

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ СТРУКТУРНИХ МОДЕЛЕЙ ҐРУНТУ

**Б. А. Шелудченко, кандидат технічних наук
ORCID 0000-0002-8137-0905**

Житомирський національний агроекологічний університет

**В. В. Чуба, кандидат технічних наук
ORCID 0000-0002-4119-0520**

**Національний університет біоресурсів і
природокористування України**

**В. Р. Білецький, кандидат технічних наук
ORCID 0000-0002-9431-6350**

**Житомирський національний агроекологічний університет
e-mail: sheludchenkobogdan@ukr.net, vvchuba@ukr.net**

Анотація. Під час роботи машинно-тракторних агрегатів відбувається контактна взаємодія колеса з ґрунтом. При взаємодії спостерігається деформування та ущільнення ґрунту, що негативно впливає на зміну його структури. Для зменшення негативного впливу на ґрунт необхідно визначати оптимальні конструкційні параметри колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів. Для цього необхідно використовувати імітаційні моделі ґрунту, що є адекватними реальним ґрунтовим формуванням.

В статті розглянуто лабораторний метод оцінки структурних моделей ґрунту на основі моделі суцільного середовища.

Застосування моделі суцільного середовища в аеромеханіці ґрунтів дозволяє одразу ж перенести в останню цілий ряд розв'язків, які були отримані в механіці суцільного середовища. Як показує досвід, застосування в задачах механіки ґрунтів розв'язків, знайдених в теорії пружності, теорії пластичності і в інших розділах механіки суцільного середовища, в багатьох випадках дозволяє правильно оцінити порядок очікування деформацій і отримати приблизний характер їх розподілення в ґрунтовому середовищі.

В статті також розроблено метод деформації та руйнування структури ґрунту, що дозволяє в лабораторних умовах змодельовати вплив ходових систем на родючий шар ґрунту в залежності від його структури та визначити співвідношення критичної деформації та параметрів які призводять до руйнування

відповідної структури ґрунту. Отримані результати моделювання дають змогу стверджувати про можливість визначення критичних значень навантажень деформації та руйнування в залежності від структури та інших параметрів стану ґрунту.

Ключові слова: *ґрунт, переріз, розривна машина, пляма контакту, пористість*

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку технічного забезпечення сільського господарства полягають у застосуванні широкозахватних агрегатів, що в свою чергу вимагає збільшення потужності привідних енергетичних засобів. Забезпечення енергозасобами необхідної потужності зводиться до можливості її реалізації за рахунок взаємодії привідних коліс із опорною поверхнею. При підвищенні потужності, як правило, підвищується конструкційна маса енергозасобу, і саме тому досить часто для реалізації необхідної потужності застосовують додаткові баластні маси. Це призводить до збільшення питомих тисків в зоні контакту колеса з ґрунтом, як наслідок відбувається збільшення ущільнення ґрунту.

Переущільнення ґрунту призводить до зниження врожайності сільськогосподарських культур, руйнування його структури та інших негативних наслідків [1–5]. Дослідження контакту рушіїв з ґрунтом показали, що знаходження напруженого стану в ґрунті є досить складним завданням. Воно залежить не лише від навантажень, що діють на колісний рушій, а й від швидкості руху трактора та параметрів пневматичної шини [6, 7]. Ґрунтове середовище розглядається як однорідне та ізотропне [8–10]. Проте отримані в вищеперерахованих випадках дослідження є складними та не в повній мірі відображають напружений стан ґрунтового середовища та не дозволяють визначити раціональні параметри колісного рушія. Тому необхідна розробка методів оцінки структурних моделей ґрунту.

Розробка ефективних методів визначення впливу навантажень в точці контакту колеса з опорною поверхнею дозволить значно заощадити час та ресурси для оцінку впливу на ґрунт, дозволить оптимізувати вибір шин для автотракторних рушіїв.

