

УДК УДК 631. 311

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-104-111>

исследования / research

**Казаков Ю.Ф.,
Медведев В.И.,
Павлов В.С.,
Пыркин А.В.**

*Чувашский государственный аграрный университет, ул. К. Маркса, 29, г. Чебоксары, Россия
E-mail: ura.kazakov@mail.ru*

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, подпокровное рыхление, комбинированный рабочий орган, детерминизм скоростей, пути снижения, кинематический анализ, тяговое сопротивление

Для цитирования: Казаков Ю.Ф., Медведев В.И., Павлов В.С., Пыркин А.В. Пути снижения детерминизма скоростей в почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатах. Аграрная наука. 2022; 360 (6): 104–111.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-104-111>

Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи, несут равную ответственность за плагиат и представленные данные.

Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.

**Yuri F. Kazakov,
Vladimir I. Medvedev,
Vladimir S. Pavlov,
Alexey V. Pyrkin**

*Chuvash State Agrarian University, K. Marx st., 29, Cheboksary, Russia
E-mail: ura.kazakov@mail.ru*

Key words: machine-tractor unit, undercover loosening, combined working body, speed determinism, ways to reduce, kinematic analysis, traction resistance

For citation: Kazakov Yu.F., Medvedev V.I., Pavlov V.S., Pyrkin A.V. Ways to reduce the determinism of speeds in tillage machine-tractor units. Agrarian Science. 2022; 360 (6): 104–111. (In Russ.)

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-104-111>

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism and presented data.

The authors declare no conflict of interest.

Пути снижения детерминизма скоростей в почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатах

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Одним из основных факторов повышения производительности машинно-тракторных агрегатов (МТА) является скорость поступательного движения. В большинстве случаев пахотные МТА имеют жесткую связь между составляющими. С ростом поступательного движения энергозатраты изменяются с положительным ускорением из-за повышения прочностных характеристик почвы. Целью исследований является изыскание возможностей снижения детерминизма скоростей составляющих машинно-тракторного агрегата, разработка оценочных показателей детерминизма скоростей, кинематический анализ комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа-механизма.

Методы. Методика исследований базируется на системном анализе факторов, имеющих причинно-следственную связь с качественными и энергетическими показателями работы машинно-тракторных агрегатов. Пахотный слой рассматривается как трехфазная среда. Кинематический анализ проведен методами теоретической механики. Тяговое сопротивление определено в условиях почвенного канала.

Результаты. Технологические параметры режимов работы, скорость, глубину хода почвообрабатывающих рабочих органов, направление движения вдоль склона можно менять в ограниченных взаимообусловленных пределах, соответствующих агротехническим, экологическим, эксплуатационным требованиям и требованиям безопасности персонала МТА. Предложены оценочные показатели детерминизма скоростей: кинематическая трансформация угла резания, качество крошения, максимум движущей силы при минимуме мощности на работу рабочих органов-двигателей. Разработан комбинированный почвообрабатывающий рабочий орган-механизм для подпокровного рыхления в составе щелевального ножа и пружинного кротователя, самоприспосабливающийся к изменению продольной твердости почвы. Результаты кинематического анализа и экспериментальных исследований макетного образца рабочего органа в условиях почвенного канала подтвердили автоколебательный характер движения пружинного кротователя. Автоматическое поддержание необходимой степени детерминизма скоростей способствует снижению энергоемкости процесса щелевания с одновременным кротованием.

Ways to reduce the determinism of speeds in tillage machine-tractor units

ABSTRACT

Relevance. One of the main factors in increasing the productivity of machine-tractor units (MTU) is the speed of translational motion. In most cases, the arable MTU have a rigid connection between the components. With the growth of translational motion, energy costs change with a positive acceleration due to an increase in the strength characteristics of the soil. The purpose of the research is to find ways to reduce the determinism of the speeds of the components of the machine-tractor unit, to develop estimated indicators of the determinism of speeds, kinematic analysis of the combined tillage working organ-mechanism.

Methods. The research methodology is based on a systematic analysis of factors that have a causal relationship with the quality and energy performance of machine-tractor units. The arable layer is considered as a three-phase medium. The kinematic analysis was carried out by methods of theoretical mechanics. The traction resistance is determined in the conditions of the soil channel.

Results. The technological parameters of the operating modes, speed, depth of the tillage working bodies, the direction of movement along the slope can be changed within limited mutually dependent limits corresponding to agrotechnical, environmental, operational requirements and safety requirements of the MTU personnel. Estimated indicators of the determinism of speeds are proposed: kinematic transformation of the cutting angle, the quality of crumbling, the maximum of the driving force with a minimum of power for the work of the working bodies-movers. A combined tillage working organ-mechanism has been developed for undercover loosening as part of a cutting knife and a spring mole, self-adapting to changes in the longitudinal hardness of the soil. The results of kinematic analysis and experimental studies of a mock-up sample of a working organ in the conditions of a soil channel confirmed the self-oscillatory nature of the movement of the spring mole. Automatic maintenance of the necessary degree of determinism of speeds helps to reduce the energy intensity of the crevice process with simultaneous mowing.

Поступила в редакцию: 28 марта 2022
Одобрена после рецензирования: 11 мая 2022
Принята к публикации: 20 июня 2022

Received: 28 march 2022
Accepted in revised form: 11 may 2022
Accepted for publication: 20 june 2022

Введение

Пахотный слой характеризуется большой изменчивостью физико-механических свойств, в частности продольной твердости [1]. Скорости машинно-тракторных агрегатов (МТА) и рабочих органов, как правило, совпадают во времени и в пространстве. В целях повышения производительности МТА желательное увеличение его поступательной скорости. Но для «классических» МТА с жесткой связью трактора с рамой и жестким креплением исполнительных рабочих органов (ИРО) на раме это означает рост скорости и рабочих органов, соответственно, и скорости нагружения деформируемой почвы. В результате увеличиваются величина предела текучести и временного сопротивления почвы [2]. Увеличение энергоемкости процесса обработки почвы на повышенных рабочих скоростях объясняется дальностью отбрасывания и скоростью оборота пласта, повышением прочностных характеристик почвы, превышением скорости нагружения над скоростью распространения пластических деформаций [3]. В большинстве случаев силовые и кинематические показатели рабочих органов изменяются одновременно. Следовательно, нужны МТА, в которых трактор, рама орудия и исполнительные рабочие органы имеют различные по величине и направлению скорости.

