

Обоснование параметров почвообрабатывающих машин на основании реологии

Галина Г. Пархоменко¹, Георги Д. Костадинов², Сергей А. Твердохлебов³

¹ФГБНУ СКНИИМЭСХ – Россия, e-mail: galagenn74@mail.ru

²ИПАЗР „Н. Пушкиarov“ – Болгария, e-mail: gdkostadinov@gmail.com

³ФБГОУ ВПО КубГАУ – Россия, e-mail: tsa200862@rambler.ru

Аннотация

В статье представлена методика исследования параметров почвообрабатывающих машин на основе реологии. Установлено, что почва имеет вязкоупругие свойства. Приведён пример обоснования параметров рабочих органов.

Ключевые слова: реология; почвообрабатывающие машины; параметры; вязкоупругие свойства

Substantiation of the Parameters of Tillage Machinery on the Basis of Rheology

Galina G. Parkhomenko¹, Georgi D. Kostadinov², Sergey A. Tverdohlebov³

¹SKNIIMESKH – Russia, e-mail: galagenn74@mail.ru

²ISSAPP „N. Pushkarov“ – Bulgaria, e-mail: gdkostadinov@gmail.com

³KubGAU – Russia, e-mail: tsa200862@rambler.ru

Abstract

The article presents a method of study parameters of tillage machinery on the basis of rheology. It was found that the soil has viscoelastic properties. Presented an example to substantiate the parameters is.

Key words: rheology; tillage machinery; parameters; viscoelastic properties

Обычно при моделировании процесса взаимодействия рабочих органов с почвой проводят силовой анализ и рассматривают напряжённое состояние пласта на основании основных положений теории упругости и механики сплошных сред (Пархоменко и др., 2003; Пархоменко и др., 2005; Пархоменко и Пархоменко, 2016). В основу теории упругости

заложено допущение об однородности, в котором микро- и макроагрегаты равномерно и сплошно заполняют весь объём, что абсолютно не соответствует структуре пласта почвы. Процесс воздействия рабочих органов на почву необходимо рассматривать на основании реологии.

Для исследования напряжений и деформаций

почвы разработано много реологических моделей. Существующие модели взаимодействия рабочих органов со средой можно разделить на три группы:

- почва – твердое тело;
- почва – вязкоупругая среда (Telichenko et al., 2016; Qin et al., 2014; Xie et al., 2004);
- почва – сплошная несжимаемая сыпучая среда.

Исследования показали, что взаимодействие рабочих органов с почвой в условиях недостаточного увлажнения необходимо рассматривать как процесс деформирования вязкоупругого основания (Пархоменко и Щириков, 2005, Пархоменко и Щириков, 2007; Щириков и Пархоменко, 2007; Пархоменко, 2014а, 2014б, 2014с). Эта модель подтверждена исследованиями Золотаревской (2004, 2013, 2016а, 2016б), свидетельствующими о наличии у уплотненной почвы вязкоупругих свойств.

Материалы и методы

Соотношения между напряжениями и деформациями для вязкоупругих материалов обычно формулируются с использованием функции ползучести, которая определяет деформацию почвы при приложении единичного ступенчатого воздействия (напряжения) или с использованием функции релаксации, выражающей изменение напряжения (Джонсон, 1989). Сложное напряженное состояние пласта при воздействии на него рабочего органа задают двумя независимыми функциями, определяющими поведение почвы при сдвиговой и объёмной деформациях. Эти функции соответствуют модулю сдвига и объёмному модулю (модулю деформации) для идеально упругих материалов.

Исследования (Кушнарёв, 1987) показали, что при изучении взаимодействия большинства рабочих органов с почвой, достаточно рассматривать уравнение напряженного состояния пласта почвы только при объёмных деформациях и использовать модель Максвелла. При этом предполагают, что ни в одной точке пространства перед рабочим органом касательные

напряжения не превышают предельных, иначе происходит сдвиг почвы и образуется призма волочения.