Застосування моделі суцільного середовища в аеромеханіці ґрунтів дозволяє одразу ж перенести в останню цілий ряд розв'язків, які були отримані в механіці суцільного середовища. Як показує досвід, застосування в задачах механіки ґрунтів розв'язків, знайдених в теорії пружності, теорії пластичності і в інших розділах механіки суцільного середовища, в багатьох випадках дозволяє правильно оцінити порядок очікування деформацій і отримати приблизний характер їх розподілення в ґрунтовому середовищі. Як показують дослідження, енергетичний аналіз в багатьох випадках не тільки

суттєво полегшує розв'язок різних задач аеромеханіки ґрунту, але і робить яснішою фізичну суть проблем, що розглядаються.

Дискретні моделі ґрунту відображають ті або інші уявлення про структуру ґрунту і про механічні властивості елементів цієї структури.

При дослідженнях поведінки дискретних моделей під дією зовнішнього навантаження враховуються не лише механічні властивості скелету і наповнювача, але ґрунт розглядається як система, що складена з нескінченної множини частинок, від властивостей яких і умов їх взаємодії переходять до механічних властивостей ґрунту в цілому.

Використання відомих імітаційних моделей П. Л. Іванова [11], Г. І. Покровського [12], Б. Й. Дідуха [13], І. І. Кондаурова [14] – є чисто розрахунковими і реалізувати їх матеріально з метою визначення фізико-механічних характеристик ґрунту досить складно.

Мета дослідження. Виконати уточнення лабораторних методів оцінки структурних моделей ґрунту в лабораторних умовах.

Результати досліджень. Модель будь-якого горизонтального перерізу ґрунту, може бути зведена до двомірної (плоскої) структурної сітки із щільністю упаковки (пористістю) $e = 0,257$ (25,7%), яка є перерізом кеплерівської гексагональної упаковки куль у просторі зі щільністю (рис. 1):

$$e = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \cdot 100\% \approx 25,7\% \quad (1)$$

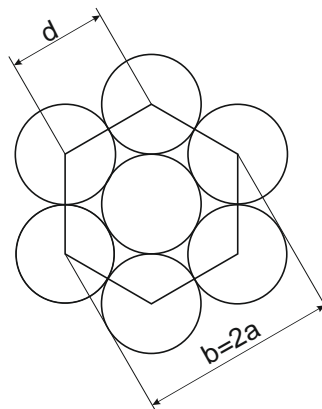


Рис. 1. Переріз гексагональної пакування куль (модель а).

Аналіз пористості реального дерново-підзолистого супіщаного підстеленого мореною ґрунту дозволяє зробити висновок про відповідність структури моделі структурам ґрунтових горизонтів, які залягають на глибинах 500...1000 мм (табл. 1) із похибкою 1,15...8,21%. Для моделювання ґрунтової структури на глибинах 0...500 мм розроблена структурна сітка, що є упаковкою кругів діаметром d на площині, обмеженій кругом з діаметром $D = 3d$, які, в

свою чергу, можуть бути зібраними в круг з діаметром $3D$. Схема такої структури наведена на рис. 2.

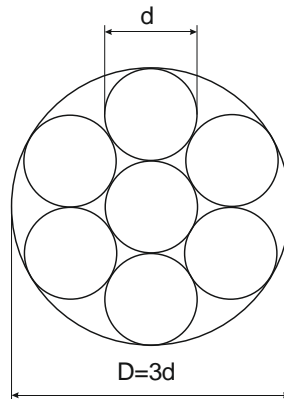


Рис. 2 «Пакування» кігів на площині (модель б)

1. Відповідність пористості горизонтів ґрунтового профілю пористості розроблених моделей.

Горизонт, мм	Загальна пористість ґрунту, %	Пористість застосованої моделі, %	Відхилення модельної пористості, %	Застосована модель
0 ... 100	39,0	39,7	1,76	Модель б
100 ... 200	39,0	39,7	1,76	Модель б
200 ... 300	37,0	39,7	6,80	Модель б
300 ... 400	36,5	39,7	8,04	Модель б
400 ... 500	34,0	39,7	11,84	Модель б
500 ... 600	31,0	25,7	14,33	Модель а
600 ... 700	28,0	25,7	8,21	Модель а
700 ... 800	27,0	25,7	1,15	Модель а
800 ... 900	27,5	25,7	6,55	Модель а
900 ... 1000	27,5	25,7	6,55	Модель а