Существенного снижения детерминизма скоростей составляющих МТА можно добиться через многоканальный отбор мощности двигателя, в частности применением многорежимного привода ВОМ, гидропривода, электропривода, их комбинацией [4]. Так как в целях повышения эффективности работы исполнительные рабочие органы должны совершать не только поступательные, но и сложные движения, появляется необходимость в трансмиссиях с широким пределом регулирования кинематических и силовых параметров. Поддержание заданного закона движения ИРО, как по величине, так и по направлению, необходимо при выполнении технологических процессов посевных и посадочных машин, культиваторов для междурядной обработки, прореживания рядков. В целях снижения энергозатрат скорости движения «мертвых» масс агрегата и ИРО могут отличаться кратно по величине. Скорость ИРО при выполнении рабочего хода может существенно отличаться от скорости при холостом ходе. При встречных направлениях скоростей тягача и рабочих органов технологическое сопротивление последних превращается в движущую силу, разгружая канал передачи энергии через пару «колесо — опорная поверхность» [5]. В целях выполнения жестких агротехнических требований в трансмиссиях рассадопосадочных машинно-тракторных агрегатов необходимо автоматическое управление кинематическими показателями с учетом реальной поступательной скорости трактора [4]. Самовращающиеся почвообрабатывающие рабочие органы имеют больше степеней свободы [6, 7]. Они могут непрерывно менять свое положение в зависимости от изменчивости продольной твердости почвы, обеспечивая тем самым снижение тягового сопротивления.

Целью исследований является изыскание возможностей снижения детерминизма скоростей составляющих машинно-тракторного агрегата, обоснование оценочных показателей тесноты связей их скоростей, разработка макетных образцов рабочих органов, самоприспособляющихся к изменяющейся продольной твердости почвенного пласта.

Методика

Методика исследований базируется на системном анализе факторов, имеющих причинно-следственную связь с качественными и энергетическими показателями работы сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов. При этом пахотный слой почвы рассматривается как трехфазная среда [8]. При проведении кинематического анализа использованы методы теоретической механики. Экспериментальные исследования макетных образцов рабочих органов проведены в условиях почвенного канала.

Результаты

Подвод энергии к почвообрабатывающим рабочим органам осуществляется как через движители трактора, так и непосредственно к рабочему органу. К комбинированным рабочим органам подвод энергии происходит, как правило, по обоим каналам. Системный подход к анализу процесса рыхления почвы позволил установить энергетические, технологические, конструктивные факторы, оказывающие существенное влияние на эффективность, надежность и безопасность этого процесса с учетом экологических, агротехнических, эксплуатационных требований (рис. 1). Технологические параметры режимов работы, скорость и глубину хода рабочего органа можно менять в ограниченных взаимобусловленных пределах, соответствующих агротехническим требованиям.

Напряженно-деформированное состояние почвы или поле напряжений есть результат формируемого деформатором поля скоростей. Поле скоростей рассматриваем как представление в пространстве и во времени положения деформатора в обрабатываемой среде (рис. 1). Конечный результат изменения поля скоростей, а следовательно, и поля напряжений в пахотном слое — рыхление с целью улучшения водного и воздушного режима. С точки зрения реологии почвы важны скорость деформатора, соотношение продолжительности фаз его приложения и рассеивания напряжений. Так как нагружение почвы может иметь статический и динамический характер, по-разному будет происходить ее разрушение [5].

Представление пахотного слоя как трехфазной среды позволяет утверждать, что внутреннее упругое сопротивление зависит от степени деформации, а вязкое сопротивление — от скорости деформации. При ударных нагрузках разрушение носит хрупкий характер. Для снижения сопротивления почвы предпочтительны меры по снижению доли вязкого сопротивления. Скорость деформации почвы как реологического тела зависит от скорости упругой волны, обусловленной плотностью и модулем упругости почв, иот скорости волны пластической деформации, обусловленной тангенсом угла наклона касательной к диаграмме «напряжение — деформация» [5].

Рассмотрим изменение поля скоростей почвообрабатывающих МТА, рамы орудия и рабочих органов, в пространстве и во времени с учетом их технологического назначения, конструкции, степеней свободы или количества возможных перемещений (рис. 1).

Скорости рамы орудия и рабочих органов совпадают, если стойка и исполнительный рабочий орган имеют жесткую конструкцию. При шарнирном креплении жестких стоек глубокорыхлителя на раме они могут отличаться в определенных пределах ввиду отклонения стойки рабочего органа, закрепленного на сферическом шарнире, от вертикального положения. Преимущества

такого крепления рабочего органа проявляются при обработке перекошенных почв: не происходит сгущение почвы, удается избежать заземления глыб между стойками [9].

В агрегатах для обработки почвы на склонах скорость и направление составляющих МТА часто не совпадают во времени и (или) в пространстве. Рассмотрим некоторые случаи:

- скорость рабочего органа перпендикулярна к скорости МТА, движение рабочего органа осуществляется в горизонтальной плоскости, со сдвигом во времени к скорости МТА. Примером является агрегат с орудием, рабочие органы которого осуществляют обработку склона вдоль горизонталей при движении МТА поперек склона [4];

- скорость рабочего органа перпендикулярна к скорости МТА, движение рабочего органа осуществляется в вертикальной плоскости со сдвигом во времени к скорости МТА (штыреватели склонов) [4];

- скорость рабочего органа непрерывно меняет свое положение относительно скорости МТА, движение рабочего органа осуществляется в горизонтальной плоскости, отсутствует сдвиг во времени скорости МТА и рабочих органов, пример — зубчатая борона с колебательным движением рамы в горизонтальной плоскости [4].

Вильчатый рабочий орган, предложенный в [10], внедряется в почву на заданную глубину практически вертикально, а затем производит сдвиг сформированного пласта в направлении, противоположном скорости МТА, реализуя сдвиг скоростей во времени и в пространстве. В почвообрабатывающих фрезях с горизонтальной или вертикальной осью вращения происходит постоянное изменение векторов скорости рабочих органов и рамы. Положение вектора скорости рабочего органа по отношению к почвенному полупространству существенно влияет на энергоёмкость процесса рыхления почвы ножом фрезы через изменение вида резания с заблокированного на полублокированный или на свободный [5].