Модель Максвелла представляет почву как вязкоупругую среду установившейся ползучести и изображает её в виде последовательно соединенных пружины (жесткости E) с демпфером (вязкости μ). Представление почвы как сочетания упругих (E) и вязких (μ) элементов приводит к дифференциальным зависимостям, характеризующим для упругого элемента закон Гука $\sigma = E\varepsilon$, а для вязкого – закон Ньютона ($\dot{\sigma} = \mu\dot{\varepsilon}$) (Работнов, 1966).

Уравнение напряженного состояния пласта почвы получили из общего уравнения линейной вязкости (Рейнер, 1965), которое имеет вид:

$$-\dot{\tau}_c + \sigma + T\dot{\sigma} = G\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon}; \quad (1)$$

$$T = \mu/E \quad (2)$$

T – длительность релаксации, s ;

G – модуль сдвига, Pa .

Для модели Максвелла $\tau_c = G = 0$ (деформации сдвига отсутствуют) и тогда:

$$\sigma + T\dot{\sigma} = \mu\dot{\varepsilon} \quad (3)$$

Релаксацию напряжений определяют соотношением:

$$\psi(t) = E \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad (4)$$

Результаты и обсуждения

В качестве примера осуществим расстановку рабочих органов в продольном направлении при проектировании почвообрабатывающего агрегата с учётом реологических свойств среды (длительности релаксации напряжений пласта).

В общем случае систему „почвообрабатывающий агрегат” можно представить в виде трёх подсистем:

- I - для поверхностного рыхления (диски);
- II - для мелкой и глубокой обработки (лапы с долотом);
- III - для уплотнения и выравнивания (катки).

Мелкая и глубокая обработка почвы блоком II осуществляется после завершения релаксации и процесса снятия внутренних напряжений пласта, подрезанного блоком I. Далее по истечении релаксации пласта, обработанного блоком II, осуществляется уплотнение и выравнивание поверхности почвы блоком III.

Если расстановка блоков осуществлена без учёта длительности релаксации пласта, почвообрабатывающий агрегат не обеспечит требуемых качественных показателей технологического процесса и характеризуется повышенной энергоёмкостью вследствие образования призмы волочения из уплотнённой почвы перед рабочими органами.

По заданной скорости агрегата V с учётом длительности релаксации расстояние между блоками рабочих органов в продольном направлении L можно определить по формуле:

$$L = V \cdot T \quad (5)$$

Подставив выражение для определения времени релаксации (2) в формулу (5), получили:

$$L = V \cdot \mu / E, \quad (6)$$

где L – расстояние между блоками рабочих органов в продольном направлении, м;
 m – коэффициент вязкости почвы, кПа·с.

Приведён модуль деформации легкоглинистой почвы, который в среднем составляет $E=58$ кПа, (Голубев, 2004). Проведены исследования по изменению реологических свойств почвы (Смирнов, 1982) от влажности (табл. 1).

Анализ данных Таблицы 1 показал, что с увеличением гигроскопической влажности с 8 до 14% коэффициент вязкости легкоглинистой почвы сначала возрастает с 12,2 до 16,3 кПа·с, а начиная с 12%, снижается до 8,2 кПа·с. Модуль деформации, напротив, во всем диапазоне увеличения гигроскопической влажности,

снижается с 62,5 кПа до 7,0 кПа.

Установлено (Ревут, 1960), что гигроскопическая влажность увеличивается с повышением влажности воздуха и понижением температуры. Однако величина гигроскопической влажности определяется не только влажностью воздуха, но и механическим составом почвы, в частности, содержанием глинистых частиц, а также физическими свойствами, определяющими её удельную поверхность. Известно, что чем выше дисперсность почвы, тем выше её удельная поверхность и гигроскопическая влажность увеличивается.

Поскольку гигроскопическая влажность чернозёмных почв не превышает 6,47-9,10% (Долгов, 1948), из Таблицы 1 выбрали для нормальных условий $E=62,5$ кПа, что практически совпадает с данными (Голубев, 2004): $E=58,7$ кПа и $m=12,5$ кПа·с.

При температуре окружающей среды около 34оС и низкой влажности воздуха мы получили данные для сухой почвы, представленной чернозёмом обыкновенным слабогумусным мощным легкоглинистым на лессовидных глинах, которые свидетельствуют о том, что гигроскопическая влажность в данных условиях не превышает 4,3-4,7% (табл. 2).

