

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.431

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-26-32

**Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений***Левшин Александр Григорьевич*<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, профессор*<sup>1</sup>alevshin@rgau-msha.ru<sup>✉</sup>; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>*Гаспарян Ирина Николаевна*, *д-р с.-х. наук, доцент, главный научный сотрудник*<sup>2</sup>irina150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>*Голубев Иван Григорьевич*, *д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом*<sup>3</sup>golubev@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380><sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Прянишникова, 31<sup>3</sup> Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса; 141261, Российская Федерация, Московская область, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

**Аннотация.** Проблема поиска оптимального соотношения массы, мощности и рабочей скорости была и остается актуальной задачей со времен формирования основ земледельческой механики. Концепция развития, направленная на повышение производительности и рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов, привела к росту единичной мощности и увеличению массы машин. Анализ тенденций развития тракторов и самоходных машин показал ежегодное увеличение средней мощности вновь созданных тракторов на 2...4 л.с. Реализация потенциала техники повышенной энергонасыщенности возможна за счет дополнительного роста массы машин, увеличивающего уплотнение почвы. Критические напряжения, достигающие значительной глубины, не способствуют процессу полной релаксации почвы. В необрабатываемом слое формируется почвенный горизонт от 25...30 до 100...120 см (с твердостью, соответствующей глиняной укатанной дороге), ограничивающий зону развития корневой системы растений и нарушающий фильтрацию почвы. Интенсивное использование энергонасыщенных агрегатов и самоходных машин привело к накопленному переуплотнению необрабатываемого слоя более 60% пахотных земель. Переуплотнение почвы по следу колес приводит к снижению урожайности зерновых культур на 10% и корнеклубнеплодов на 20%. При модернизации или создании новых образцов машин предлагаем в технико-экономическом обосновании учитывать негативные экологические последствия применения агрегатов и переработать нормативно-методические документы по оценке удельных давлений на почву движителей самоходных машин. Необходимо снижать машинную нагрузку на почву, применяя машины меньшей массы и реализуя мероприятия по разуплотнению подпочвенного горизонта. Следует обосновать параметры и создать линейку роботизированных энергетических систем, комплекс рабочего оборудования и систему управления на принципах мультиагентного управления ансамблями динамических объектов применительно к сельскохозяйственному производству.

**Ключевые слова:** уплотнение почвы, мощность двигателя, давление ходовых систем, масса машин, смещение грунта, буксование

**Формат цитирования:** Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г. Развитие мобильной энергетики с учётом агротехнологических ограничений // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 26-32. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-26-32>.

© Левшин А.Г., Гаспарян И.Н., Голубев И.Г., 2023

## ORIGINAL ARTICLE

## Development of mobile power production taking into account agrotechnological limitations

*Aleksandr G. Levshin*<sup>✉</sup>, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

alevshin@rgau-msha.ru<sup>✉</sup>; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

*Irina N. Gasparyan*, DSc (Agr), Associate Professor, Chief Researcher<sup>2</sup>

irina150170@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>

*Ivan G. Golubev*, DSc (Eng), Professor, Head of Department<sup>3</sup>

golubev@rosinformagrotech.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov; 31, Pryanishnikova Str., Moscow, 127434, Russian Federation

<sup>3</sup>Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Sector; 60 Lesnaya Str., Pravdinsky Settlement, Moscow region, 141261, Russian Federation