Пористість моделі (рис. 2) визначиться як:

$$e = \left[1 - \left(\frac{7 \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi (3d)^2}{4}} \right)^2 \right] \cdot 100\% \approx 39,7\%. \quad (2)$$

Для забезпечення дослідів розроблені моделі реалізовані у вигляді структури, складеної із металевих кілець, зібраних відповідно до двох схем, наведених рис. 1 рис. 2, і імітуючи структуру ґрунту в шарах 500...1000 мм і 0...500 мм. Зв'язки структурних елементів виконані за допомогою каліброваних метизів, затяжка яких контролювалась динамометричним ключем, що забезпечує їх рівномірність. Таким чином, структури реального ґрунту пов'язаний із структури моделі в кожному з розглядуваних горизонтів таким співвідношенням:

$$S_{\text{ґрунту}} = k \cdot S_{\text{моделі}}, \quad (3)$$

де: k – коефіцієнт подібності, який визначає лінійний і силовий (масштаб сил зчеплення) масштаби моделювання.

Випробування міцності розроблених моделей структур виконувалось на універсальній випробувальній машині Р-20 за двома схемами навантаження (відрив і зсув структурних елементів). В процесі навантаження моделей були записані «машинні» діаграми їх деформування в координатах: навантаження – деформація. Для визначення масштабу напружень визначались граничні напруження зсуву за методом Ребіндера, для кожного окремо взятого горизонту.

Зробивши припущення, що повна робота $\Omega_{\Sigma} = 1$ деформування та руйнування структури ґрунту складається з роботи Ω_1 ущільнення родючого шару ґрунту і роботи Ω_2 руйнування структурної будови агрегатних формувань поверхневого шару ґрунту, маємо:

$$\Omega_{\Sigma} = 1 = \Omega_1 + \Omega_2. \quad (4)$$

На рис. 3 та рис. 4 зображено імітаційні моделі структури ґрунту та дія сил на них, та їх руйнування на розривній машині.

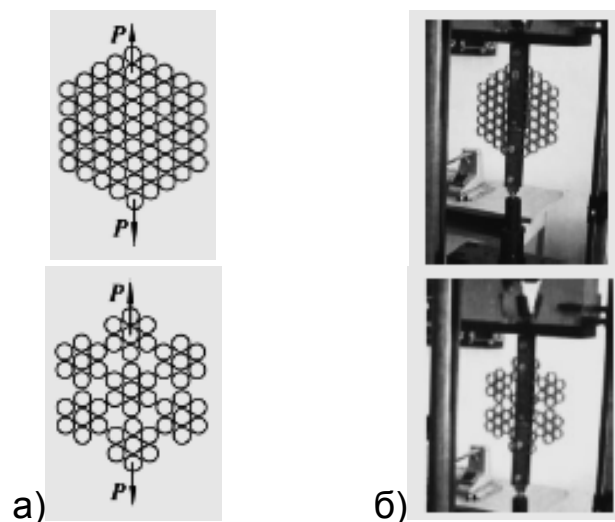


Рис. 3. Послідовність механічні випробувань моделі родючого шару ґрунту при імітації ущільнення: а – схема навантаження моделі, б – практична реалізація експерименту.

За отриманими результатами деформації та руйнування досліджуваних структур, з урахуванням отриманого масштабу напружень і динаміки руйнування зв'язківка в кожний з моментів деформування моделей в координатах: напруження – відносна деформація, можна побудувати структур побудовані «реальні» діаграми перебігу даних процесів рис. 5. За результатами випробувань моделювання динаміки ущільнення та руйнування родючого шару ґрунту робота Ω_1 витрачена ущільнення ґрунту може бути визначена як площа A_1 діаграми I:

$$\Omega_1 = \int_{A_0}^{A_1} PH(t) \cdot dl_1, \quad (5)$$

і, відповідно робота Ω_2 витрачена на руйнування структурних формувань ґрунту, визначена за площею A_2 діаграми II, становитиме:

$$\Omega_2 = \int_{A_0}^{A_2} PH(t) \cdot dl_2. \quad (6)$$

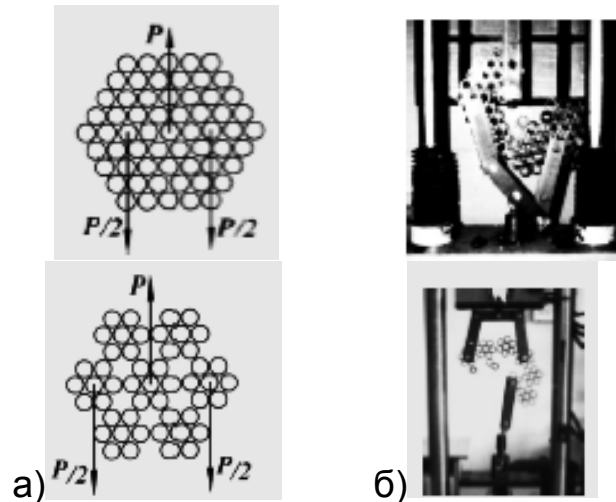


Рис. 4. Послідовність механічні випробувань моделі родючого шару ґрунту при імітації руйнування структурних формувань: а – схема навантаження моделі, б – практична реалізація експерименту.

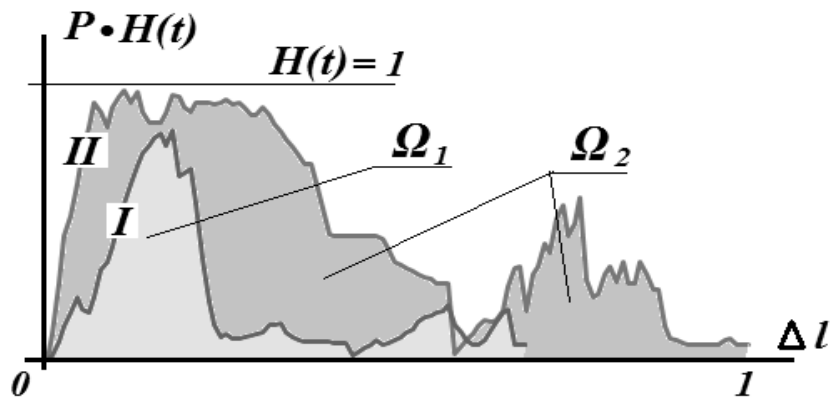


Рис. 5. Діаграми механічних випробувань моделей родючого шару ґрунту: I – імітація процесу ущільнення, II – імітація процесу руйнування структурних формувань поверхневих шарів.

Числове інтегрування діаграм, наведених на рис. 5, дозволяє встановити:

$$\Omega_{\Sigma} = 1,0 \begin{cases} \Omega_1 = 0,222 \\ \Omega_2 = 0,778 \end{cases} = 0,222 + 0,778$$

Співвідношення к часток повної роботи Ω_{Σ} зовнішніх сил, які витрачаються деформування і руйнування родючого шару ґрунту при заданій структурі та міцності, поміж роботою Ω_1 ущільнення і

роботою Ω_2 руйнування структурних формувань поверхневих шарів ґрунту, становитиме:

$$k = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{0,778}{0,222} = 3,50. \quad (7)$$

Таким чином, розроблений метод деформації та руйнування структури ґрунту дозволяє в лабораторних умовах змоделювати вплив ходових систем на родючий шар ґрунту в залежності від його структури та визначити співвідношення критичної деформації та параметрів які призводять до руйнування відповідної структури ґрунту. Отримані результати моделювання дають змогу стверджувати про можливість визначення критичних значень навантажень деформації та руйнування в залежності від структури та інших параметрів стану ґрунту. В подальшому для удосконалення лабораторної імітаційної моделі ґрунту планується використання різноманітних контактних клеїв, що дасть змогу розширити діапазон просторової орієнтації структур ґрунту в подальших дослідженнях.

Висновки

1. Розроблений лабораторний метод моделювання деформації та руйнування структур ґрунту, який дозволяє змоделювати вплив ходових систем на родючий шар ґрунту в залежності від його структури та властивостей ґрунту.

2. Отриманий метод дозволяє визначити співвідношення між критичною деформацією та параметрами які призводять до руйнування структури ґрунту.

