

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН С ГРУНТАМИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

**С. В. Савельев,**

профессор, д-р техн. наук

**М. К. Шушубаева,**

соискатель

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск

**Аннотация.** Предложено модельное описание взаимодействия рабочих органов уплотняющей машины с уплотняемым грунтом, представленным в виде нескольких элементарных упруговязкопластичных столбов. Решается задача изучения состояния грунтовой среды, в процессе уплотнения земляного полотна в транспортном строительстве. Разработан алгоритм решения системы уравнений в среде Maple 11.

**Ключевые слова:** модуль деформации, грунтовая среда, динамическое напряжение, цикл, вибрационная сила, виброускорение.

## THE USE OF AN INNOVATIVE APPROACH TO MODELING THE INTERACTION OF THE WORKING BODIES OF THE COMPACTOR MACHINE WITH EARTH LEAF SOIL IN THE CONSTRUCTION OF TRANSPORTATION FACILITIES

**Abstract.** A model description of the interaction of the working bodies of the compacting machine with the soil base of the road presented in the form of several elementary elastic-viscoplastic pillars is proposed. The problem of studying the state of the soil environment is being solved in the process of compaction of the roadbed during transport construction. An algorithm for solving the system of equations in the Maple 11 environment is developed.

**Keywords:** deformation modulus, soil medium, dynamic stress, cycle, vibration force, vibration acceleration.

Изменение экономической ситуации в любой стране невозможно без развития любых инфраструктурных объектов транспортной сети, и автомобильных дорог в частности. Автомобильные дороги являются важнейшей составляющей социально-экономического развития государства, а для Российской Федерации с ее огромной территорией проблема транспортной доступности стоит особенно остро. Наиболее важной операцией при устройстве автомобильных дорог является технологическая операция уплотнения конструктивных слоев автодороги. Особенно важно уделять внимание качественному уплотнению грунтов земляного полотна [1]. Именно на грунтовом основании расположены дорожное основание и дорожное покрытие. Поэтому недоуплотнение земляного полотна приведет к разрушению верхних технологических слоев, а значит, и к огромным убыткам. От качества уплотнения всех слоев автодороги зависит ее прочность, долговечность, устойчивость к внешним воздействиям от различного вида транспорта.

Моделирование процесса создания и развития напряженно-деформируемого состояния (НДС) в грунтовом основании автомобильной дороги, является актуальной задачей, решение которой позволяет спрогнозировать интенсивность процесса уплотнения, а также обосновать конструктивные и режимные параметры уплотняющей машины. Воздействие внешней вынуждающей силы от дорожного уплотнителя на деформируемую среду, происходит с определенными частотами  $\omega$  и амплитудой  $F$ . Дифференциальное уравнение движения объема обрабатываемой грунтовой среды, запишем в виде [1–3]:

$$\rho V \Delta \ddot{x} + b_2 \Delta \dot{x} + c_2 \Delta x = F_0 \sin \omega t + F_{ct}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем столба среды, м<sup>3</sup>;  $\Delta x$  — деформация среды, м;  $m = \rho V$  — приведенная масса среды, кг;  $F_{ct} = Mg$  — сила тяжести от массы сооружения, Н;  $b_2$  — коэффициент вязкого трения объема, Нс/м;  $c_2$  — жесткость столба среды, Н/м.

Определим решение:

$$\Delta x(t) = \frac{a_0 k \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2 \omega^2} + \frac{a_0 \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2 \omega^2}}. \quad (2)$$

Поскольку интенсивность деформирования в данной колебательной системе значительно зависит от значения внешней силы и частоты ее приложения, имеет смысл рассматривать решение только для вынужденных колебаний. Получим общую сумму циклов, пластических деформаций для достижения нормативной плотности

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (3)$$

Суммарную работу, требуемую на уплотнение для достижения нормативного коэффициента уплотнения грунта (достижение нормативной плотности и прочности грунта), можно определить в соответствии с достигаемыми граничными условиями (4).