**Abstract.** The problem of finding the optimal ratio of mass, power, and working speed has been and remains an urgent task since laying the groundwork of agricultural mechanics. The concept of development aimed at increasing the productivity and operating speeds of machine-tractor units, has led to an increase in unit power and the mass of machines. An analysis of the development trends of tractors and self-propelled machines showed an annual increase in the average power of newly designed tractors by 2 to 4 hp. Capacity implementation of equipment with increased energy saturation is possible due to an additional increase in the mass of machines, which results in increased soil compaction. Critical stresses reaching a significant depth do not contribute to the process of complete relaxation of the soil. In the uncultivated layer, a soil horizon is formed between 25 to 30 and 100 to 120 cm (with a hardness corresponding to a clay rolled road), limiting the development zone of the plant root system and disturbing soil filtration. The intensive use of energy-saturated units and self-propelled machines has led to the accumulated overconsolidation of the uncultivated layer of more than 60% of arable land. Soil overconsolidation along the wheel track leads to a decrease in the yield of grain crops by 10% and root crops by 20%. When modernizing or designing new models of machines, we suggest taking into account the negative environmental consequences of the use of units in the feasibility study and reworking the regulatory and methodological documents for assessing the specific pressures on the soil of the running gear parts of self-propelled machines. It is necessary to reduce the machine load on the soil by using smaller machines and by implementing measures to loosen the subsoil horizon. Equally important is to determine the parameters and design a line of robotic energy systems, a set of working equipment and a control system based on the principles of multi-agent control of sets of dynamic objects in relation to agricultural production.

**Keywords:** soil consolidation, engine power, undercarriage system pressure, machine weight, soil displacement, slipping

**For citation:** Levshin A.G., Gasparyan I.N., Golubev I.G. Development of mobile power production taking into account agrotechnological limitations. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):26-32. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-26-32>.

**Введение.** Для создания оптимальной структуры пахотного слоя на практике применялась многократная обработка почвы включая лемешную вспашку и 2-3-кратную культивацию и боронование. Вспашка на постоянную глубину привела к появлению «плужной подошвы» – уплотненного подпахотного горизонта.

Следует отметить, что собственные колебания машин способствуют увеличению уплотнения почвы. Несущая способность почвы существенно снижается при повышенной влажности. Изменение фактора структурности почвы увеличивается в слое 20...30 см

до 86,3...97,2% и остается постоянной до глубины 100 см [1]. При типовой технологии уплотняется от 87,5 до 95,3% всей поверхности поля, при минимальной обработке – около 72,8%, а при безотвальной – 55,7% [2]. По данным Евростата, наиболее распространенной является традиционная технология, включающая в себя вспашку 74%, 22% пахотных земель обрабатываются по минимальной технологии, и только 4% – по технологии no-till [3].

Деграция плодородного слоя является следствием применения техники, обладающей большой массой. Увеличению уплотнения способствует

и величина тяговой нагрузки, преодолеваемой трактором. Сформированный уплотненный слой почвы нарушает водно-воздушный режим в почве, препятствует проникновению корневой системы и ограничивает зону ее развития. По данным В.С. Kellera [3], в Дании по причине уплотнения почвы ходовыми системами к 2010 г. плотность почвы в подпахотном горизонте увеличилась по сравнению с 1960 г. на 0,2...0,3  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , скорость роста корней уменьшилась с 40 до 20  $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$  (рис. 1) [3].

Современные теория и практика использования колесных и гусеничных машин сформировали систему агротехнических ограничений для снижения негативного воздействия на экосреду, учитывающую:

- удельное давление с учетом влажности почвы и сезона использования;
- величину буксования ходовых систем;
- диапазон рабочих скоростей;
- ширину колес, технологической колеи и агротехнической проходимости. Однако ввиду несовершенства методик, их обоснования и отсутствия государственного контроля за их соблюдением проблема переуплотнения почвы остается актуальной.

Ограничение негативного воздействия на экосреду удельного давления с учетом влажности, типа почвы и сезона использования определено ГОСТ 26955-86<sup>1</sup>. По принятой методике определяют статическую нагрузку на колесо, площадь контакта на твердом основании и корректируют ее для почвенного фона

обобщенным коэффициентом, зависящим от диаметра колеса. При этом не учитывается динамическая догрузка колес, что в итоге дает заниженное значение удельного давления на почву. Методика оценки требует доработки.