Список літератури

1. *Makharoblidze R. M., Lagvilava I. M., Basilashvili B. B., Khazhomia R. M.* Theory of turn bodies of mountain tandem wheeled self-propelled chassis, In *Annals of Agrarian Science*, Volume 15, Issue 3, 2017, Pages 339–343, ISSN 1512-1887, <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.026>.
2. *Bogusław Usowicz, Jerzy Lipiec.* Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil, In *Soil and Tillage Research*, Volume 174, 2017, Pages 241–250, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>.
3. *Gholamhossein Shahgholi, Mohammadreza Abuali.* Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer, In *Journal of Terramechanics*, Volume 59, 2015, Pages 19–25, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>.
4. *Per Schjøning, Mathieu Lamandé, Lars J. Munkholm, Henning S. Lyngvig, Janne Aa. Nielsen.* Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils, In *Soil and Tillage Research*, Volume 163, 2016, Pages 298–308, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.003>.
5. *Голуб Г. А., Кухарець С. М.* Двоємнісна модель гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2015. Вип. 212, ч. 2. С. 302–307.

6. *Shoya Higa, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida*. Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil, In *Journal of Terramechanics*, Volume 62, 2015, Pages 63–73, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001>.
7. *Vidas Damanauskas, Algirdas Janulevičius*. Differences in tractor performance parameters between single-wheel 4WD and dual-wheel 2WD driving systems, In *Journal of Terramechanics*, Volume 60, 2015, Pages 63–73, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.06.001>.
8. *Кушнарев А. С., Кочев В. И.* Механико-технологические основы обработки почвы. Киев. Урожай. 1989. 144 с.
9. *Кухарець С. М., Забродський П. М.* Напружений стан ґрунту і процеси структуроутворення при обробітці дисковими робочими органами. Вісник ЖНАЕУ. 2017. № 1 (58), т. 1. С. 240–248.
10. *Junlong Guo, Haibo Gao, Liang Ding, Tianyou Guo, Zongquan Deng*. Linear normal stress under a wheel in skid for wheeled mobile robots running on sandy terrain, In *Journal of Terramechanics*, Volume 70, 2017, Pages 49–57, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.01.004>.
11. *Иванов П. Л.* Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях. Ленинград. Издво ЛПИ. 1978. 52 с.
12. *Исследования по физике грунтов. Элементы физики дисперсных систем применительно к грунтам и почвам.* Москва-Ленинград. ОНТИ. 1937. 135 с.
13. *Дидух Б. И.* Упругопластическое деформирование грунтов: монография. Москва. Изд-во УДН. 1987. 166 с.
14. *Кандауров И. И.* Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Ленинград. Стройиздат. 1988. 28 с.

References

1. *Makharoblidze, R. M., Lagvilava, I. M., Basilashvili, B. B., Khazhomia, R. M.* (2017). Theory of turn bodies of mountain tandem wheeled self-propelled chassis, In *Annals of Agrarian Science*, Volume 15, Issue 3, 339–343, ISSN 1512-1887, <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.026>.
2. *Bogusław Usowicz, Jerzy Lipiec.* (2017). Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil, In *Soil and Tillage Research*, Volume 174, 241–250, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>.
3. *Gholamhossein Shahgholi, Mohammadreza Abuali.* (2015). Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer, In *Journal of Terramechanics*, Volume 59, 19–25, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>.
4. *Per Schjønning, Mathieu Lamandé, Lars J. Munkholm, Henning S. Lyngvig, Janne Aa. Nielsen.* (2016). Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils, In *Soil and Tillage Research*, Volume 163, 298–308, <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.003>.
5. *Golub, G. A. Kuharets, S. M.* (2015). Model of the humus state of the soil environment in agroecosystems. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK.* Kiev. Vol. 212, part 2. 302–307.
6. *Shoya Higa, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida.* (2015). Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil, In *Journal of Terramechanics*, Volume 62, 63–73, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001>.