Снижение детерминизма скоростей составляющих МТА достигается применением упругих стоек ИРО, комбинированных агрегатов, многоканальным отбором мощности с автоматическим изменением силовых и кинематических потоков привода и другими способами (рис. 1).

В связи с вышеизложенным в целях снижения энергозатрат при выполнении технологических операций необходимо разработать показатели детерминизма скоростей составляющих МТА с учетом условий их работы, изменчивости продольной твердости почвы.

Разработанные академиком В.П. Горячкиным математические модели работы плуга, надежности технологических процессов работы молотильного аппарата, мотвила, бесподпорного скашивания нами рассма-

триваются как результат отражения связи энергозатрат и детерминизма скоростей [2].

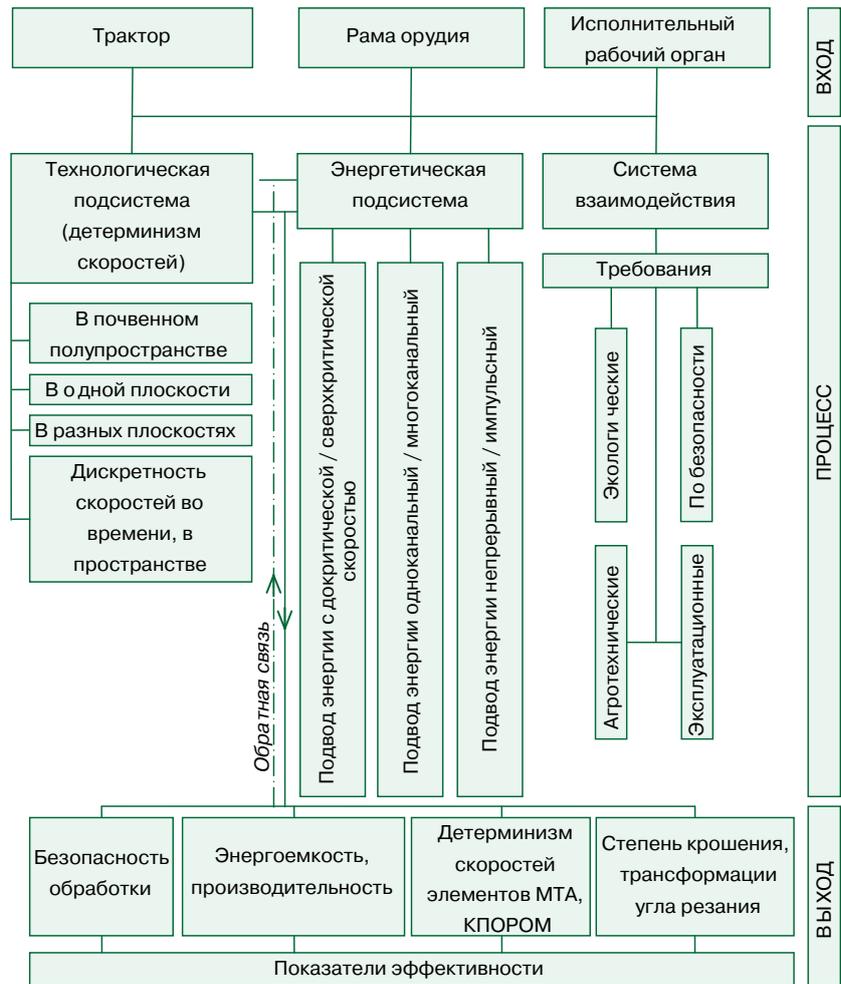
На наш взгляд, к оценочным показателям детерминизма скоростей почвообрабатывающих МТА можно отнести (рис. 1):

- кинематическую трансформацию угла резания, реализуемую за счет активного привода рабочих органов или торможением пассивных сплошных дисков;
- показатели крошения почвенных комков, в частности за счет притормаживания игольчатых дисков [11];
- обеспечение максимума движущей силы рабочими органами-двигателями при минимуме мощности на их поступательное и вращательное движение.

Поиск на основе теории прочности Кулона — Мора новых, нетрадиционных физических процессов для деформации и разрушения межагрегатных связей в почве, для снижения энергоёмкости обработки почвы, показал необходимость комбинации разнонаправленных деформаций сжатия и растяжения [5, 12].

Профессор В.И. Ветехин установил эффект саморегулирования формы почвообрабатывающего рабочего органа в системе «рабочий орган — пахотный слой почвы», механизм самоадаптации системы с образованием промежуточного тела из уплотненной почвы, выполняющей функции динамически изменяющейся части рабочего органа и регулятора процесса рыхления почвы [12]. По его мнению, противоречие между рабочим органом с жестким креплением, неизменной формой

Рис. 1. Представление работы почвообрабатывающих МТА в виде системного процесса
Fig. 1. Representation of the work of tillage MTU in the form of a system process



рабочего органа как трехмерного геометрического объекта, и динамическим процессом деформации пласта устраняется тем, что рабочий орган и почва образуют систему с вовлечением в формообразование рабочей поверхности орудия части обрабатываемой почвы.

Рабочие органы, кривизна поверхности которых уменьшается от переднего к заднему обрезу, позволяют преобразовать сжатие почвы в деформации сдвига с растяжением. Процесс сопровождается снижением энергозатрат при разуплотнении почвы, так как прочность на растяжение меньше, чем на сжатие. Кротователь с жесткими лучами имеет такую форму (рис. 2, а) [5].

Поиск путей снижения детерминизма скоростей при одноканальном расходе мощности двигателя привел к необходимости замены кротователя жесткой конструкции на коническую пружину сложной формы, которая крепится к дрениру щелереза на подпружиненной тяге [5]. Кроме реализации вышеназванных преимуществ, пружинный кротователь способствует релаксации сжатого пласта, растяжению во времени процесса вступления в работу элементов комбинированного рабочего органа-механизма.