При недостатке влаги и уменьшении глубины промерзания по причине потепления климата естественный процесс разуплотнения не позволяет восстановить структуру почвы. Повышенная твердость затрудняет проникновение корней культурных растений, ограничивает зону их развития, что исключает биологические процессы восстановления структуры почвы.

Технологии механизированных процессов разуплотнения почвы являются высокоэнергоемкими. Энергоемкость чизельной обработки почвы на глубину до 40...45 см требует в 1,2...1,5 раза больше энергии, чем вспашка на глубину пахотного слоя 25...30 см. Технологии и машины для большей глубины на рынке практически отсутствуют.

Несбалансированное увеличение единичной мощности трактора приводит к увеличению буксования. В процессе буксования происходит разрушение структуры почвы с образованием пылевидных частиц. В качестве допустимого принимают буксование при тяговом усилии, соответствующем максимуму тяговой мощности. В качестве ограничений рекомендуют буксование на уровне 16, 18 и 7% соответственно для тракторов типа 4×2, 4×4 и гусеничного трактора<sup>2</sup>.

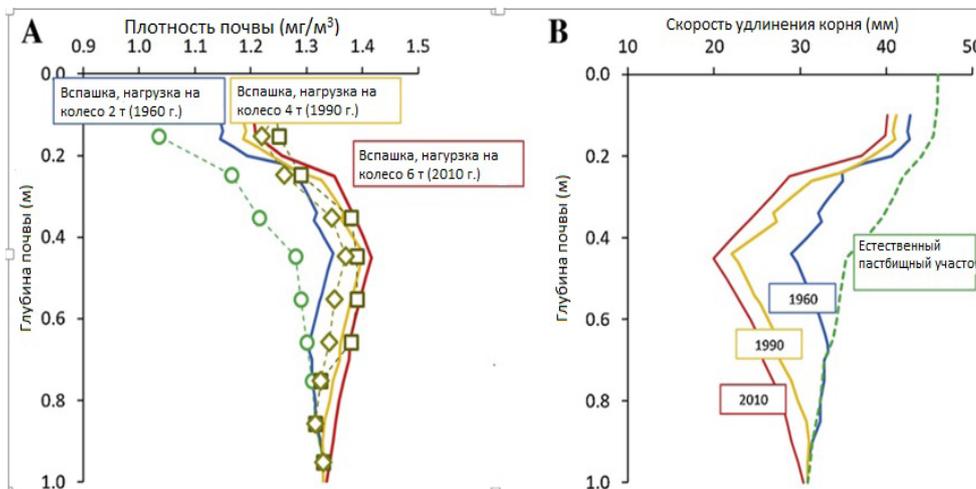


Рис. 1. Изменение насыпной плотности в пахотной почве,  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (А), скорость удлинения корней,  $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$  (В) при нагрузке на колесо:

— 2 Mg (с 1960 г.); — 4 Mg (с 1990 г.), — 6 Mg (с 2010 г.); ---- начальные условия;  $\diamond$  – 1967 г.;  $\square$  – 1982 г.

Fig. 1. Change in bulk density of arable soil,  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (A); root elongation rate,  $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$  (V) under load on the wheel: — 2 Mg (since 1960); — 4 Mg (since 1990), — 6 Mg (since 2010); ---- initial conditions;  $\diamond$  – 1967;  $\square$  – 1982

<sup>1</sup> ГОСТ 26955-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву (Agricultural mobile machinery. Rates of force produced by propelling agents on soil): Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов, 1986.

<sup>2</sup> Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: БИБИКОМ; ТРАНСЛОГ, 2017. 478 с.

Однако уже при буксовании колесного трактора более 6...7% в 2 раза увеличивается количество частиц менее 0,5 мм [4]. Снижение буксования за счет балластирования приведет к увеличению уплотнения почвы.

