

Научная статья

УДК 631.372

EDN UVRPGT

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-130-135>

## Теоретические предпосылки к определению сопротивления почвы воздействию деформатора

Сергей Александрович Шишлов<sup>1</sup>, Александр Николаевич Шишлов<sup>2</sup>,  
Дмитрий Сергеевич Шишлов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Приморский государственный аграрно-технологический университет

Приморский край, Уссурийск, Россия

<sup>1</sup> [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru)

**Аннотация.** Проведение агротехнических операций на различных агрофонах и перевозка грузов сельскохозяйственного назначения по полям и полевым дорогам сопровождаются воздействием на почвенный покров колесных и гусеничных движителей тракторов, комбайнов, прицепов и других технических средств, принимающих участие в технологическом процессе возделывания и уборки сельскохозяйственных культур. Взаимодействие движителей с почвой обуславливает ее деформацию контактирующими рабочими элементами движителей, что в значительной мере влияет на сопротивление передвижению сельскохозяйственного агрегата. Для оценки способности почвы сопротивляться деформации предложен ряд зависимостей, в основу которых положена закономерность, оценивающая величину деформации почвы от приложенной нагрузки при вдавливании в нее штампа различных размеров. На деформацию почвы при воздействии на нее движителя имеет влияние целый ряд факторов: тип почвы, толщина плодородного слоя, наличие либо отсутствие переплетенного корневой системой растений дернового слоя, наличие либо отсутствие плотного глинистого подпахотного основания, влажность почвы, ее структурность и др. При оценке способности почвы деформироваться под нагрузкой, обусловленной погружением в нее движителей сельскохозяйственной техники, сложно учесть влияние всех факторов, принимающих участие в этом процессе. Однако представляется возможной оценка напряженного состояния почвы при внедрении в нее деформаторов путем анализа некоторых показателей, изменяющихся по мере увеличения глубины внедрения деформатора, а также анализа интенсивности изменения этих показателей. В данной статье предпринята попытка получения зависимости, всесторонне отражающей влияние почвенных условий на сопротивление вдавливанию движителя, а также приведены некоторые результаты исследований, направленных на разработку такой зависимости.

**Ключевые слова:** почва, деформация почвы, движитель, сопротивление, деформирующая нагрузка

**Для цитирования:** Шишлов С. А., Шишлов А. Н., Шишлов Д. С. Теоретические предпосылки к определению сопротивления почвы воздействию деформатора // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 4. С. 130–135. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-130-135>.

Original article

## Theoretical prerequisites for calculating soil resistance to the action of a deformer

Sergey A. Shishlov<sup>1</sup>, Aleksandr N. Shishlov<sup>2</sup>, Dmitry S. Shishlov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Primorsky State Agrarian and Technological University

Primorsky krai, Ussuriysk, Russian Federation

<sup>1</sup> [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru)

**Abstract.** Carrying out agrotechnical operations at various agrofonds and transporting agricultural goods across fields and field roads is accompanied by the impact on the soil cover of wheeled and tracked tractors, combines, trailers and other technical means involved in the technological process of cultivation and harvesting of crops. The interaction of the movers with the soil is accompanied by its deformation by the contacting working elements of the movers, which significantly affects the resistance to movement of the agricultural unit. To assess the ability of the soil to resist deformation, a number of dependencies are proposed, based on a pattern that estimates the amount of soil deformation from the applied load when a stamp of various sizes is pressed into it. A number of factors influence the deformation of the soil when exposed to a mover: the type of soil, the thickness of the fertile layer, the presence or absence of a turf layer intertwined with the root system of plants, the presence or absence of a dense clay sub-arable base, soil moisture, its structure, other factors. When assessing the ability of the soil to deform under the load caused by the immersion of agricultural machinery movers into it, it is difficult to take into account the influence of all factors involved in this process. However, it seems possible to assess the stress state of the soil during the introduction of deformers into it by analyzing some indicators that change as the depth of the introduction of the deformer increases, as well as analyzing the intensity of changes in these indicators. This article attempts to obtain a dependence that comprehensively reflects the influence of soil conditions on the resistance to indentation of the movers and also provides some results of research aimed at developing such a dependence.

**Keywords:** soil, deformation of soil, mover, resistance, deforming load

**For citation:** Shishlov S. A., Shishlov A. N., Shishlov D. S. Theoretical prerequisites for calculating soil resistance to the action of a deformer. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2024;18;4:130–135. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-130-135>.