Путём интерполяции данных Таблицы 2 получили модуль деформации и коэффициент вязкости для засушливых условий: $E=93,7$ кПа и $m = 8,5$ кПа·с.

Рассчитав длительность релаксации и полученные данные для различных условий, свели результаты в таблицу 3.

Ранее при рассмотрении процесса взаимодействия рабочих органов для крошения глыб и выравнивания с почвой (Пархоменко и др., 2003; Пархоменко и др., 2005; Пархоменко и Щиров, 2007; Щиров и Пархоменко, 2007; Пархоменко и Семенихина, 2014а, 2014б), получена зависимость, характеризующая распределение контактных напряжений при качении катка по вязкоупругому основанию:

$$\sigma(x) = \frac{E}{R} e^{-\frac{x}{VT}} (x + VT) \quad (7)$$

Таблица 1. Реологические свойства легкоглинистой почвы**Table 1.** Rheological properties light loamy soil

Наименование показателя Name of index	Значение для гигроскопической влажности, % Value of hygroscopic moisture, %						
	8	9	10	11	12	13	14
Модуль деформации, кПа Deformation modulus, кПа	62,5	40,0	30,0	22,0	16,0	11,5	7,0
Коэффициент вязкости, кПа.с Coefficient of viscosity, кПа.с	12,5	13,2	15,0	16,3	16,0	12,5	8,2

Таблица 2. Физические свойства почвы**Table 2.** Physical properties of soil

Повторность Repetition	Глубина образца, см Depth of sample, cm	Гигроскопическая влажность, % Hygroscopic moisture, %	Плотность почвы, г/см ³ Soil density, g/cm ³	Плотность твёрдой фазы, г/см ³ Density of the solid phase, g/cm ³	Пористость, % Porosity, %	Твёрдость, МПа Hardness, MPa
Первая First	5-15	4,7	1,21	2,67	54,7	2,0
Вторая Second		4,6	1,20	2,68	55,2	1,9
Третья Third		4,7	1,16	2,69	56,9	2,0
Первая First	15-25	4,3	1,32	2,70	51,1	2,3
Вторая Second		4,4	1,33	2,69	50,6	2,4
Третья Third		4,4	1,38	2,68	48,5	2,4
Первая First	25-35	4,5	1,30	2,69	51,7	3,6
Вторая Second		4,7	1,35	2,69	49,8	3,4
Третья Third		4,6	1,32	2,67	50,6	3,5

Таблица 3. Реологические свойства чернозёма
Table 3. Rheological properties of chernozems

Наименование показателя Name of index	Значение для условий Value for conditions	
	Нормальных Normal	Засушливых Arid
Модуль деформации, кПа Deformation modulus, kPa	62,5	93,7
Коэффициент вязкости, кПа.с Coefficient of viscosity, kPa.s	12,5	8,5
Время релаксации, с Relaxation time, s	0,20	0,09

Таблица 4. Время контакта иглы с почвой, с
Table 4. Time of contact of the needle with the soil, s

t, s		Скорость агрегата, м/с Working speed, m/s				
		2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Радиус рабочего органа, м Radius of working body, m	0,1	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07
	0,2	0,19	0,15	0,12	0,11	0,09
	0,3	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11

