МИНИМИЗАЦИЯ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ ДВИЖИТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

И.И. Гуреев, доктор технических наук
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт земледелия и защиты почв от эрозии»
e-mail: gureev06@mail.ru

Аннотация. Разработан новый критерий минимизации уплотняющего воздействия техники на почву. Сущность его заключается в том, что нормированное государственным стандартом допускаемое давление движителей сельскохозяйственных агрегатов на почву выражено посредством вредной интенсивности механического воздействия на нее при выполнении полевых работ. Новый критерий более доступен в практическом использовании. Помимо нормальной нагрузки на почву, он учитывает силовую взаимосвязь между энергосредством и агрегатируемой им машиной, сказывающуюся на уплотняющих свойствах движителей, а потому более адекватно представляет исследуемый процесс в агроландшафте. Требуемые параметры оценки получают, не прибегая к трудоемкому эксперименту, по априорным данным технической характеристики агрегата и свойств почвы, на которой проводят полевые работы. Использование данного критерия позволяет заблаговременно обозначить экологически безопасные условия эксплуатации любого полевого сельскохозяйственного агрегата. Адекватность инновационного критерия подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: агроландшафт, сельскохозяйственный агрегат, плотность почвы, давление движителей, вредное воздействие, глубина колеи.

Плотность почвы является определяющим показателем ее агрофизических свойств. Под воздействием движителей сельскохозяйственных агрегатов почва переуплотняется. В ней уменьшается содержание порового пространства, ограничиваются возможности использования азота и, как следствие, снижается плодородие. Риски переуплотнения почвы возрастают с повышением влажности [1]. На таких почвах урожайность культур снижается даже при внесении высоких доз органических и минеральных удобрений [2]. Зачастую полного восстановления плодородия переуплотненной почвы не удается достичь известными методами ее обработки [2–7].

Важным этапом на пути от декларирования негативных последствий техногенного переуплотнения почвы к научно обоснованному ограничению его уровня является разработка и утверждение государственного стандарта (ГОСТ), регламентирующего

нормы допустимого давления движителей мобильной сельскохозяйственной техники в ландшафтном земледелии [8]. Однако практическая реализация положений стандарта затруднена сложной и небезупречной методикой его применения. Определение уплотняющего воздействия движителей ориентировано стандартом на агрегаты в статическом состоянии. При рабочем же перемещении между энергосредством (трактором) и агрегатируемой им машиной существует переменная силовая связь, которая сказывается на уплотняющих свойствах движителей. Вследствие тягового сопротивления агрегатируемой энергосредством машины в зоне контакта движителей с почвой действуют не только нормальные нагрузки от массы энергосредства, но и тангенциальные, вызывающие буксование ведущих движителей. Величина тангенциальных нагрузок переменная и соизмерима с нормальными нагрузками. Игнорирование данного факта может быть причиной больших погрешностей в расчетах. Кроме того, определение допускаемого давления движителей на почву трудоемко, так как сопряжено с экспериментальной оценкой вертикальной нагрузки на движители и ее неравномерным распределением по площади их контакта с почвой. Для этого используют процедуры замера параметров энергосредства, подготовки специального песчаного основания опоры движителя, применения тензометрического приборного оборудования и др.

Уплотняющее воздействие на почву движителей сельскохозяйственных агрегатов сопутствует всем приемам механизированного выполнения полевых работ. Методы оценки и ограничения этого воздействия должны обеспечивать, прежде всего, получение адекватных данных и быть максимально упрощенными в использовании. Поэтому актуальна разработка адаптированного к практическим условиям критерия, ограничивающего уплотняющее воздействие до уровня, при котором не снижается плодородие почвы. Для получения адекватных данных новый критерий должен учитывать силовую взаимосвязь энергосредств с агрегатируемыми ими машинами.