7. *Vidas Damanauskas, Algirdas Janulevičius.* (2015). Differences in tractor performance parameters between single-wheel 4WD and dual-wheel 2WD driving systems, In *Journal of Terramechanics*, Volume 60, 63–73, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.06.001>.
8. *Kushnarev, A. S., Kochev, V. S.* (1989). Mechanical-technological bases of processing of soil. Kiev. Harvest. 144.
9. *Kuharets, S. M., Makarov, P. M.* (2017). Stress state of the soil and the processes of structure formation in the processing of disk working bodies. Herald, INEU. No 1 (58), vol. 1. 240–248.
10. *Junlong Guo, Haibo Gao, Liang Ding, Tianyou Guo, Zongquan Deng.* (2017). Linear normal stress under a wheel in skid for wheeled mobile robots running on sandy terrain, In *Journal of Terramechanics*, Volume 70, 49–57, ISSN 0022-4898, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.01.004>.
11. *Ivanov, P. L.* (1978). Liquefaction and compaction of non cohesive soils under dynamic effects. Leningrad. LPI. 52.
12. *Research on the physics of soils.* (1937). Elements of physics of dispersed systems in relation to soil and soil. Moscow-Leningrad. ONTI. 135.
13. *Didukh, B. I.* (1987). Elastic-plastic deformation of soils. Moscow. UDN. 166.
14. *Kandaurov, S. S.* (1988). Mechanics of granular media and its application in construction. Leningrad. Stroyizdat. 28.

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЧВЫ

Б. А. Шелудченко, В. В. Чуба, В. Р. Билецкий

Аннотация. *Во время работы машинно-тракторных агрегатов происходит контактное взаимодействие колеса с грунтом. При взаимодействии наблюдается деформирование и уплотнения почвы, что отрицательно влияет на изменение его структуры. Для уменьшения негативного воздействия на почву необходимо определять оптимальные конструкционные параметры колесных движителей машинно-тракторных агрегатов. А для этого необходимо использовать имитационные модели грунту, являются адекватными реальным грунтовым формированием.*

В статье рассмотрены лабораторный метод оценки структурных моделей почвы на основе модели сплошной среды.

Применение модели сплошной среды в аэромеханике почв позволяет сразу же перенести в последнюю целый ряд решений, которые были получены в механике сплошной среды. Как показывает опыт, применение в задачах механики грунтов решений, найденных в теории упругости, теории пластичности и в других разделах механики сплошной среды, во многих случаях позволяет правильно оценить порядок ожидания деформаций и получить приблизительный характер их распределения в почвенном среде.

В статье также разработан метод деформации и разрушения структуры почвы, позволяет в лабораторных условиях смоделировать влияние ходовых систем на плодородный слой почвы в зависимости от его структуры и определить соотношение критической деформации и параметров которые приводят к разрушению соответствующей структуры почвы. Полученные результаты моделирования позволяют утверждать о возможности определения критических значений нагрузок деформации и разрушения в зависимости от структуры и других параметров состояния почвы.

Ключевые слова: почва, сечение, разрывная машина, пятно контакта, пористость

DEVELOPMENT OF LABORATORY METHOD FOR EVALUATING STRUCTURAL SOIL MODELS

B. A. Sheludchenko, V. V. Chuba, V. R. Biletskiy

Abstract. *During the work of machine-tractor units there is a contact between the wheel and the ground. In the interaction there is deformation and consolidation of the soil, which adversely affects the change in its structure. In order to reduce the negative impact on the soil, it is necessary to determine the optimal constructional parameters of the wheeled motors of machine-tractor aggregates. For this it is necessary to use simulation models of the soil that are adequate to the actual soil formation.*

The article deals with the laboratory method for evaluating structural soil models based on the model of continuous medium.

The application of the model of a continuous medium in the soil mechanics allows one to immediately transfer to the last range of solutions obtained in the mechanics of the continuous medium. Experience shows that in applications of soil mechanics solutions found in the theory of elasticity, plasticity theory, and in other sections of continuum mechanics, in many cases it is possible to correctly evaluate the order of the deformation expectation and to obtain an approximate character of their distribution in the soil environment.

The article also develops a method of deformation and destruction of the soil structure, which allows, in laboratory conditions, to simulate the influence of running systems on the fertile soil layer, depending on its structure, and to determine the correlation of critical deformation and parameters that lead to the destruction of the corresponding structure of the soil. The obtained modeling results allow us to assert about the possibility of determining the critical loads of deformation and fracture loads depending on the structure and other parameters of the soil state.

Key words: *soil, section, tear-off machine, contact spot, porosity*