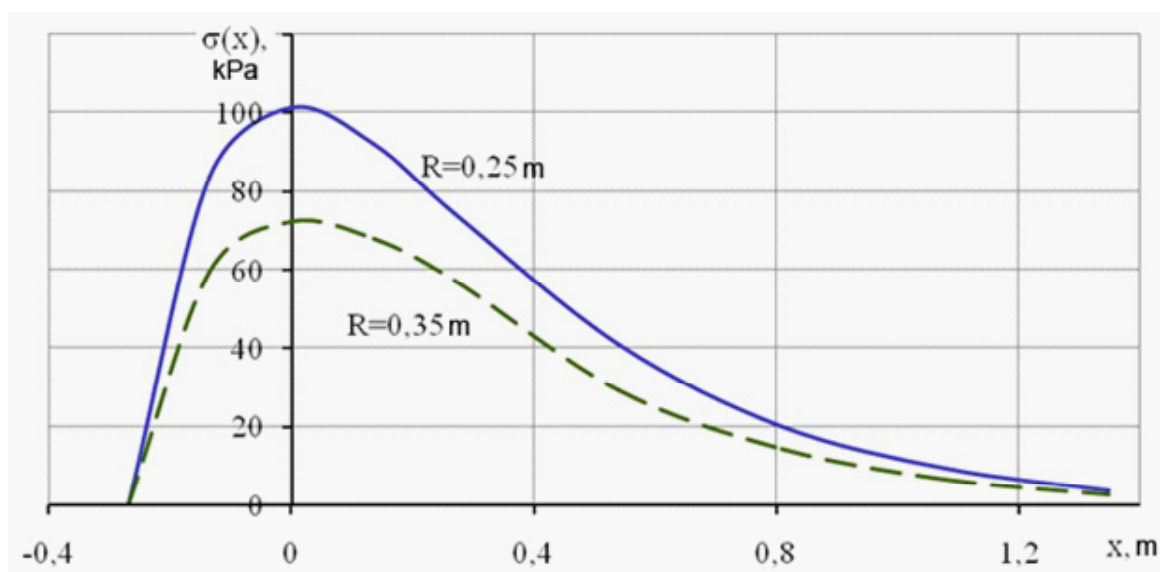


Рис. 1. Распределение напряжений в почве
Fig. 1. Stress distribution in soil

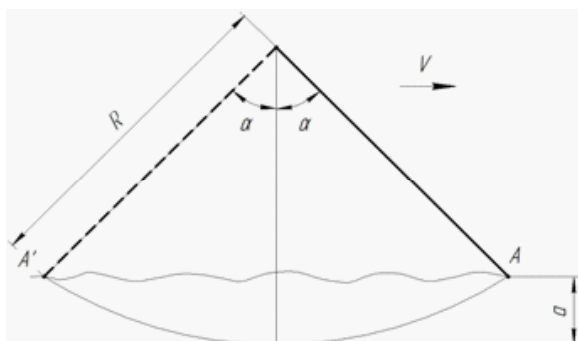


Рис. 2. Схема к определению параметров ротационного рабочего органа
Fig. 2. Scheme for determining parameters of rotary working body

Используя данные таблицы 3, определили область распределения напряжений контактного взаимодействия рабочего органа с почвой для засушливых условий, представив графически зависимость (7) для различных радиусов катка (рис. 1).

Анализируя полученные данные (Рис. 1), следует отметить, что точка прекращения контакта катка с почвой расположена дальше от \max напряжений, чем точка начала контакта, то есть график распределения напряжений асимметричен. Это совпадает предположением о проведении вязкоупругих материалов при контакте качения.

При качении рабочего органа происходит деформация почвы, в результате которой возникает напряжение $\sigma(x)$, стремящееся за счёт упругих свойств восстановить прежнюю форму пласта (отрицательные значения аргумента на рис. 1).

При напряженном состоянии пласта происходит качественный переход от развития деформации с изменением объёма к развитию без изменения последнего, характеризующим разрушение крупных глыб на более мелкие с уплотнением и выравниванием верхнего слоя.

Достигнув наибольшего значения при развитии деформации, почва за счёт вязкости пласта проявляет свойство релаксации, обуславливающее снижение напряжений, то есть наблюдается последствие нагружения (положительные значения аргумента на рис. 1). Релаксация пласта протекает медленнее, чем

сжатие, что сказывается на асимметричности области контактного взаимодействия рабочего органа с почвой, представленной площадью под кривой $f=\sigma(x)$ и ограниченной осью абсцисс (рис. 1), то есть длительность последствия превышает длительность нагружения.

Длительность последствия возрастает с увеличением влажности почвы. Расчёты показали, что для нормальных условий (табл. 3), протяжённость распространения напряжений контактного взаимодействия рабочего органа с почвой в продольном направлении внутри пласта до 2 раз больше, чем для засушливых условий (рис. 1), при равных скоростях движения агрегата, независимо от диаметра катка.