**Введение.** Почвенные условия оказывают существенное влияние на работу движителей машин при выполнении агротехнических операций [1, 2]. Сопротивление, возникающее при вдавливании движителя в почву, существенно отличается на различных типах почв в зависимости от их несущей способности, а также изменяется в зависимости от глубины внедрения движителя [3].

**Целью исследований является получение зависимости, всесторонне отражающей влияние почвенных условий на сопротивление вдавливанию движителя.**

В качестве методологической основы проведенных исследований использовались положения и законы математического анализа, физики и теоретической механики.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В агропромышленном производстве выполнение различных технологических операций агрегатами, в составе которых имеются колесные или гусеничные энергетические средства, подразумевает контакт их движителей с почвой. Имеющиеся в настоящее время результаты теоретических и экспериментальных исследований сопротивления передвижению машин на различных типах почв описываются рядом зависимостей, не имею-

щих универсальности. В их основе лежит зависимость деформации почвы от величины нагрузки, приложенной к вдавливающему в почву штампу [4].

Наиболее широко распространеными являются зависимости, предложенные Е. Д. Львовым (1), М. Н. Летошневым (2), В. В. Гуськовым (3), М. Г. Беккером (4):

$$\sigma = ch, \quad (1)$$

$$\sigma = ch^\mu, \quad (2)$$

$$\sigma = p_0 th \frac{k}{p_0} h, \quad (3)$$

$$\sigma = \left( \frac{\sigma_c}{b} + \sigma_\phi \right) h^\mu \quad (4)$$

В приведенных зависимостях параметры  $c$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_\phi$ ,  $p_0$ ,  $k$  характеризуют состояние почвы. При этом  $h$  – глубина погружения штампа в почву;  $\sigma$  – напряжение в почве. Каждая из приведенных зависимостей справедлива только при определенных допущениях и ограничениях.

А. В. Климановым и С. М. Дерезой предложена зависимость, учитывающая наличие плотного подпахотного слоя [5], характерного для почвенных условий Приморского края [6], имеющая вид:

$$\sigma = ch^{\mu_0 \pm \frac{kd}{s}} \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр штампа;  
 $S$  – глубина залегания плотного подстилающего слоя.

Учитывая тот факт, что на всех основных типах почв сельскохозяйственного назначения между напряжением и величиной осадки штампа существует нелинейная зависимость, воспользуемся графиком, отражающим взаимосвязь между глубиной внедрения штампа  $h$  и напряжением  $\sigma$ , возникающим при этом в почве [7] (рис. 1).

На участке 0–1 (рис. 1) происходит внедрение штампа в почву, сопровождающееся ростом напряжения. При этом на почве с дерновым покровом напряжение возрастает интенсивнее ввиду ее более высокой несущей способности по сравнению с почвой без дернового покрова.

После прорыва дернового покрова (участок 1–2) наблюдается снижение напряжения в почве и дальнейшее внедрение штампа не сопровождается ростом напряжения (участок 2–3) до достижения твердого подстилающего слоя (участок 3–4). На почве без дернового покрова участок его прорыва отсутствует и после внедрения штампа в почву (участок 0–1) наступает участок прогрессирующего течения (участок 1–2), продолжающийся до дости-

жения деформатором твердого подстилающего слоя (участок 2–3).