Повышение производительности и снижение затрат труда требуют увеличения мощности энергетических средств. Однако при этом для реализации тягового потенциала трактора вынуждены увеличивать его массу или применять технические решения по увеличению сцепного веса за счет балластирования, гидравлического или позиционного догрузателя, что приводит к увеличению уплотнения почвы и ее дальнейшей деградации. Возникает противоречие между тенденцией развития техники и требованиями агротехники.

Помимо экологического ущерба, проблема имеет серьезный экономический ущерб, вызванный снижением урожайности порядка 30%. Об этом свидетельствуют данные исследований более чем в 40 странах мира. В Российской Федерации ежегодный недобор урожая зерновых культур<sup>3</sup> составляет 13...15 млн т [5].

**Цель исследований:** анализ противоречий между тенденцией развития тракторов и самоходных машин и агротехнологическими требованиями к производственным процессам с учетом почвенных и производственных условий.

**Материалы и методы.** Материалами исследований направлений развития тракторов и самоходных машин послужили данные автоматизированной справочной системы «Сельхозтехника»<sup>4</sup>. Анализ современных технологий обработки почвы проведен согласно данным агротехнической оценки по ГОСТ 33736-2016 «Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний» и ГОСТ 33687-2015 «Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний». Определение энергетических показателей осуществлялось по ГОСТ Р 52777-2007 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки». Оценка условий испытаний осуществлялась по ГОСТ 20915-2011 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний».

<sup>3</sup> Гостев А.В., Плотников В.А., Нитченко Л.Б. Уплотнение почвы движителями мобильных сельскохозяйственных машин и меры по ее снижению: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Экологизация земледелия и оптимизация агроландшафтов» (г. Курск, ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 10-12 сентября 2014 г.). Курск, 2014. С. 72-76.

<sup>4</sup> Автоматизированная справочная система «Сельхозтехника». [Электронный ресурс]. URL: [www.agrobase.ru](http://www.agrobase.ru) (дата обращения: 12.03.2021).

**Результаты и их обсуждение.** С момента создания самоходных машин остается актуальным вопрос оптимальных соотношений мощности, массы и рабочей скорости [6]. Потенциальная производительность машинно-тракторного агрегата зависит от мощности двигателя. Мощность самого массового универсально-пропашного трактора класса 1,4 семейства «Беларус» увеличилась с 20,0 кВт (МТЗ-2, 1956 г.) до 59,6 кВт (МТЗ-920, 2000 г.) в 3 раза; масса МТЗ-920 достигла 4100 кг (с возможностью увеличения до 7000 кг). Энергонасыщенность увеличилась с 6,2 кВт·т<sup>-1</sup> (1956 г.) до 19,7 кВт·т<sup>-1</sup> (2000 г.).

Эксплуатационная масса колесных тракторов класса 8 достигает 29937 кг (Steiger 550), 24490 кг (New Holland N9040), и при этом грузоподъемность навесной системы<sup>4</sup> достигает 8000...9000 кг. Кроме этого догрузка задних колес до 15% происходит и за счет тягового усилия. При общепринятой развесовке тракторов новой компоновки (передняя ось – 60% и задняя ось – 40%) происходит в процессе работы выравнивание нагрузки по осям. С учетом этого нагрузка на колесо у трактора Steiger 550 может достигать 64,22 кН. Распределение существующих (выборка 1341) моделей тракторов по массе приведены на рисунке 2. Средний вес составляет 5,325 тонн.

Уплотняющее воздействие тракторов класса 1,4 и 3 распространяется на глубину 45...50 см, класса 4 – до 50...70 см, а класса 5 – на глубину до 1...1,2 м. Для 4 и 5 классов плотность увеличивается до 1,35...1,45 г·см<sup>-3</sup>, пористость уменьшается на 23...25%, урожайность снижается с 20 до 40%<sup>3</sup>.