Параметры катка оказывают непосредственное влияние на величину напряжений, а точки начала и прекращения контакта определяются реологическими свойствами почвы.

Наибольшее напряжение $\sigma(x)=\max$ должно превышать предел прочности (временное сопротивление сжатию) почвы, иначе не будут разрушаться межагрегатные связи внутри обрабатываемого пласта и крошение не достигнет требуемого качества, а каток будет лишь уплотнять поверхностный слой. Предел прочности для глинистого чернозёма для засушливых условий составляет 93-98 кПа (Цимбал, 1976).

Исходя из вышеизложенного, целесообразно выбирать диаметр катка не более 0,5 м ($R=0,25$ м на Рис. 1), устанавливая его на расстоянии в продольном направлении от блока лаповых рабочих органов не менее, чем $L=0,26$ м.

При наличии нескольких катков в конструкции почвообрабатывающего агрегата нужно учитывать следующее. Точки начала контакта второго и последующего катков с почвой должны находиться в области контактных напряжений от воздействия первого (0,10 м по Рис. 1), т. е. до завершения релаксации пласта, что позволяет проявляться синергизму эффектов от различного характера взаимодействия элементов ротационных рабочих органов с обрабатываемой средой и приводит к улучшению качественных показателей технологического процесса.

Другой пример раскрывает взаимосвязь

параметров и режимов функционирования ротационного рабочего органа с реологическими свойствами почвы на уровне подсистемы.

Известно, что затраты энергии на обработку почвы пропорциональны длине дуги резания, определяемой глубиной рыхления и радиусом ротационного рабочего органа.

Длина дуги в $2\alpha^{\circ}$ математически может быть выражена как часть окружности по концам игл (рис. 2) следующим образом:

$$\cup AA' = \pi \cdot R \cdot \frac{2\alpha}{180} = \pi \cdot R \cdot \frac{\alpha}{90}, \quad (8)$$

Угол 2α определяет область, в которой иглы погружены в почву, а – глубина рыхления, R – радиус по концам игл ротационного рабочего органа.

Из анализа Рис. 2 следует

$$\cos \alpha = \frac{R-a}{R}, \quad (9)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right), \quad (10)$$

Определим длину дуги резания ротационного рабочего органа:

$$\cup AA' = \frac{\pi}{90} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right), \quad (11)$$

Из анализа формулы (11) следует, что с увеличением глубины и радиуса рабочего органа длина дуги резания увеличивается, следовательно, возрастают затраты энергии на обработку почвы.

Параметры ротационного рабочего органа оказывают влияние не только на энергетические, но и на качественные показатели технологического процесса поверхностной обработки почвы. Качество рыхления зависит от времени контакта иглы ротационного рабочего органа с почвой. Игла находится в контакте с почвой от ее соприкосновения (точка А на Рис. 2) до

полного выхода (точка А/), то есть пока ротор повернется на угол 2α .

Таким образом, время контакта иглы с почвой:

$$t = \frac{\cup AA'}{V}, \quad (12)$$

$$t = \frac{\pi}{90 \cdot V} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right), \quad (13)$$

Увеличение скорости движения агрегата приводит к уменьшению времени контакта игл с почвой, что следует из анализа выражения (13).

С увеличением скорости агрегата изменяется характер взаимодействия иглы с почвой, который становится колебательным с более высокой частотой, то есть вибрационным ударного действия. При этом время контакта иглы с почвой может стать меньше длительности релаксации напряжений. В этом случае почва, под действием потенциальной энергии упругих деформаций, лишь частично и неравномерно восстанавливает равновесное состояние выравниванием напряжений за время контакта с иглой ротационного рабочего органа, а обработанный фон характеризуется повышенной вспушенностью и гребнистостью. Для выравнивания фона требуются дополнительные затраты энергии. Таким образом, должно соблюдаться условие:

$$t \geq T, \quad (14)$$

Подставим в формулу (14) выражение (2) для определения времени релаксации почвы:

$$t \geq \frac{\mu}{E}, \quad (15)$$

Объединив формулы, получим условие (16) для выбора параметров и режимов функционирования ротационного рабочего органа, обеспечивающего выполнение качественных показателей технологического процесса поверхностной обработки почвы при минимальных затратах

$$\frac{\pi}{90 \cdot V} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-a}{R}\right) \geq \frac{\mu}{E} \quad (16)$$