Комбинированный почвообрабатывающий рабочий орган-механизм (КПОРОМ), представленный на рисунке 2, d, функционально разделен на две части: ще-

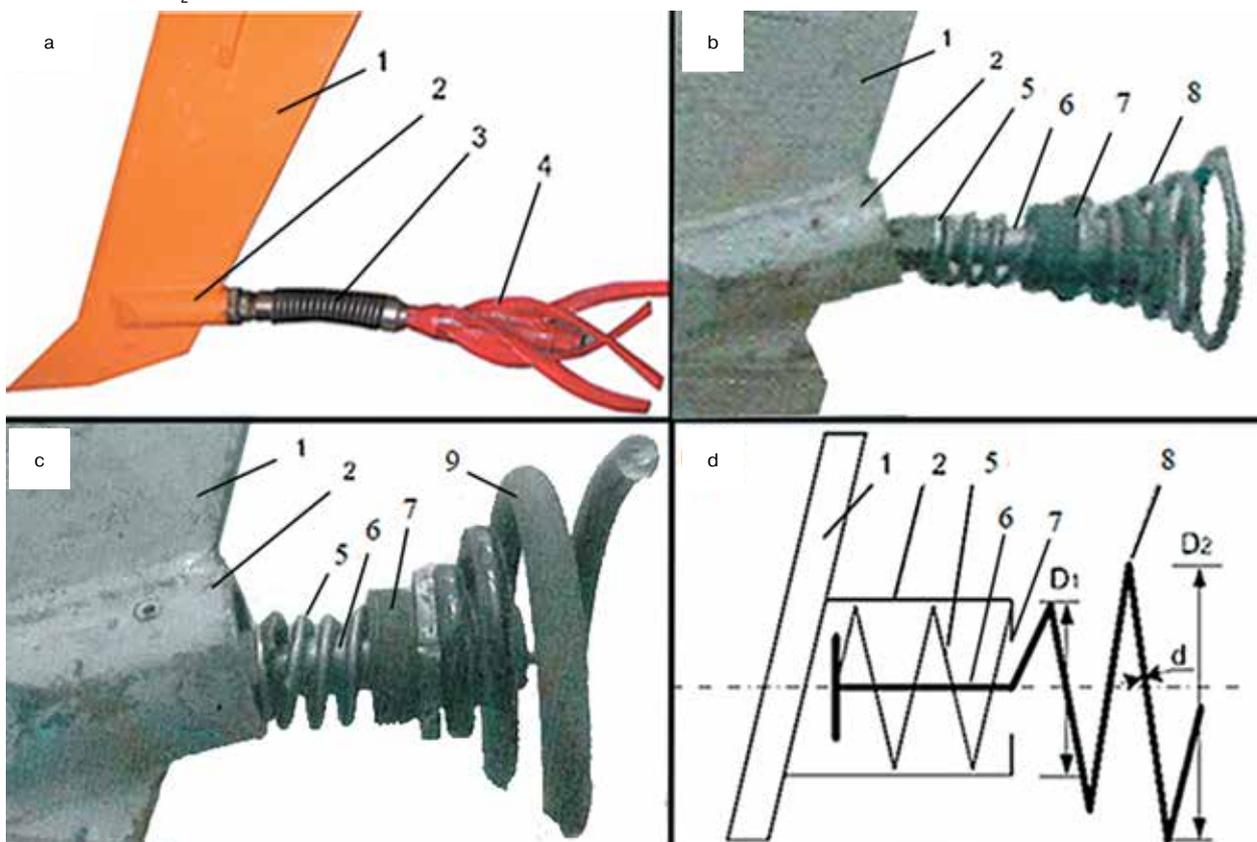
лезный нож 1 с дрениром 2 и рыхлитель 4 с пятью степенями свободы на упругой тяге 3, с возможностью самоприспосабливаться к неоднородностям почвы, обеспечивающий рыхление стенок кротовины для увеличения инфильтрации. При этом условия резания каждым последующим витком различные, и они непрерывно изменяются.

Особенностью рабочих органов, представленных на рис. 2, b и 2, c, является периодическая релаксация напряжений, сформированных в почве рабочей поверхностью щелереза за счет изменения длины кротователя и пружины в тяговой опоре в зависимости от изменения продольной твердости почвы, ее плотности, изменения реальной скорости ножа-щелереза.

Щелерезный нож движется со скоростью рамы, а пружинный кротователь может отклоняться от этой скорости как по направлению, так и по величине. Эти свойства КПОРОМ способствуют формированию рационального поля скоростей деформатора, автоматическому изменению скорости, продолжительности и периодичности фаз сжатия и релаксации. При этом толщина и длина стружки, отрезаемой со стенок кротовины, изменяются автоматически. Стружка отваливается в направлении открытой поверхности кротовины — к ее центру. Кротователь будет отклоняться в ту область пласта, где встречает наименьшее сопротивление. В результате

Рис. 2. Комбинированный почвообрабатывающий рабочий орган-механизм: а — нож-щелерез с дрениром и рыхлителем жесткой конструкции; б — нож-щелерез с дрениром и конической пружиной из проволоки постоянного диаметра; с — нож-щелерез с дрениром и конической пружиной из проволоки увеличивающегося диаметра; д — схема пружинного кротователя; 1 — нож-щелерез, 2 — дренир (тяговая опора), 3 — упругий элемент, 4 — рыхлитель лучевой жесткой конструкции, 5 — пружина, 6 — тяга, 7 — опорная гайка, 8 — коническая пружина из проволоки постоянного диаметра, 9 — коническая пружина из проволоки увеличивающегося диаметра, D_1 — диаметр основания, D_2 — диаметр конечного витка, d — диаметр проволоки

Fig. 2. Combined tillage working organ-mechanism: а — a knife-cutter with a drainer and a ripper of rigid construction; б — a knife-cutter with a drainer and a conical spring made of wire of constant diameter; с — a knife-cutter with a drainer and a conical spring made of wire of increasing diameter; д — a diagram of a spring mole; 1 — knife-cutter, 2 — drainer (traction support), 3 — elastic element, 4 — ripper of a beam rigid structure, 5 — spring, 6 — rod, 7 — support nut, 8 — conical spring made of wire of constant diameter, 9 — conical spring made of wire of increasing diameter, D_1 — diameter of the base, D_2 — diameter of the final turn, d — diameter of the wire



формируется рациональное поле скоростей, создаются условия для реализации эффекта Баушингера одновременно в перпендикулярных направлениях.

