

# ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЖЕСТКОСТИ УПРУГО-ДЕФОРМИРУЕМОГО ОСНОВАНИЯ

© 2025 г. Владимир Сергеевич Выплавень<sup>1\*</sup>, С.А. Бехер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191*

\* - vladimir97927@gmail.com

В настоящее время для контроля и обеспечения качества грунтовых оснований широко используются устройства, основанные на использовании ударно-динамических источников приложения нагрузки [1, 2]. Работа таких устройств сосредоточена на измерении значения прогиба грунта под нагрузочной плитой датчиком акселерометра. Жесткость оценивается только по максимальному (пиковому) значению прогиба. Подход, основанный на оценке пиковых значений, приводит к значительным ошибкам измерений [3]. Для решения этой проблемы используется метод обратной задачи. Это позволит учитывать как динамику процесса ударного нагружения, так и влияние неконтролируемых мешающих факторов, связанных с нелинейной жесткостью и просадкой грунта под нагрузкой.

Метод обратной задачи основан на математическом моделировании процесса ударно-динамического нагружения. Результатом моделирования являются значения ускорения скорости и перемещения нагрузочной плиты. Параметры модели учитывают нелинейную жесткость контролируемого основания и просадку от ударной нагрузки [4, 5]:

$$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_1 \cdot g \\ (m_2 + \Delta m) \cdot x_2'' = -k_2(x_2) + k_1 \cdot (x_1 - x_2) - c_2 \cdot x_2' - (m_2 + \Delta m) \cdot g' \end{cases}$$

$$k_2(x_2) = k_{21} + k_{22} \cdot x_2,$$

$$x_3 = x_2 - \frac{F_{max}}{k_2},$$

где  $m_1$  – масса падающего груза, кг;  $x_1$  – перемещение падающего груза, м;  $k_1$  – жесткость упругого элемента, расположенного на штампе, Н;  $m_2$  – масса штампа, кг;  $\Delta m$  – инерционная масса подвижного грунта, кг;  $x_2$  – перемещение штампа, м;  $k_{21}, k_{22}$  – коэффициенты функции жесткости основания  $k_2(x_2)$ ;  $c_2$  – коэффициент демпфирования основания, кг · с/м;  $x_3$  – просадка основания, м;  $F_{max}$  – максимальная нагрузка, при которой возникает просадка основания, Н.

После измерения ускорения нагрузочной плиты параметры модели подбираются таким образом, чтобы минимизировать разницу между смоделированными и экспериментальными сигналами. Это позволяет определить упругие характеристики грунта путем сопоставления модельных и экспериментальных результатов измерений.

Применимость метода численного решения обратной задачи исследовалась при сравнительных испытаниях измерения статического и динамического модуля деформации уложенного балласта железнодорожного пути. По результатам испытаний установлено, что измерения динамического модуля деформации согласуются со значениями, полученными при статических испытаниях, с погрешностью не более 8 %. Также обнаружено влияние условий положения камней балласта под нагрузочной пластиной на результаты измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. Некоторые предпосылки применения динамического плотномера к определению модуля деформации грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2018. Т. 9. № 3. С. 28–35. DOI:10.15593/2224-9826/2018.3.03.
2. Kuttah D. Determining the resilient modulus of sandy subgrade using cyclic light weight deflectometer test // Transportation Geotechnics. 2021. № 27. P. 100482. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100482.
3. Adam C., Paulmichl I. Computational assessment of the dynamic load plate test with the light falling weight device // ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, EU, 2007.
4. Выплавень В.С., Бехер С.А. Упруго-линейная модель динамического контроля жесткости балластного слоя железнодорожного пути // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 4–13. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13.
5. Выплавень В.С., Бехер С.А. Использование численного решения обратной задачи для совершенствования метода динамического штампа для контроля балластного слоя // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27. № 11(317). С. 4–13. DOI 10.14489/td.2024.11.pp.004-013.