$$\frac{\rho_0}{\rho_{\text{конеч}}} = \frac{h_0 - \Delta x}{h_0}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — плотность деформируемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{конеч}}$  — требуемая плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Определим напряжения, возникающие в деформируемой грунтовой среде на единичном цикле, колебательного процесса:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_i} = \frac{c_{2i} \Delta x_i}{S_i(x)}. \quad (5)$$

Предлагается оригинальный подход, когда грунтовая среда рассматривается как система по-

следовательно соединенных элементарных столбцов [2–8], которые поочередно подвергаются деформирующему воздействию от рабочего органа уплотнителя. Выявим решение системы уравнений движения для нескольких сосредоточенных масс [5].

$$\begin{cases} m_1 \Delta \ddot{x}_1 + b_{2'} (\Delta \dot{x}_1 - \Delta \dot{x}_2) + c_{2'} (\Delta x_1 - \Delta x_2) - \\ - b_1 (\Delta \dot{x}_{p_0} - \Delta \dot{x}_1) - c_1 (\Delta x_{p_0} - \Delta x_1) = F_\theta(t); \\ m_2 \Delta \ddot{x}_2 + b_{2''} (\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{x}_3) - b_{2'} (\Delta \dot{x}_1 - \Delta \dot{x}_2) + \\ + c_{2''} (\Delta x_2 - \Delta x_3) - c_{2'} (\Delta x_1 - \Delta x_2) = m_2 g; \\ m_3 \Delta \ddot{x}_3 + b_{2''} \Delta \dot{x}_3 - b_{2''} (\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{x}_3) + \\ + c_{2''} \Delta x_3 - c_{2''} (\Delta x_2 - \Delta x_3) = m_3 g, \end{cases} \quad (6)$$

$$A(x) = -\Delta x \omega^2 = f(\sigma(x)), \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить виброускорения, возникающие в деформируемой грунтовой среде. Значения виброускорений пропорциональны значениям напряжений и являются критерием эффективности протекания процесса уплотнения [2; 4; 8].

Представлены исследования процесса уплотнения грунтов земляного полотна при строительстве автомобильных дорог. В качестве инструмента исследований использовались методы математического моделирования. Рассмотрен анализ состояния вопроса в сфере влияния вибрационных рабочих органов дорожных катков на развитие напряженно-деформируемого состояния уплотняемых грунтовых сред. Математическое моделирование описания процесса вибрационного деформирования упруговязкопластичной грунтовой среды проводилось в программной среде Maple 11.

### Список литературы

1. Савельев С. В., Пермяков В. Б., Михеев В. В., Потеряев И. К. Инновационная уплотняющая техника и рекомендации по ее использованию для ресурсосберегающих технологий дорожного строительства : монография. Омск : СибАДИ, 2019. 193 с.
2. Тюремнов И. С., Новичихин А. А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами : монография [Электронный ресурс] / Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2018. 143 с. 1 электрон. опт. диск.
3. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / под ред. Э. И. Григолюка ; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
4. Савельев С. В., Михеев В. В. Исследования напряженно-деформированного состояния упруго-вязкой среды при вибрационном нагружении // Вестн. СибАДИ : научный рецензируемый журнал. 2012. № 3 (25). С. 83–87.
5. Saveliev S. V., Mikheyev V. V., Permyakov V. B. Complex approach to the optimal energy efficient work pattern for vibratory roller Journal of Physics // Conference Series. 2019. № 1260 (11). P. 112–120.
6. Chang G. K., Xu Qinwu, Rasmussen R., Merritt D., Michael L., White D., Horan B. Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils. Aggregate Base and Asphalt Pavement Materials — IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology. НИПТ-10. 2010. P. 118.
7. Кустарев Г. В., Павлов С. А., Жарцов П. Е. Анализ факторов, влияющих на качество процесса уплотнения // Механизация строительства. 2013. № 4. С. 6–10.
8. Verruijt A. Solid dynamics // Delft University of Technology. Netherlands, 2008. 425 p.