Происходит изменение тягового сопротивления рабочего органа за счет адаптации как величины диаметров витков, так и углов атаки, резания, рыхления. Количественными показателями степени адаптации КПОРОМ являются скорость изменения угла подъема конической винтовой линии с переменным радиальным и осевым шагом, диаметров витков, длины кротователя [5]. Их величина зависит от вида упругой характеристики системы, состоящей из пружины 5 в тяговой опоре 2 и кротователя в виде пружины 8 и 9 с постоянным (рис. 2, б) или нарастающим (рис. 2, с) диаметром d заготовки, из которой изготовлен кротователь.

Для выявления качественной картины процесса взаимодействия кротователя с почвенным пластом проведем кинематический анализ работы КПОРОМ. Движение подпружиненного кротователя разделим на этапы (фазы):

— первый этап — равномерное движение кротователя с щелерезным ножом (рис. 3, а);

— второй этап наступает при движении через переуплотненную полосу почвы; при этом нож продолжает движение со скоростью трактора, а движение центра масс кротователя прекращается, кротователь вытягивается, диаметры витков уменьшаются, потенциальная энергия системы возрастает за счет растяжения пружинного кротователя и сжатия пружины в тяговой опоре (рис. 3, в);

— третий этап — движение составляющих комбинированного рабочего органа-механизма после преодоления кротователем полосы переуплотнения; щелерезный нож продолжает движение, центр масс кротователя движется ускоренно, длина кротователя сокращается, сжатая пружина в опоре выпрямляется; кротователь «догоняет» нож;

— четвертый этап — дальнейшее равномерное движение кротователя совместно с щелерезным ножом, пружина в тяговой опоре находится в устоявшемся режиме некоторого сжатия (рис. 3, б).

Допустим, при некотором моменте времени $t \neq 0$ положение центра масс кротователя из-за перепада продольной твердости почвы изменяется на величину $l_1 - l_2 = x - v \cdot t$, в результате сила упругости $F(t)$ снижается. Ее представим выражением

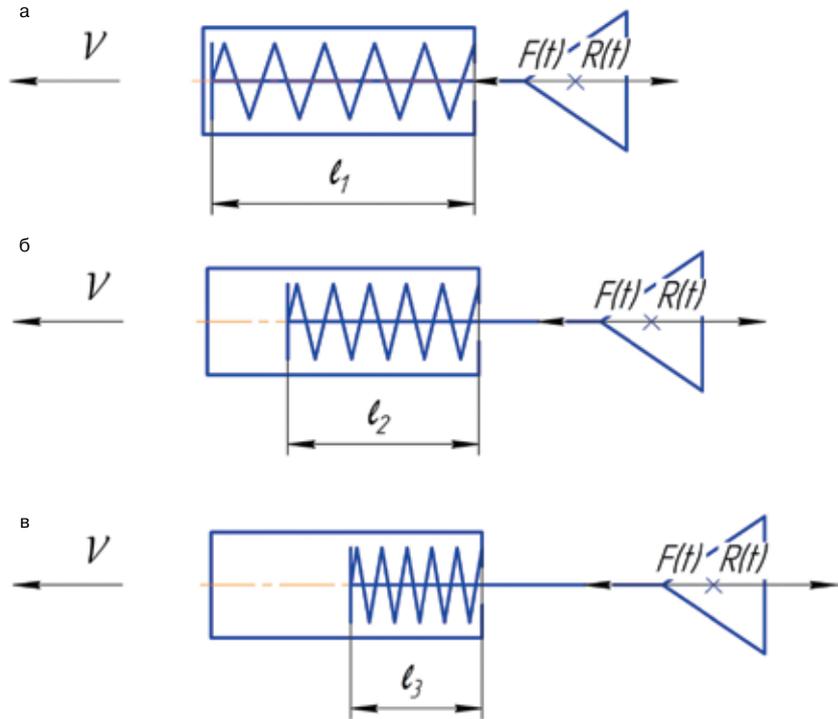
$$F(t) = R_1 - (x - v \cdot t) \cdot c \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение движения центра масс кротователя:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \cdot x = \frac{c}{m} \cdot v_0 \cdot t + \frac{R_1 - R_2}{m} \quad (2)$$

Рис. 3. Схема работы подпружиненного кротователя: а — $l = l_1$, когда $R(t) = 0$; б — $l = l_2 < l_1$ при $0 \geq R(t) \geq R(t)_{\max}$; в — $l = l_3 < l_2$ при $R(t) = R(t)_{\max}$; V — скорость движения рамы; $R(t)$ — сила сопротивления почвы; $F(t)$ — сила упругости

Fig. 3. Operation diagram of a spring-loaded mole: а — $l = l_1$ when $R(t) = 0$; б — $l = l_2 < l_1$ upon $0 \geq R(t) \geq R(t)_{\max}$; в — $l = l_3 < l_2$ upon $R(t) = R(t)_{\max}$; V — frame movement speed; $R(t)$ — soil resistance strength; $F(t)$ — the strength of elasticity



Скорость центра масс кротователя будет изменяться по закону:

$$x = v_0 - v_0 \cdot \cos kt + \frac{R_1 - R_2}{c} \cdot k \cdot \sin kt, \quad (3)$$

где R_1 — сила сопротивления движению кротователя на втором этапе, R_2 — сила сопротивления при его установившемся движении; c — приведенная жесткость системы; $k^2 = c/m$ — собственная частота колебаний системы; m — приведенная масса рабочего органа и почвы, участвующая в движении.