Для почвы, представленной чернозёмом обыкновенным слабогумусным мощным легкоглинистым на лессовидных глинах, длительность релаксации напряжений составляет $T=0,09$ s (Пархоменко, 2013, 2015; Пархоменко и Семенихина, 2014а, 2014b); глубина поверхностного рыхления (ГОСТ 16265-89) до 8 см то есть $a=0,08$ m. Принимаем диапазон изменения показателей: скорости агрегата $V=2-4$ m/s; радиуса рабочего органа $R=0,1-0,3$ m.

Результаты расчёта приведены в таблице 4.

Анализ данных табл. 4 свидетельствует о том, что при малом радиусе роторного рабочего органа (0,1 m) повышение скорости агрегата свыше 3,0 m/s приводит к ухудшению качественных показателей технологического процесса поверхностного рыхления, поскольку время контакта иглы с почвой меньше времени релаксации напряжений пласта (0,09 s).

Поскольку с увеличением радиуса роторного рабочего органа возрастают затраты энергии на поверхностную обработку почвы (удлинится дуга резания), а уменьшение скорости приводит к снижению производительности агрегата, выбираем $R=0,1-0,2$ m; $V=3,0-3,5$ m/s для полевых условий функционирования.

Выводы

- Процесс воздействия рабочих органов на почву необходимо рассматривать на основании реологии, анализируя процесс деформирования вязкоупругого основания.

- Без учёта длительности релаксации пласта почвообрабатывающий агрегат не обеспечит требуемых качественных показателей технологического процесса и характеризуется повышенной энергоёмкостью.

- Улучшение качественных и энергетических показателей технологического процесса обработки почвы осуществляется за счёт синергизма эффектов от различного характера взаимодействия элементов рабочих органов с обрабатываемой средой с вязкоупругими свойствами.

Литература

Голубев, В. В. (2004). Обоснования параметров и режимов работы почвообрабатывающего катка для предпосевной обработки почвы под мелкосеменные культуры: Автореф. дис. канд. техн. наук., Москва.

Джонсон, К. (1989). Механика контактного взаимодействия. Москва: Мир.

Долгов, С. И. (1948). Исследование подвижности почвенной влаги и её доступности для растений. Москва: Издательство АН СССР.

Золотаревская, Д. И. (2004). Изменение сопротивления качению, реологических свойств и плотности почвы под воздействием колес. Тракторы и сельхозмашины, 2, 22-25.

Золотаревская, Д. И. (2013). Обоснование и экспериментальное подтверждение математических моделей закономерностей деформирования вязкоупругих почв. *Международный журнал экспериментального образования*, 3, 72-76.

Золотаревская, Д. И. (2016а). Исследование и расчет уплотнения почвы при работе и после остановки колесного трактора. *Тракторы и сельхозмашины*, 8, 33-38.

Золотаревская, Д. И. (2016б). Метод расчёта показателей напряжённо-деформированного состояния и уплотнения почвы при работе и после остановки колёсного трактора. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 7-5, 754-763.

Кушнарёв, А. С. (1987). Механика почв: задачи и состояние работ. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, 3, 9-13.

Пархоменко, Г. Г. (2013). Трансформация рабочих органов почвообрабатывающих машин для глубокого рыхления. В: *Инновационные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в Нечерноземье. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Владимир*, 335-340.

Пархоменко, Г. Г. (2014а). Исследование ротационного рабочего органа для обработки почвы в рядах многолетних

насаждений. *Сельскохозяйственная техника*, 3-4, 59-66.

Пархоменко, Г. Г. (2014b). Исследование чизеля: Сравнительная оценка рабочих органов. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

Пархоменко, Г. Г. (2014c). Расстановка рабочих органов комбинированных агрегатов с учетом реологических свойств почвы. В: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Материалы 7-й международной научно-практической конференции в рамках 17-й международной агропромышленной выставки „Интерагромаш-2014”. Ростов-на-Дону, 43-45.

