskaya e`kspluataciya MTP. / Uchebnoe posobie dlya studentov agroinzhenerny`x vuzov // Krasnodar, 2008.
9. Burda A.G. Issledovanie operacij v e`konomie APK. / Uchebnoe posobie // Kubanskij gosudarstvenny`j agrarny`j universitet. – Krasnodar, 2014. – 566 s.
10. Serii plugov PSK/OOO «Sur». www.sur.psk@mail.ru/ - 2018
11. Ustrojstvo dlya vneseniya mineral`ny`x udobrenij / Patent na izobrenie RU 2726558. Zayavka № 2019115573. Data gosregistracii v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 14.07.2020.
12. Mnogofunkcional`ny`j agregat dlya obrabotki pochvy` /Patent na izobrenie RU 2687201. Zayavka № 2018114385. Data gosregistracii v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 07.05.2019