Обозначим через a безразмерный параметр

$$a = \frac{k \cdot (R_1 - R_2)}{c \cdot v_0} \quad (4)$$

Условие остановки центра масс кротователя в момент времени t_1 представим зависимостью:

$$a \cdot \sin kt_1 = \cos kt_1 - 1 \quad (5)$$

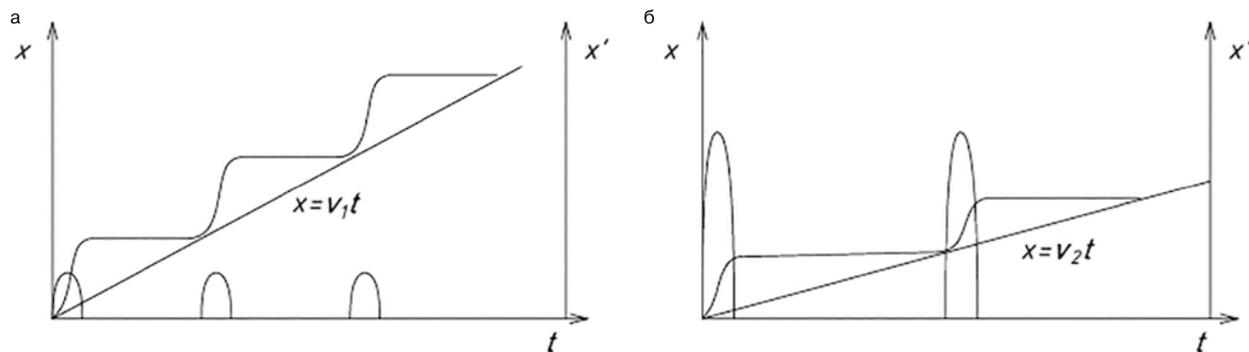
После преобразований получим выражения для определения величины промежутка t_1 :

$$\sin kt_1 = -\frac{2a}{1-a^2} \quad \text{и} \quad \cos kt_1 = \frac{1-a^2}{1+a^2} \quad (6)$$

Продолжительность относительной неподвижности центра масс пружинного кротователя на втором этапе:

$$t_2 = \frac{2 \cdot (R_1 - R_2)}{c \cdot v_0} = \frac{2a}{k} \quad (7)$$

Рис. 4. Графики изменения пути x и скорости центра масс кротователя x' при различной скорости перемещения черенкового ножа, $v_1 > v_2$
Fig. 4. Graphs of changes in the path x and velocity of the center of mass of the mole x' at different speeds of movement of the cutting knife, $v_1 > v_2$



Перемещение рамы орудия за период T составит

$$x_1 = v_0 \cdot (t_1 + t_2) = T \cdot v_0. \quad (8)$$

Время t_1 приближенно определим из системы уравнений (6):

$$t_1 \approx \pi/k. \quad (9)$$

Период T автоколебаний приблизительно составит

$$T \approx (\pi + 2a)/k. \quad (10)$$

При уменьшении скорости установившегося движения v_0 возрастает период T , а также скорость центра масс кротователя на третьем этапе (рис. 4). На рис. 4, а и 4, б путь щелерезного ножа x представлен лучами из начала координат; скорости x' центра масс кротователя представлены параболоми, а ступенчатые кривые представляют изменение суммарной скорости кротователя. При увеличении скорости v_0 длительность остановок уменьшается (рис. 4, б), движение приобретает более равномерный характер. Следовательно, самоприспособляемость кротователя более выражена на участках поля со значительной изменчивостью продольной твердости пахотного слоя.

Для начальных условий, когда время, перемещение и скорость равны нулю, ускорение максимальное и равно:

$$\ddot{x} = \frac{R_2 \cdot (\eta - 1)}{c} \cdot k^2 \quad (11)$$

Таким образом, при условии $\frac{k^2}{c} = \frac{1}{m}$ имеем:

$$\ddot{x}_{MAX} = \frac{R_2 \cdot (\eta - 1)}{m} \quad (12)$$

Следовательно, на импульс силы влияют масса кротователя, жесткость витков пружины, частота собственных колебаний, перепад сопротивления рабочего органа, обусловленный реологическими характеристиками почвы и изменчивостью ее продольной твердости. Наибольший импульс будет соответствовать состоянию предельно сжатой пружины в опоре и максимально растянутого пружинного кротователя.

Анализ показал, что изменение продолжительности фаз сжатия и релаксации происходит автоматически. Повторное через небольшой промежуток времени воздействие на прилегающий объем пласта смежными витками кротователя приводит к сложению деформаций в соответствии теорией наследственной ползучести

Больцмана — Вольтера [5], увеличению эффективности рыхления, формированию микротрещин в нем.

Сочетание изменяющихся жесткостей пружины в опоре c_1^i и витков кротователя c_2^i , массы m , зависящей от текущих диаметров витка и заготовки, способствует достижению непрерывно изменяющейся собственной частоты k , расширяя возможности самоприспособления рабочего органа-механизма:

$$k^2 = \frac{c_1^i \cdot c_2^i}{(c_1^i + c_2^i) \cdot m} \quad (13)$$

На рис. 5 представлены варианты упругих характеристик — изменения деформации h упругого элемента от приложенной нагрузки Q . Статический ход упругой характеристики должен соответствовать установившемуся характеру движения рабочего органа, динамический ход — отражать пределы самоприспособления к изменяющейся нагрузке, а полный ход — формировать нагрузку для прочностного расчета. Кроме этого, можно судить о возможности перевода рабочего органа в транспортное положение путем стягивания подпружиненной тяги 6 в дрeнер 2 (рис. 2, d).

Анализ характеристик позволяет утверждать:

- линейная упругая характеристика (кривая 1, рис. 5) сужает свойства самоприспособляемости рабочего органа при изменении продольной твердости почвы и скорости в широких пределах;

- малая жесткость c_2^i витков пружинного кротователя приводит к увеличению полного хода, при которой кротователь растянется до величины, ограниченной прочностью заготовки, и наружный диаметр витков приближается к диаметру дрeнера, что не способствует нарезанию кротовин необходимого размера. При малой жесткости пружин в опоре c_1^i и ограниченном ходе тяги не гарантируется «стягивание» кротователя для перевода его в транспортное положение. При ниспадающей упругой характеристике (кривая 3, рис. 5) возможны импульсы силы — удары тяги по заглушке корпуса дрeнера;

- применение прогрессивно возрастающей упругой характеристики (кривая 2, рис. 5) может ограничивать пределы самоприспособления кротователя по диаметру витков при прохождении им существенно переуплотненной полосы, например полевой дороги.

Таким образом, при ограниченном полном ходе тяги в опоре стремление уменьшить жесткость упругой системы с целью большей приспособляемости комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа вступает в противоречие с необходимостью иметь достаточную жесткость для самоприспособления.