Уплотняющее воздействие движителей на почву ограничивается по их давлению, нормируемому стан-

дартом. Для повышения адекватности и упрощения контроля соблюдения данной нормы при механизированном выполнении полевых работ она выражена посредством более доступного в практическом использовании показателя – вредной интенсивности механического воздействия на почву I_b . При выполнении единичных агроприемов значение I_b формализуется следующим выражением [9]:

$$I_b = 3,6 \frac{(T_c + f_2 G_2 + P \delta) V}{W}, \text{ МДж/га; } (1)$$

где T_c – горизонтальная сила сопротивления почвы движителям, кН; G_2 и f_2 – вес и коэффициент сопротивления сельскохозяйственной машины протаскиванию; P – тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины, кН; δ – коэффициент буксования движителей; W – основная производительность выполнения агроприема, га/ч; V – рабочая скорость агрегата, м/с.

Величину T_c определяют по формуле [10]:

$$T_c = f_3 b q h^2, \text{ кН; } (2)$$

где f_3 – коэффициент сопротивления перекачиванию шин движителей; b – ширина движителей, м; q – коэффициент объемного смятия почвы, кН/м³; h – глубина колеи после прохода движителей по полю, м.

Движитель воздействует на почву распределенным удельным давлением p_0 по поверхности, площадь которой равна произведению длины хорды $AB = D \sin \beta$ на ширину b [11] (рис.):

Проседание движителя в почву.

$$p_0 = \frac{2G_1^1}{b D \sin 2\beta}, \text{ кН/м}^2; \quad (3)$$

где G_1^1 – вес энергосредства, приходящийся на единичный движитель, кН; m – коэффициент распределения веса энергосредства на движители. Для обычных тракторов $m = 0,375$ [12]; D – диаметр движителя, м; β – угол наклона к вертикали равнодействующей сил T_d и G_1^1 .

Усилие T_d на преодоление движителями сопротивления T_c определяется по формуле (4):

$$T_d = 2f_3 p_0 b D \sin^2 \beta, \text{ кН. } (4)$$

Уравнение (1) с учетом $T_d = T_c$ и выражения (3) после преобразований принимает вид (5):

$$P_0 = \frac{1}{2bDf_3} \left[\frac{(2mG_1)^2}{3,6V - f_2 G_2 - P\delta} + \frac{I_b W}{3,6V} - f_2 G_2 - P\delta \right], \text{ кПа. } (5)$$

Значение I_b для конкретного машинотракторного агрегата содержится в справочных данных или рассчитывается по методике, изложенной в Региональном регистре комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий [9]. Почвенный покров Центрально-Черноземного региона РФ на 95 % характеризуется суглинистыми и глинистыми почвами [13]. Удельное давление движителей на такую почву должно укладываться в нормы [8], приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Допускаемое давление движителей на суглинистую и глинистую почву [p_0] (для супесчаных почв нормы увеличивают на 20 %)

Влажность почвы (Вл) в слое 0–30 см	Весенний период	Летне-осенний период
Вл > 0,9НВ	80	100
0,7НВ < Вл ≤ 0,9НВ	100	120
0,6НВ < Вл ≤ 0,7НВ	120	140
0,5НВ < Вл ≤ 0,6НВ	150	180
Вл ≤ 0,5НВ	180	210

Функционирование сельскохозяйственного агрегата возможно, если давление движителей p_0 не превышает [p_0]. Значение p_0 , полученное по формуле (5), сопоставляют с [p_0] в таблице 1 применительно к периоду использования агрегата и фактической влажности почвы в слое 0–30 см. Выбранная величина [p_0] является максимальной для допуска к эксплуатации оцениваемой техники в обозначенных условиях.

Легко контролируемым ограничительным критерием уплотняющего воздействия движителей на почву является допустимая глубина колеи по их следу [h], определенная при Приравнявая данные формул (2) и (4), после преобразований получили выражение (6):

$$[h] = \sqrt{\frac{[p_0] D \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2mG_1^1}{[p_0] b D}} \right]^2}{q}}, \text{ м. } (6)$$

Если фактическая глубина колеи h после прохода агрегата не превышает величины [h], рассчитанной по формуле (6), эксплуатация его возможна.