Пархоменко, Г. Г. (2015). Трансформация рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Сельскохозяйственная техника*, 52(1), 17-26.

Пархоменко, Г. Г., Семенихина, Ю. А. (2014a). Выбор параметров ротационных рабочих органов для обработки почвы в засушливых условиях. В.: Инновационные технологии в науке и образовании „ИТНО – 2014”. Сборник науч. тр. международной научно-методической конференции. Ростов-на-Дону – Черноград – Дивноморское, 334-337.

Пархоменко, Г. Г., Семенихина, Ю. А. (2014b). Инновационный метод разработки ротационных рабочих органов для обработки почвы в засушливых условиях. В: Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве. Материалы Международной научно-практической конференции. Минск, 247-250.

Пархоменко, Г. Г., Щиров, В. Н. (2005). Взаимодействие раздельно-кольчатых катков с почвой. В: Разработка новых южнороссийских технологий и технической базы для возделывания зерновых в зоне засушливого земледелия. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. Черноград, 21-31.

Пархоменко, Г. Г., Щиров, В. Н. (2007). Расчёт взаимодействия катка с почвой с использованием теории вязкоупругости. *Тракторы и сельхозмашины*, 10, 16-18.

Пархоменко, С. Г., Пархоменко, Г. Г. (2016). Параметрическая оптимизация комбинированной следяще-силовой системы автоматического регулирования пахотного агрегата. В: Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства. Сборник научных докладов Международной научно-практической конференции. Тамбов, 18-22.

Пархоменко, Г. С., Пархоменко, С. Г., Пархоменко, Г. Г. (2003). Анализ рабочих режимов и расчёт на ПЭВМ состава тяговых машинно-тракторных агрегатов. В: Материалы XLII Международной научно-технической конференции ФГОУ ВПО “Челябинский государственный агроинженерный университет”. Ч. 2. Челябинск, 315-320.

Пархоменко, Г. С., Пархоменко, С. Г., Пархоменко, Г. Г. (2005). Расчёт в MATHCAD рабочих режимов

тягово-приводных машинно-тракторных агрегатов. В: Достижения науки – агропромышленному производству. XLIV Междунар. научно-техн. конф. ФГОУ ВПО “Челябинский государственный агроинженерный университет”. Ч. 2. Челябинск, 271-275.

Работнов, Ю. Н. (1966). Ползучесть элементов конструкции. Москва: Наука.

Ревут, И. Б. (1960). Физика в земледелии. Москва-Ленинград: Физматиздат.

Рейнер М. (1965). Реология. Москва: Наука.

Смирнов, В. Д. (1982). Определение реологических свойств почв. В: Проблемы снижения уплотняющего воздействия на почву ходовых систем трактора, мобильной сельскохозяйственной техники и рабочих органов почвообрабатывающих машин: Сборник научных трудов/ УСХА. Киев, 167-174.

Цимбал, А. Г. (1976). Исследование механической прочности почвы. В: Исследование и изыскание новых рабочих органов сельскохозяйственных машин. Москва: Колос, с. 54-60.

Щиров, В. Н., Пархоменко, Г. Г. (2007). Определение напряжения в вязкоупругом основании при качении жёсткого цилиндра. В: Совершенствование конструкций и повышение эффективности функционирования колёсных и гусеничных машин в АПК. Сборник научных трудов/ АЧГАА. Черноград, 132-140.

Telichenko, V., Ter-Martirosyan, A., & Sidorov, V. (2016). The Rate of the Pile Settlement in Clay Soil with Regard to its Visco-elastic and Elastic-plastic Properties. *Procedia Engineering*, 165, 1359-1366.

Qin, A., Sun, D. A., & Zhang, J. (2014). Semi-analytical solution to one-dimensional consolidation for viscoelastic unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, 62, 110-117.

Xie, K. H., Liu, G. B., & Shi, Z. Y. (2004). Dynamic response of partially sealed circular tunnel in viscoelastic saturated soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(12), 1003-1011.