При обработке КПОРОМ почв, характеризующихся большим перепадом продольной твердости и существенным изменением динамической вязкости пахотного слоя, необходима высокая потенциальная энергия упругой системы в тяговой опоре. Жесткая «подвеска» может привести к увеличению сил сопротивления на кротователь, ее пиковые значения не будут «сглажены», стартовое сопротивление будет велико, не будет достаточного пути на разгон «мертвых» масс агрегата с такими рабочими органами. При мягкой «подвеске» возрастает вероятность «пробоя», увеличивается число ударов тяги в крышку дрена, встроенного в щелерезный нож. Необходима комбинированная упругая характеристика с прогрессивным уменьшением упругости на начальном этапе для перевода пружинного кротователя в транспортное положение. Плавное нарастание ее жесткости в средней части хода обеспечивает самоприспособление в условиях мало изменяющейся продольной твердости почвы. Прогрессивное возрастание в конце полного хода обеспечивает безопасное преодоление чрезмерно уплотненных участков почвы.

Экспериментальные исследования макетного образца комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа-механизма в составе щелерезного ножа и пружинного кротователя проведены в почвенном канале института механики и энергетики Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева [5]. Пружинный кротователь, параметры которого установлены методом многокритериальной оптимизации, имеет диаметр начального витка $D_1 = 0,045\text{ м}$, конечного витка $D_2 = 0,25\text{ м}$, изготовлен из прутка диаметром $d = 0,009\text{ м}$ (рис. 2) [13]. В качестве контрольного рабочего органа использован четырехлучевой кротователь с жесткими лучами от подпокровного рыхлителя РП-2,4 (рис. 2, а). Диаметр основания лучевого кротователя также равен $0,25\text{ м}$. Испытания проводились при скорости движения тяговой станции $0,29\text{ м/с}$ и глубине хода кротователя, равной $0,25\text{ м}$.

Изменение тягового сопротивления щелерезного ножа с пружинным кротователем и с четырехлучевым рыхлителем на этапах вступления в работу и установившегося движения представлено на рис. 6. Установлено, что на обоих этапах изменение тягового сопротивления ножа с конической пружиной имеет колебательный характер.

По величине и характеру изменения графики имеют несущественные отличия. Тем не менее, суммарная работа прохода щелерезного ножа с пружинным кротователем, представленная площадью под графиком изменения тягового сопротивления, меньше, чем аналогичный показатель кротователя с жесткими лучами рыхлителя РП-2,4.

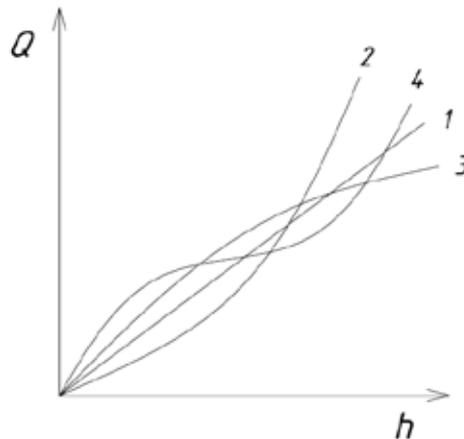
Выводы

Показана необходимость и возможность снижения детерминизма скоростей составляющих почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов: трактора, рамы орудия, исполнительных рабочих органов.

Предложен предварительный перечень оценочных показателей детерминизма скоростей состав-

Рис. 5. Упругие характеристики: 1 — линейная; 2 — прогрессивно возрастающая; 3 — прогрессивно снижающаяся; 4 — комбинированная

Fig. 5. Elastic characteristics: 1 — linear; 2 — progressively increasing; 3 — progressively decreasing, 4 — combined



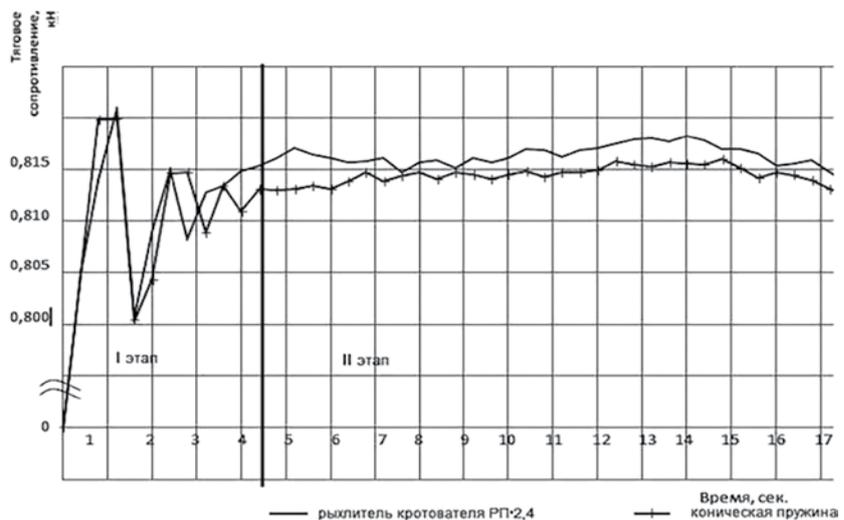
ляющих почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов.

Результаты кинематического анализа комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа-механизма в составе щелерезного ножа и пружинного кротователя показали, что имеют место переменные периодичность и продолжительность фаз сжатия и релаксации почвы, обеспечивается автоматическое поддержание необходимой степени детерминизма скоростей с учетом изменчивости продольной твердости почвы.

Испытания в почвенном канале макетных образцов комбинированных почвообрабатывающих рабочих органов-механизмов, самоприспособляющихся к изменяющейся продольной твердости почвенного пласта, подтвердили автоколебательный характер изменения тягового сопротивления, снижение энергоемкости процесса щелевания с одновременным кротованием.