Для проверки объективности инновационного подхода провели эксперимент. Целью его явилось подтверждение соответствия величины [h] по выражению (6) верхнему пределу оптимальной для развития растений плотности почвы [ρ], измеренной по следу движителей сельскохозяйственного агрегата. Сущность эксперимента состояла в следующем. Агрегат многократно перемещался по одному следу. После каждого прохода определяли плотность почвы ρ по следу движителей и глубину колеи h . Данные эксперимента аппроксимировали уравнением $\rho = \rho(h)$, которое реша-

ли относительно h при $\rho = [\rho]$. Требовалось доказать, что значение h , полученное по аппроксимирующему уравнению, с ошибкой не более 5 % соответствует величине $[h]$ по формуле (6).

Эксперимент провели 30 мая 2017 г. на поле черного пара в опытном хозяйстве ВНИИЗиЗПЭ (Медвенский район, Курская область). Почва — чернозем обыкновенный, суглинистый с наименьшей влагоемкостью НВ=27 %. Верхний предел оптимального значения плотности почвы $[\rho] = 1,3 \text{ г/см}^3$ [2]. Испытывали агрегат в составе трактора МТЗ 1221 и культиватора КПС-4 при сплошной обработке почвы на глубину 8,5 см со скоростью 2,17 м/с. Техническая характеристика агрегата: $N_d = 96 \text{ кВт}$; $f_1 = 0,18$; $G_1 = 53 \text{ кН}$; $f_2 = 0,25$; $G_2 = 7,4 \text{ кН}$; $B = 4 \text{ м}$; $b = 0,46 \text{ м}$; $D = 1,75 \text{ м}$; $W = 3,12 \text{ га/ч}$. Влажность почвы в момент испытаний составляла 15 % и соответствовала $Вл = 0,56 \text{ НВ}$. Коэффициент объемного смятия почвы $q = 9540 \text{ кН/м}^3$. При проведении эксперимента с культиватора демонтировали рабочие органы, ориентированные по следу движителей трактора. Произвели четыре прохода агрегата по одному следу. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2. Плотность почвы по следу движителей трактора МТЗ 1221 в зависимости от глубины колеи

Количество проходов агрегата по одному следу	Глубина колеи, м	Плотность почвы по следу движителей, г/см ³
1	0,035	1,18
2	0,043	1,42
3	0,049	1,43
4	0,052	1,45

Зависимость $\rho = \rho(h)$ аппроксимировали уравнением $\rho = -1442,2h^2 + 140,43h - 1,965 \text{ г/см}^3$, $R^2 = 0,98$. При $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ решение данного уравнения $h = 0,038 \text{ м}$. Расчетное по формуле (6) значение допускаемой глубины колеи по следу движителей $[h] = 0,039 \text{ м}$. Ошибка расчетов 3,1 % не превышает заданного уровня 5 %, то есть экспериментально подтверждено соответствие критерия, ограничивающего глубину колеи по следу движителей агрегата, верхнему пределу оптимальной плотности почвы.

По экспериментальным данным после первого прохода агрегата плотность почвы по следу движителей $\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$ (меньше $[\rho] = 1,3 \text{ г/см}^3$), а глубина колеи $h = 0,035 \text{ м}$ (меньше $[h] = 0,039 \text{ м}$), что свидетельствует о возможности эксплуатации агрегата в обозначенных выше условиях. Аналогичный вывод получен и расчетами по формуле (5), согласно которым для испытываемого агрегата $p_0 = 140,2 \text{ кПа}$. Допускаемое давление движителей на почву $[p_0] = 150 \text{ кПа}$ (см. табл. 1), то есть $p_0 < [p_0]$. Таким образом, модель (5) и вытекающее из нее следствие (6) приемлемы для использования в качестве критериев, ограничивающих уплотняющее воздействие техники на почву.