Мощность двигателя самоходных комбайнов за 30 лет увеличилась в 3,6 раза (СК-3, 1958 г., мощность 47,8 кВт, масса 6040 кг; Дон-1500, 1985 г., мощность 172,8 кВт, масса 13440 кг). Мощность современных зерноуборочных комбайнов<sup>4</sup> увеличилась до 400...405 кВт (New Holland CX 9090, масса 16700 кг, объем бункера – 12,5 м<sup>3</sup>; John Deere S690, масса 21650 кг, объем бункера – 14,1 м<sup>3</sup>). Полная масса комбайна включает в себя массу комбайна с жаткой и массу зерна в заполненном бункере. Распределение полной массы зерноуборочных комбайнов существующих моделей (выборка 53 модели) представлена на рисунке 3. Среднее значение полной массы для равно 20,14 тонны.

Мощность двигателей кормоуборочных комбайнов достигает 720 кВт (Big X). Соответственно увеличилась и их масса. Распределение массы самоходных кормоуборочных комбайнов (выборка 48 моделей) приведена на рисунке 4. Средняя масса самоходных кормоуборочных комбайнов достигла 11,67 тонн.

В исследованиях, проведенных А. Траутнер в Шведском аграрном университете Упсала, представлены

данные по величине вертикальных напряжений в почве при качении колеса с вертикальной нагрузкой 7 Мг на глубине 0,3; 0,5; 0,7 м для 5 почвенных фонов. В самый напряженный период полевых работ на почвах, содержащих глину (400...543 г/кг) и ил (386...469 г/кг), напряжения на глубине 0,3 м составляли 610 кПа (август) и 1245 кПа (сентябрь); на глубине 0,5 м – соответственно 653 кПа и 550 кПа; на глубине 0,7 м – 582 кПа и 944 кПа<sup>5</sup>.

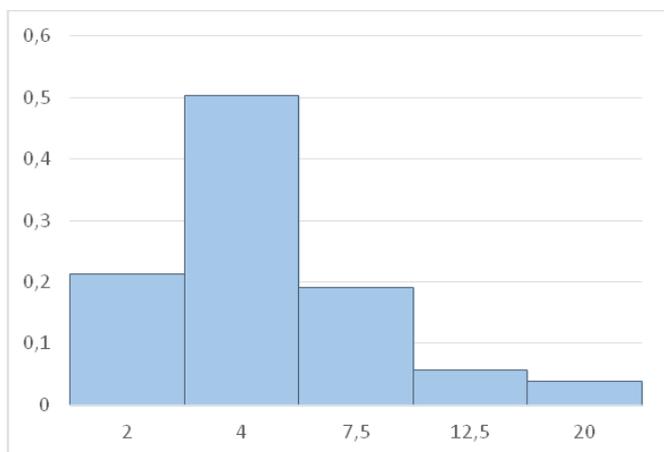
В осенний период при влажности 0,6...0,7 НВ допустимые нормальные напряжения по ГОСТ 26955-86 должны составлять не более 35 кПа, что в 15...18 раз меньше реальных значений.

В исследованиях<sup>7</sup> рассмотрен процесс деформации почвы при движении колеса (рис. 5). Вертикальное сме-

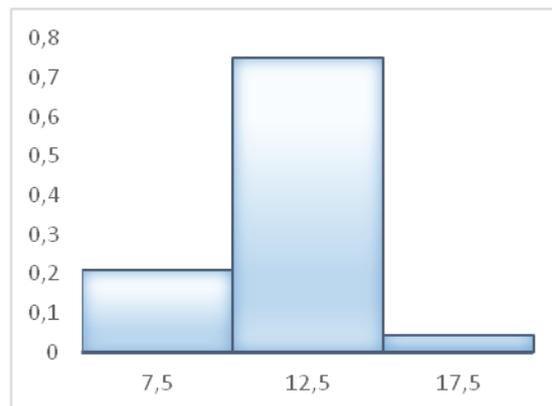
щение грунта показало некоторые типичные особенности при качении колеса под нагрузкой:

- а) максимальное смещение грунта (пик) происходит в момент прохода колеса;
- б) пиковое смещение грунта состоит из восстанавливаемой и невосстанавливаемой (остаточной) частей;
- в) восстанавливаемое смещение было более или менее постоянным при каждом проходе колеса и превышало невосстанавливаемую деформацию;
- г) остаточное смещение грунта увеличивалось с увеличением числа проходов;
- д) каждый проход вызывал меньшую остаточную деформацию, чем предыдущий;
- е) смещение грунта уменьшалось с увеличением глубины залегания грунта.

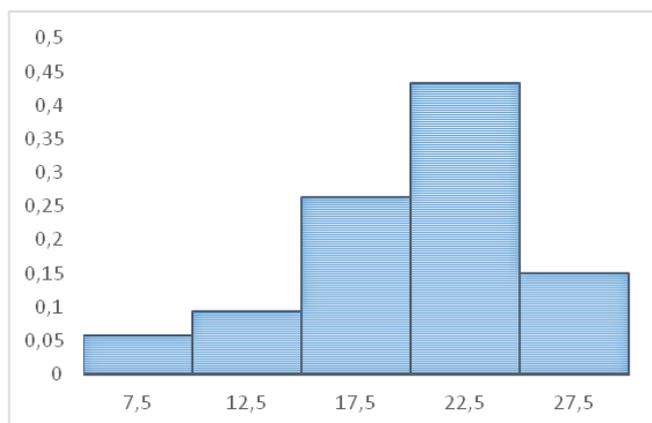
В исследованиях отмечается, что восстанавливаемое и остаточное вертикальное смещение грунта линейно является коррелированным ( $R^2 = 0,56...0,703$ ).



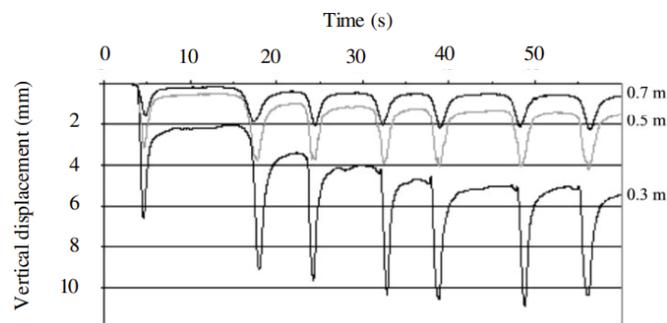
**Рис. 2. Гистограмма распределения эксплуатационной массы (т) колесных тракторов**  
**Fig. 2. Histogram of the operational weight distribution of wheeled tractors (t)**



**Рис. 4. Гистограмма распределения массы (т) кормоуборочных комбайнов**  
**Fig. 4. Histogram of the weight distribution of forage harvesters (t)**



**Рис. 3. Гистограмма распределения полной массы (т) зерноуборочных комбайнов**  
**Fig. 3. Histogram of the total weight distribution of combine harvesters (t)**



**Рис. 5. Вертикальное смещение грунта, измеренное одновременно на трех глубинах в течение 7 проходов шиной с нагрузкой 7 Мг и давлением накачки 240 кПа (участок 1, 15 июля)**

**Fig. 5. Vertical ground displacement measured simultaneously at three depths during seven passes by a tire with a load of 7 Mg and an inflation pressure of 240 kPa (section 1, July 15)**

<sup>5</sup> Trautner A. On soil behavior during field traffic. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural sciences. Uppsala, 2003. 55 с.