Рис. 6. Графики изменения тягового сопротивления комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа-механизма в составе щелерезного ножа, пружинного кротователя и рыхлителя подпокровного кротователя РП-2,4

Fig. 6. Graphs of the change in the traction resistance of the combined tillage working organ-mechanism consisting of a cutting knife, a spring mole and a ripper of a subsurface mole РП-2.4



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушнарев А., Кравчук В., Кушнарев С., Дюжаев В. Мониторинг плотности почвы пахотного горизонта в системе точного (управляемого) земледелия. *Техніка и технології в АПК*. 2010; 9(12): 12–16.
2. Горячкин В.П. Собрание сочинений: в 3 т. Изд. 2-е. Москва: Колос, 1968. 720 с.
3. Чаткин М.Н. Кинематика и динамика ротационных почвообрабатывающих рабочих органов с винтовыми элементами. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 316 с.
4. Макаров В.С. Совершенствование механического привода рабочих органов и движителей машинных агрегатов сельскохозяйственного назначения. Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия. 2007. 238 с.
5. Казаков Ю.Ф. Почвообрабатывающие рабочие органы – механизмы. Чебоксары: Чувашский госуниверситет, 2020. 164 с.
6. Valiev A, Mukhametshin I, Muhamadyarov F, et al. Theoretical substantiation of parameters of rotary subsoil loosener. *Engineering for Rural Development. 18th international scientific conference*. Jelgava. Latvia University of Life Sciences and Technologies. 2019; 312–318.
7. Yarullin F, Valiev A, Muhamadyarov F, et al. Determination of energy characteristics of conical rotary working tool for tillage. *Engineering for rural development. 19th international scientific conference*. Jelgava. Latvia University of Life Sciences and Technologies. 2020; 1069–1075.
8. Haghighi K, Srivastva AK, Steffe JF. The Rheological Approach to Soil Modeling. *TRANSACTIONS of the ASAE*. 1987; 30(6); 1661–1672.
9. Пархоменко Г.Г. Принцип разработки технологического процесса обработки почвы в засушливых условиях юга России. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2018;6: 32 – 39.
10. Климанов А.В., Савельев А.Ю., Мокрицкий С.М. Некоторые результаты оценки качества работы следорыхлителя тракторов класса 1,4...3,0. *Совершенствование конструкции и технологии использования сельскохозяйственной техники: Сб. трудов Самарской ГСХА*. 1999; 84–89.
11. Smirnov M., Smirnov P, Alexeev E., et al. Influence of soil-protective technologies on the characteristics of the soils of hop plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2019. C. 012018.
12. Ветехин В.И., Беловед А.И., Прилепо Н.В., Алтыбаев А.Н. Регулирование и саморегулирование процессов в почвообработке. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции*. Белорусский государственный агротехнический университет. 2019; 2(1): 40–41.
13. Константинов Ю.В. Многокритериальная оптимизация параметров пружины конического рыхлителя. *Теория и практика современной аграрной науки. Сборник национальной (Всероссийской) научной конференции. Новосибирский государственный аграрный университет*. 2018; 191–193.

ОБ АВТОРАХ:

Казаков Юрий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: ura.kazakov@mail.ru, orcid.org/0000-0002-3189-3759

Медведев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: mvi1928@mail.ru

Павлов Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: pvstolikovo@mail.ru

Пыркин Алексей Владиславович, аспирант кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: pyrkin.alexey@yandex.ru

REFERENCES

1. Kushnarev A., Kravchuk V., Kushnarev S. Dyuzhaev V. Monitoring the density of the soil arable layer in the system is accurate (controlled) agriculture. *Техніка і технології в АПК*. 2010; 9(12):12–16. (In Russ.)
2. Goryachkin VP. Collected works: in 3 vols. 2nd ed. Moscow: Kolos, 1968. 720 p. (In Russ.)
3. Chatkin MN. Kinematics and dynamics of rotary tillage working bodies with screw elements. Saransk: *Izd-vo Mordov. un-ta*, 2008. 316 p. (In Russ.)
4. Makarov VS. Improvement of mechanical drive of working bodies and movers of machine units for agricultural purposes. Cheboksary: *Chuvashskaya gosudarstvennaya sel'skhozaystvennaya akademiya*. 2007. 238 p. (In Russ.)
5. Kazakov YuF. Tillage working bodies – mechanisms Cheboksary: *Chuvashskij gosuniversitet*, 2020. 164 p. (In Russ.)
6. Valiev A, Mukhametshin I, Muhamadyarov F, et al. Theoretical substantiation of parameters of rotary subsoil loosener. *Engineering for Rural Development. 18th international scientific conference*. Jelgava. Latvia University of Life Sciences and Technologies. 2019; 312–318.
7. Yarullin F, Valiev A, Muhamadyarov F, et al. Determination of energy characteristics of conical rotary working tool for tillage. *Engineering for rural development. 19th international scientific conference*. Jelgava. Latvia University of Life Sciences and Technologies. 2020; 1069–1075.
8. Haghighi K, Srivastva AK, Steffe JF. The Rheological Approach to Soil Modeling. *TRANSACTIONS of the ASAE*. 1987; 30(6); 1661–1672.
9. Parxomenko G.G. Principle of development of technological process of soil tilling in arid conditions of the South of Russia. *Traktory i sel'xozmashiny*. 2018; 6: 32 – 39. (In Russ.)
10. Klimanov A.V., Savel'ev A.Yu, Mokriczkij S.M. Some results of the evaluation of the quality of the work of the tractor follower of class 1.4...3.0. *Sovershenstvovanie konstrukcii i texnologii ispol'zovaniya sel'skhozaystvennoj texniki: Sb. trudov Samarskoj GSXA* 1999; 84–89. (In Russ.)
11. Smirnov M., Smirnov P, Alexeev E., et al. Influence of soil-protective technologies on the characteristics of the soils of hop plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2019. C. 012018.
12. Vetoxin V.I., Beloved A.I., Prilepo N.V., Alty'baev A.N. Regulation and self-regulation of processes in tillage. *Texnicheskoe i kadrovoe obespechenie innovacionny'x texnologij v sel'skom xozyajstve: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belorusskij gosudarstvenny'j agrotexnicheskij universitet*. 2019; 2(1): 40 – 41. (In Russ.)
13. Konstatinov Yu.V. Multi-criteria optimization of the parameters of the spring of the conical ripper. *Teoriya i praktika sovremennoj agrarnoj nauki. Cbornik nacional'noj (Vserossijskoj) nauchnoj konferencii. Novosibirskij gosudarstvenny'j agrarnyj universitet*. 2018; 191 – 193. (In Russ.)

ABOUT THE AUTHORS:

Kazakov Yuri Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ura.kazakov@mail.ru orcid.org/0000-0002-3189-3759

Medvedev Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mvi1928@mail.ru

Pavlov Vladimir Stepanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pvstolikovo@mail.ru

Pyrkin Alexey Vladislavovich, graduate student, e-mail: pyrkin.alexey@yandex.ru