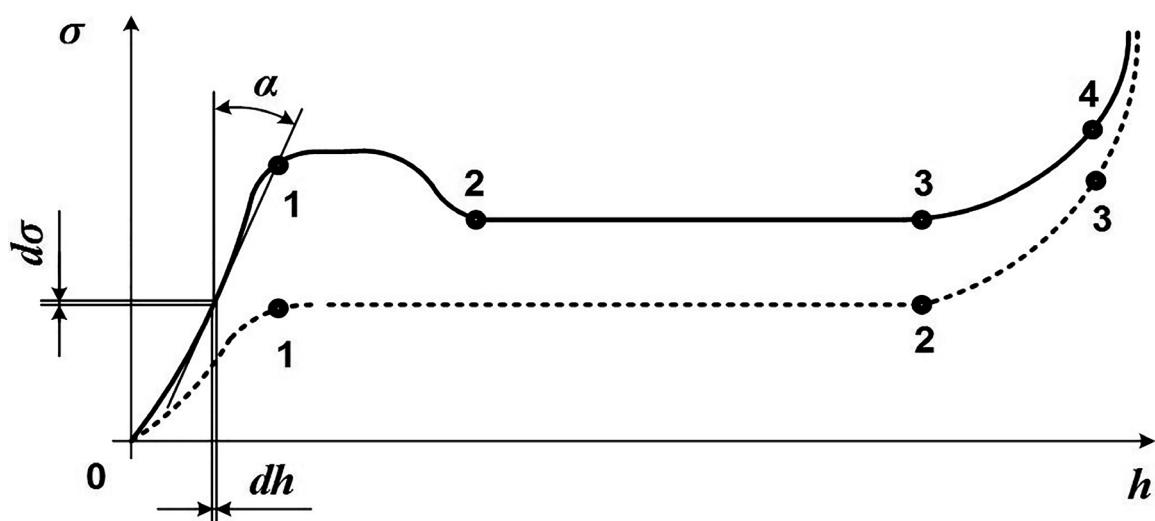
Выделим на участке 0–1 графика, характеризующего взаимосвязь между глубиной внедрения штампа  $h$  и напряжением  $\sigma$ , возникающим при этом в почве с дерновым покровом, элементарный участок и обозначим его  $d\sigma$  по оси  $\sigma$  и  $dh$  по оси  $h$  (рис. 1). Проведем к выделенному элементарному участку касательную, которая образует угол  $\alpha$  с вертикальной осью. Для характеристики напряженного состояния почвы в зависимости от глубины погружения штампа используем параметр  $c_T$ . Из рисунка 1 следует, что текущее значение данного параметра можно определить из выражения (6):

$$c_T = \frac{d\sigma}{dh} = \operatorname{ctg}\alpha \quad (6)$$

Введем параметр  $\delta$ , характеризующий интенсивность изменения параметра  $c_T$ , определяемый выражением (7):

$$\delta = \frac{d\left(\frac{d\sigma}{dh}\right)}{d\sigma} \quad (7)$$

Проинтегрировав выражение (7), получим:  $d\sigma/dh = \delta(\sigma + c_T)$ .



сплошная линия – почва с дерновым покровом; пунктир – почва без дернового покрова  
solid line – soil with turf cover; dotted line – soil without turf cover

**Рисунок 1 – Взаимосвязь между глубиной внедрения штампа  $h$  и напряжением  $\sigma$ , возникающим при этом в почве**

**Figure 1 – Relationship between the depth of stamp penetration  $h$  and the stress  $\sigma$  arising in the soil**

Значение  $c_1$  определим из начальных условий (8):

$$\sigma = 0; \frac{d\sigma}{dh} = c_0 \quad (8)$$

Тогда получим:

$$c_1 = \frac{c_0}{\delta}; \frac{d\sigma}{dh} = \delta \left( \sigma + \frac{c_0}{\delta} \right) \quad (9)$$

Интегрируя уравнение (9) и выразив из него величину  $h$ , имеем:

$$h = \frac{1}{\delta} \ln \left( \frac{\delta\sigma}{c_0} + 1 \right), \quad (10)$$

$$\text{откуда } \sigma = \frac{c_0}{\delta} (e^{\delta h} - 1) \quad (11)$$

Полученное таким образом выражение (11) позволяет охватить практически все возможные случаи погружения штампа в почву в зависимости от действующей на него нагрузки.

Переходя к ширине движителя машины, определим силу сопротивления вдавливанию движителя в почву:

$$F_c = b \int_0^h \sigma dh \quad (12)$$

где  $b$  – ширина движителя.

Подставим выражение (11) в уравнение (12):

$$F_c = b \int_0^h \frac{c_0}{\delta} (e^{\delta h} - 1) dh \quad (13)$$

После преобразований выражения (13) получим:

$$F_c = \frac{b}{\delta} \left[ \sigma - \frac{c_0}{\delta} \ln \left( \frac{\delta\sigma}{c_0} + 1 \right) \right] \quad (14)$$

При этом значения параметров  $c_0$  и  $\delta$  определяются в конкретных полевых условиях на основании экспериментальных данных, полученных при вдавливании штампа в почву.

**Заключение.** На основании проведенных теоретических исследований по определению сопротивления почвы воздействию деформатора, установлено:

1. Силы, характеризующие сопротивление почвы деформации, могут значительно изменяться в зависимости от типа почвенного покрова, присутствия дернового слоя, наличия плотного подпахотного основания и других факторов.

2. Предложенная зависимость позволяет оценить сопротивление почвы вдавливанию в нее деформатора (например, движителя машины) при различных почвенных условиях, поскольку включает параметры, характеризующие изменение напряжения в почве в зависимости от глубины погружения деформатора и позволяющие при этом оценить интенсивность изменения напряжения.