Из изложенного можно сделать вывод, что для ограничения уплотняющего воздействия сельскохозяйственной техники на почву целесообразно использовать критерий, являющийся производной интенсивности вредного механического воздействия на нее при выполнении полевых работ. Новый критерий базируется на нормах стандарта и адаптирован к практическим условиям эксплуатации техники. Помимо нормальной нагрузки на почву, он учитывает силовую взаимосвязь между энергосредством и агрегируемой им машиной, сказывающуюся на уплотняющих свойствах движителей, а потому более адекватно представляет исследуемый процесс.

В заключении следует подчеркнуть, что:

- использование критерия по ограничению уплотняющего воздействия техники на почву позволяет заблаговременно обозначить экологически безопасные условия эксплуатации любого сельскохозяйственного агрегата, не прибегая к трудоемкой экспериментальной оценке распределения нагрузки на движители по площади их контакта с почвой;
- требуемые показатели оценки получают по априорным данным технической характеристики агрегата и свойств почвы, на которой проводят полевые работы.

Литература

1. Kreye, H. Pflanzenschutz im Weizen bei konservierender Bodenbearbeitung / H. Kreye, V. Garbe, G. Bartels, H. Hoppe // Getreide-Magazin. 1999. S. 180–183.
2. Бондарев, А.Г. Изменение физических свойств и плодородия почв при их уплотнении движителями сельскохозяйственной техники / А.Г. Бондарев, П.М. Сапожников, В.Ф. Уткаев, В.Н. Щепотьев // Сб. Воздействие движителей на почву. — Том 118. — М., 1988. — С. 46–57.
3. Лапик, В.П. Экологические аспекты воздействия гусеничных движителей на почву / В.П. Лапик // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. — 2010. — № 2. — С. 86–88.
4. Акпасов, В.А. Повышение эффективности использования трактора «Кировец» за счет снижения воздействия движителей на почву: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Саратовский гос. агроинж. ун-т. — Саратов, 1998. — 22 с.
5. Злобин, В.И. Повышение эффективности использования колесного трактора класса 1,4 за счет постановки сдвоенных колес в сельскохозяйственном производстве Амурской области: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Благовещенск, 2006. — 138 с.
6. Тхазеплов, Х.М. Повышение эффективности использования колесных тракторов на склоновых землях за счет применения шин со съёмным протектором: диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Тхазеплов Х.М.; [Место защиты: Кабард.-Балкар. гос. с.-х. акад. им. В.М. Кокова]. — Нальчик, 2010. — 150 с.
7. Ivantsova, N.N. Investigation and Calculation of the stressed-strained State and Compaction of viscoelastic

disperse Media as a Result of relaxation Processes. [Текст] / Zolotarevskaya D.I. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2005, Vol. 78, No. 5. Pp. 78–86.

8. ГОСТ 26955-86, ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26954-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. Методы определения воздействия движителей на почву. Метод определения максимального нормального напряжения в почве. М., 1986. — 22 с.

9. Гуреев, И.И. Региональный регистр комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий / И.И. Гуреев, В.П. Дьяков, Г.К. Гребеншиков, С. Дурдыев. — Курск, ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2015. — 59 с.

10. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. — М.: Колос, 1980. — 671 с.

11. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.

12. Распределение нагрузки по осям трактора / http://www.starcorussia.ru/catalog/shiny_dlya_traktorov_i_kombaynov/.

13. Димо, В.Н. Почвенно-гидрологические характеристики зон механизации Европейской территории СССР / В.Н. Димо, А.Н. Садовников // Сб. Воздействие движителей на почву. — Том 118. — М., ВИМ, 1988. — С. 86–97.