Уплотнение почвы в нижних горизонтах, интегральный показатель и использование новой высокопроизводительной и тяжелой самоходной техники продолжат и ускорят деградацию почвы. Кроме технологических машин, свою лепту вносят транспортные средства, и особенно грузовые автомобили общего назначения, не отвечающие требованиям ГОСТ 26955-86. Использование спаренных колес, резиноармированных гусениц, согласование ширины технологической колеи позволяют снизить удельное давление ходовых систем на почву и уменьшить площадь уплотнения, но перемещаемые большие массы как динамические системы останутся в качестве источников антропогенного негативного воздействия на почву. Естественные процессы разуплотнения протекают весьма медленно, а применение машин для глубокой обработки требует больших затрат энергии. По данным испытаний почвообрабатывающих машин на машиноиспытательных станциях Минсельхоза России, энергоёмкость плоскорезной обработки на глубину 26...27 см составляет 84...94 МДж·га<sup>-1</sup>; вспашки на глубину 24,6...26 см – 123...136 МДж·га<sup>-1</sup>, крошение – 75...76%; чизельной обработки на глубину 35,8 см – 133...149 МДж·га<sup>-1</sup>, крошение – 95...96%; рыхления влагосберегающим РВН-2 на глубину 41,8 см – 102...106 МДж·га<sup>-1</sup>, крошение – 53...55%<sup>6</sup>.

Методы оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов по минимальным эксплуатационным затратам<sup>2</sup> не учитывают затраты на устранение последствий деградации почвы и требуют доработки, но необходима методика оценки негативных экологических последствий при использовании мобильных машинно-тракторных агрегатов.

По результатам исследования А. Траутнер<sup>7</sup> вертикальные напряжения в почве на глубине 0,5 м будут соответствовать требованиям ГОСТ при нагрузке на колесо не более 2 т для испытываемых фонов и времени по месяцам, кроме июня. Для всесезонного использования самоходных машин нагрузка на колесо не должна превышать 1...1,5 т. Соответственно полная масса агрегата с учётом динамических нагрузок не должна превышать 5...6 т. Производительность единичного машинно-тракторного агрегата в сравнении с тракторами класса 3 и класса 5 будет

<sup>6</sup> Энергетические показатели сельскохозяйственных машин по данным МИС. Новокубанск, АИСТ. 246 с.

меньше соответственно в 2...2,5 и 3...3,5 раз. Компенсировать это снижение можно за счет применения мобильных роботизированных технологических беспилотных платформ<sup>7</sup> или новых компоновочных решений: мобильных мостовых роботизированных систем<sup>8</sup>, работающих совместно с классическим машинно-тракторным агрегатом. Соблюдение агротехнических сроков обеспечивается необходимым количественным составом такого технологического комплекса. В связи с этим возникает необходимость разработки новых систем управления технологическим комплексом на принципах мультиагентного управления ансамблями (роями, swarms; стаями, flocks) динамических объектов [7, 8], выполняющих общую задачу применительно к сельскохозяйственному производству.

## Выводы

1. Современные направления развития самоходной сельскохозяйственной техники противоречат агротехническим и экологическим требованиям. При модернизации или создании новых образцов машин необходимо в технико-экономическом обосновании учитывать негативные экологические последствия их применения.

2. Требуют переработки нормативно-методические документы по оценке удельных давлений на почву движителей самоходных машин.

3. Для устранения негативных последствий переуплотнения почв необходимо снизить механическую нагрузку на почву за счет применения машин меньшей массы и реализовывать мероприятия по разуплотнению подпочвенного горизонта.

4. Для снижения уплотнения почвы необходимо обосновать параметры и создать линейку роботизированных энергетических систем, комплекс рабочего оборудования и систему управления на принципах мультиагентного управления ансамблями (роями, swarms; стаями, flocks) динамических объектов применительно к сельскохозяйственному производству.

<sup>7</sup> Лукин А. Системы комплексной автоматизации и беспилотного управления трактором // ГлавПахарь. 2021. 3 февраля. URL: <https://glavpahar.ru/articles/sistemy-kompleksnoy-avtomatizacii-i-bespilotnogo-upravleniya-traktorom> (дата обращения: 10.05.2023).