### Список источников

- Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Кривуца З. Ф., Панова Е. В., Поликутина Е. С., Митрохина О. П. [и др.]. Снижение техногенного воздействия на почву колесных комбайнов // Дальневосточный аграрный вестник. 2019. № 1(49). С. 87–94. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-11013>. EDN VFOXEB.
- Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в технологии возделывания сельскохозяйственных культур : монография. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2017. 200 с. EDN XONHXY.
- Алдошин Н. В., Васильев А. С., Голубев В. В. Исследования прочностных характеристик почвы // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2020. № 3 (47). С. 68–73. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.22.33.012>. EDN UQTTHX.
- Цытович Н. А. Механика грунтов. М. : Высшая школа, 1979. 272 с.
- Климанов А. В., Дереза С. М. О влиянии соотношения размеров нагружающей поверхности и толщины деформируемого слоя почвы на зависимость между напряжениями

и деформациями почвы // Механизация сельскохозяйственного производства на Дальнем Востоке : сб. науч. тр. Вып.14. Улан-Удэ, 1971. С. 38–43.

6. Шишлов С. А., Шишлов А. Н., Тихончук П. В., Щитов С. В., Жирнов А. Б. Фрикционно-адгезионные свойства почв Приморского края, влияющие на работу машин // Научное обозрение. 2016. № 17. С. 102–106. EDN WXRACF.

7. Шишлов А. Н., Шишлов С. А. Сопротивление передвижению гусеничного движителя при образовании колеи // Роль аграрной науки в развитии лесного и сельского хозяйства Дальнего Востока : материалы III нац. (всерос.) науч.-практ. конф. Уссурийск : Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. С. 149–153. EDN PPDWNB.

### References

1. Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Krivutsa Z. F., Panova E. V., Polikutina E. S., Mitrokhina O. P. [et al.]. Reduction of wheeled harvesters technogeneous effect on soil. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*, 2019;1(49):87–94. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-11013>. EDN VFOXEB (in Russ.).
2. Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. *Increase of efficiency of mobile energy means utilization in crop cultivation technology: monograph*, Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2017, 200 p. EDN XONHXY (in Russ.).
3. Aldoshin N. V., Vasilyev A. S., Golubev V. V. The study of soil strength characteristics. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva*, 2020;3(47):68–73. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.22.33.012>. EDN UQTTHX (in Russ.).
4. Tsytovich N. A. *Mechanics of soils*, Moscow, Vysshaya shkola, 1979, 272 p. (in Russ.).
5. Klimanov A. V., Dereza S. M. On the influence of the ratio of the size of the loading surface and the thickness of the deformed soil layer on the relationship between stresses and strains of the soil. Proceedings from *Mekhanizatsiya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva na Dal'nem Vostoke*. (PP. 38–43), Ulan-Ude, 1971 (in Russ.).
6. Shishlov S. A., Shishlov A. N., Tikhonchuk P. V., Shchitov S. V., Zhirnov A. B. Friction-adhesion properties of the Primorsky krai soils, which affect the operation of machines. *Nauchnoe obozrenie*, 2016;17:102–106. EDN WXRACF (in Russ.).
7. Shishlov A. N., Shishlov S. A. Resistance to caterpillar movement during rut formation. Proceedings from The role of agrarian science in the development of forestry and agriculture of the Far East: *III Natsional'naya (vserossiiskaya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 149–153), Ussuriysk, Primorskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2019. EDN PPDWNB (in Russ.).

© Шишлов С. А., Шишлов А. Н., Шишлов Д. С., 2024

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; одобрена после рецензирования 12.11.2024; принята к публикации 22.11.2024.

The article was submitted 15.10.2024; approved after reviewing 12.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.

### Информация об авторах

**Шишлов Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, Приморский государственный аграрно-технологический университет,  
[sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru);

**Шишлов Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Приморский государственный аграрно-технологический университет,  
[sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru);

**Шишлов Дмитрий Сергеевич**, студент бакалавриата, Приморский государственный аграрно-технологический университет, [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru)

***Information about the authors***

**Sergey A. Shishlov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Primorsky State Agrarian and Technological University, [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru);

**Aleksandr N. Shishlov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Primorsky State Agrarian and Technological University, [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru);

**Dmitry S. Shishlov**, Undergraduate Student, Primorsky State Agrarian and Technological University, [sergey\\_a\\_shishlov@mail.ru](mailto:sergey_a_shishlov@mail.ru)

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**