Minimization of the compacting effect on the soil of agricultural machinery movers

I.I. Gureev

Summary. A new criterion for limiting the compacting effect of machinery on soil has been developed. Its essence lies in the fact that the permissible pressure of the propellers of agricultural aggregates normalized by the state standard on the soil is expressed through the harmful intensity of the mechanical impact on it during field work. The new criterion is more accessible in practical use. In addition to the normal load on the soil, it takes into account the strength relationship between the energy source and the machine it aggregates, which affects the sealing properties of the propulsions, and therefore more adequately represents the process under study in the agro landscape. The required parameters of the evaluation are obtained without resorting to a laborious experiment — according to the a priori data of the technical characteristics of the aggregate and the properties of the soil on which the field works are carried out. The use of this criterion allows identifying in advance the environmentally friendly operating conditions of any field agricultural unit. The adequacy of the innovation criterion has been confirmed experimentally.

Key words: agrolandscape, agricultural aggregate, soil

density, propulsion pressure, harmful influence, track depth.

References

1. Kreye, H. Pflanzenschutz im Weizen bei konservierender Bodenbearbeitung / H. Kreye, V. Garbe, G. Bartels, H. Hoppe // Getreide-Magazin. 1999. S. 180–183.

2. Bondarev, A.G. Изменение физических свойств и плодородия почв при их уплотнении движителями сельскохозяйственной техники / A.G. Bondarev, P.M. Sapozhnikov, V.F. Utkayev, V.N. Shhepot'ev // Sb. Vozdejstvie dvizhitelej na pochvu. — Tom 118. — М., 1988. — С. 46–57.

3. Lapik, V.P. Jekologicheskie aspekty vozdejstvija gusenichnyh dvizhitelej na pochvu / V.P. Lapik // Vestnik FGOU VPO MGAU. — 2010. — № 2. — С. 86–88.

4. Akpasov, V.A. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija traktora «Kirovec» za schet snizhenija vozdejstvija dvizhitelej na pochvu: avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 / Saratovskij gos. agroinzh. un-t. — Saratov, 1998. — 22 s.

5. Zlobin, V.I. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija kolesnogo traktora klassa 1,4 za schet postanovki sdvoennyh koles v sel'skohozjajstvennom proizvodstve Amurskoj oblasti: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 / Blagoveshhensk, 2006. — 138 s.

6. Thazeplov, H.M. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija kolesnyh traktorov na sklonovyh zemljah za schet primeneniya shin so s'emnym protektorom: dissertacija ... kandidata tehniceskix nauk: 05.20.01 / Thazeplov H.M.; [Mesto zashhity: Kabard.-Balkar. gos. s.-h. akad. im. V.M. Kokova]. — Nal'chik, 2010. — 150 s.

7. Ivantsova, N.N. Investigation and Calculation of the stressed-strained State and Compaction of viscoelastic disperse Media as a Result of relaxation Processes. [Текст] / Zolotarevskaya D.I. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2005, Vol. 78, No. 5. Pp. 78–86.

8. ГОСТ 26955-86, ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26954-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. Методы определения воздействия движителей на почву. Метод определения максимального нормального напряжения в почве. М., 1986. — 22 с.

9. Гуреев, И.И. Региональный регистр комплексов машин для механизации перспективных агротехнологий / И.И. Гуреев, В.П. Дьяков, Г.К. Гребеншиков, С. Дурдыев. — Курск, ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2015. — 59 с.

10. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. — М.: Колос, 1980. — 671 с.

11. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.

12. Распределение нагрузки по осям трактора / http://www.starcorussia.ru/catalog/shiny_dlya_traktorov_i_kombaynov/.

13. Димо, В.Н. Почвенно-гидрологические характеристики зон механизации Европейской территории СССР / В.Н. Димо, А.Н. Садовников // Sb. Vozdejstvie dvizhitelej na pochvu. — Том 118. — М., ВИМ, 1988. — С. 86–97.