<sup>8</sup> Скуратович А. Развитие способов снижения давления на почву // Докучаевские чтения. 2008. 53 с. URL: <http://www.trizminsk.org/e/20130105.pdf>.

## Список использованных источников

1. Зинченко С.И., Зинченко В.С. Формирование плужной подшвы при различных приемах основной обработки серой лесной почвы // Владимирский земледелец. 2015. № 1 (71). С. 2-6. EDN: VHVYBF
2. Sarauskis E., Buragiene S., Romaneckas K., Masilionyte L., Kriauciuniene Z., Sakalauskas A., Jasinskas A., Karayel D. Deep, shallow and no-tillage effects on soil compaction parameters. *Engineering for Rural Development*. 2014;13:31-36.
3. Kellera T., Sandina M., Colombia T., Horn D., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
4. Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Ширяева Е.В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2 (34). С. 176-179. EDN: SFFKYR
5. Канделя М.В., Канделя Н.М., Земляк В.Л., Бумбар И.В. Переуплотнение почв – один из важнейших факторов её деградации // Дальневосточный аграрный вестник. 2019. № 3 (51). С. 105-115. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-13043>
6. Горин Г.С. Механические характеристики почвогрунтов при объёмном деформировании // Наука и техника. 2012 № 3. С. 56-63. EDN: TYNWFL
7. Ерофеева В.А., Иванский Ю.В., Кияев В.И. Управление роём динамических объектов на базе мультиагентного подхода // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 6. С. 34-42. EDN: VTYYNV
8. Иванов Д.Я. Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово применяемых микророботов в экстремальных условиях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 70-78. EDN: OJDQXT

## Вклад авторов

А.Г. Левшин – концептуализация, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;  
И.Г. Голубев – информационные ресурсы и аналитика;  
И.Н. Гаспарян – актуальность проблемы, визуализация, создание черновика рукописи.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 30.05.2023, после рецензирования и доработки 19.06.2023, принята к публикации 22.06.2023

## References

1. Zinchenko S.I., Zinchenko V.S. Formation of a plow pan at various methods of basic processing of gray forest soil. *Vladimirskiy zemledelets*. 2015;1(71):2-6. (In Rus.)
2. Sarauskis E., Buragiene S., Romaneckas K., Masilionyte L., Kriauciuniene Z., Sakalauskas A., Jasinskas A., Karayel D. Deep, shallow and no-tillage effects on soil compaction parameters. *Engineering for Rural Development*. 2014;13:31-36.
3. Kellera T., Sandina M., Colombia T., Horn D., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 2019;194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
4. Kuznetsov N.G., Gapich D.S., Shiryayeva E.V. On the issue of determining the permissible coefficient of slipping of an all-wheel drive wheeled tractor. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2014;2(34):176-179. (In Rus.)
5. Kandelya M.V., Kandelya N.M., Zemlyak V.L., Bumbar I.V. Strong compaction of soil is one of the most important factors of its degradation. *Dalnevostochniy Agrarniy Vestnik*. 2019;3(51):105-115. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-13043> (In Rus.)
6. Gorin G.S. Mechanical soil characteristics at volume deformation. *Science and technique*. 2012;3:56-63. (In Rus.)
7. Erofeeva V.A., Ivansky Yu.V., Kiyaev V.I. Swarm control of dynamic objects based on multi-agent technologies. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*. 2015;6:34-42. (In Rus.)
8. Ivanov D.Ya. Use of swarm intelligence principles to control mass-applied microrobots in extreme conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;9:70-78. (In Rus.)

## Contribution of the authors

A.G. Levshin – conceptualisation, methodology, revision and editing of the final manuscript;  
I.G. Golubev – information resources and analytics;  
I.N. Gasparyan – problem relevance, visualisation, manuscript drafting.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 30.05.2023; revised 19.06.2023; accepted 22.06.2023