Kravets, I., Kovalchuk, V., & Karnakov, I. (2024). Experimental estimation of the degree of compaction of the roadbed by the propagation time of elastic shock waves. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal, 32*, __-__. Ostrava: Tuculart Edition, European Institute for Innovation Development. (In Ukrainian)

DOI: 10.47451/inn2024-08-02

The paper is published in Crossref, ICI Copernicus, BASE, Zenodo, OpenAIRE, LORY, Academic Resource Index ResearchBib, J-Gate, ISI International Scientific Indexing, ADL, JournalsPedia, Scilit, EBSCO, Mendeley, and WebArchive databases.

Ivan B. Kravets, Doctor of Philosophy, Department of Railway Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv Research Institute for Forensic Expertise. Lviv, Ukraine.
ORCID: 0000-0002-2239-849X, Scopus: 57221338019
Vitalii V. Kovalchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Railway Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.
ORCID: 0000-0003-4350-1756, Scopus: 57192678464
Ihor A. Karnakov, Postgraduate Student, Department of Bridges and Tunnels, National Transport University, Kyiv, Ukraine.
ORCID: 0000-0002-8751-9934, Scopus: 58577562500

Experimental estimation of the degree of compaction of the roadbed by the propagation time of elastic shock waves

Abstract: The study is a model of a roadbed with a heterogeneous structure. The method of laboratory experimental studies for determining the accelerations of elastic waves in the model of an inhomogeneous roadbed at different degrees of density is presented. Experimental studies were conducted using the developed laboratory setup and it was found that with increasing density, The Wave travel time decreases, since in a dense medium the wave propagation speed is higher. It is determined that the shortest Wave travel time is obtained to the A3 sensor and it is 0.0016 ms in case of non – compacted state, in case of intermediate compaction – 0.0015 ms and at the maximum compaction – 0.0012 ms. The travel time of the wave to the sensors A2 and A4, which are located at the same distance from the drummer, is almost the same and is 0.0022 Ms. and 0.002 ms in case of non – compacted state, in case of intermediate compaction-0.0018 Ms. and 0.0019 ms and at the maximum compaction – 0.001 ms and 0.0009 ms. Experimental studies will help determine the degree of compaction of the soil of the roadbed based on the time and speed of propagation of elastic waves. It is worth noting that the created laboratory installation makes it possible to study the propagation of elastic waves for a model of the roadbed, which can be designed from different types of soils. In addition, it makes it possible to consider various inhomogeneities that may occur during the operation of the roadbed of a railway track.

Keywords: roadbed, acceleration sensor, elastic wave, degree of compaction, inhomogeneous medium.

Іван Богданович Кравець, Ph.D. технічних наук, кафедра залізничного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, Україна.
ORCID: 0000-0002-2239-849X, Scopus: 57221338019
Віталій Володимирович Ковальчук, доктор технічних наук, професор, кафедра залізничного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, Україна.
ORCID: 0000-0003-4350-1756, Scopus: 57192678464

Ігор Анатолійович Карнаков, аспірант, кафедра мости та тунелі, Національний транспортний університет. Київ, Україна.
ORCID: 0000-0002-8751-9934, Scopus: 58577562500

Експериментальна оцінка ступеня ущільнення земляного полотна за часом поширенням пружних хвиль удару

Анотація: Об'єктом досліджень є модель земляного полотна з неоднорідною структурою. Наведено методику лабораторних експериментальних досліджень для визначення прискорень пружних хвиль у моделі неоднорідного земляного полотна при різних ступенях щільності. Проведено експериментальні дослідження за допомогою розробленої лабораторної установки та встановлено, що при збільшенні щільності час проходження хвилі зменшується, оскільки у щільному середовищі швидкість поширення хвилі є вищою. Визначено, що найменший час проходження хвилі отримано до датчика А3 і він становить 0,0016 мс. при неущільненому стані, при проміжному ущільненні – 0,0015 мс. та при максимальному ущільненні – 0,0012 мс.. Час проходження хвилі до датчиків А2 та А4, які розташовані на однаковій відстані від ударника, практично однаковий і становить 0,0022 мс. та 0,002 мс. при неущільненому стані, при проміжному ущільненні – 0,0018 мс. та 0,0019 мс. та при максимальному ущільненні – 0,001 мс. та 0,0009 мс. Експериментальні дослідження допоможуть визначити ступінь ущільнення ґрунтів земляного полотна на основі часу та швидкості поширення пружних хвиль. Варто зазначити, що створена лабораторна установка дозволяє проводити дослідження поширення пружних хвиль для моделі земляного полотна, яке може бути спроектоване з різних типів ґрунтів. Крім того, вона дає можливість враховувати різні неоднорідності, які можуть виникати під час експлуатації земляного полотна залізничної колії.

Ключові слова: земляне полотно, датчик прискорень, пружна хвиля, ступінь ущільнення, неоднорідне середовище.

Вступ

Залізничний транспорт України є важливою ланкою у забезпеченні обороноздатності держави. Від його стану залежить функціонування багатьох галузей народного господарства. Збільшення пропускної спроможності та підвищення швидкості руху поїздів є важливим завданням.

Одним з основних елементів будови залізничної колії є земляне полотно (*Даніленко Е. І., 2010*). В умовах експлуатації земляне полотно під впливом зростаючих навантажень і природних факторів, зазнає деформацій та неоднорідностей, які можуть призвести до втрати несучої здатності та стійкості. Особливо небезпечні деформації глинистих ґрунтів, які призводять до утворення ослаблених зон, прихованих тріщин, втрату щільності ґрунтів і як наслідок розвиток виплесків (*Кравець І., 2021*) як приведено в додатку (*Рисунок 1*) та інших дефектів (*Дяченко Л. і ін., 2001*). Це вимагає розробки проектних рішень щодо підвищення його несучої здатності та довговічності (*Дубінчик О. і ін., 2023; Kravets I., 2021*).

Одним із вагомих показників надійної роботи земляного полотна є забезпечення проектного ступеню щільності ґрунтів (*Даніленко Е. І., 2010*). Тому оцінка та контроль щільності ґрунтів земляного полотна, як в умовах будівництва так і експлуатації, є актуальним. Зростання щільності ґрунтів знижує деформації та підвищує стійкість земляного полотна. Одним із методів, які можна застосувати для оцінки щільності ґрунтів земляного полотна є метод вимірювання швидкості поширення звукових хвиль удару (*Karnakov I. і ін., 2023*; *Kovalchuk і ін., 2023a*; *Kovalchuk і ін., 2023b*). На сьогоднішній день є ряд досліджень, стосовно застосування інерційних методів для оцінки ступеня щільності баластного шару та ґрунтів земляного полотна залізниці, які приведено у працях (*Kovalchuk і ін., 2021*; *Przybylowicz і ін., 2020*; *Sysyn і ін., 2020*; *Sysyn і ін., 2019*). Крім цього інерційні технології використовуються для оцінки ступеню ущільнення ґрунтової засипки транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій (*Онищенко А. і ін., 2024*).

У роботі (*Przybylowicz і ін., 2020*) проведено дослідження однорідного щебеневого шару методом інерційних вимірювань для оцінки якості підбивки баластного шару залізничної колії. Дослідження ступеня ущільнення щебеневого шару баластоущільнювальними машинами шляхом комплексної динамічної та кінематичної інтерпретації імпульсного відклику приведено у роботі (*Sysyn і ін., 2019*). У праці (*Sysyn і ін., 2020*) приведено результати лабораторних експериментів щодо розповсюдження пружних хвиль в щебеневому шарі у залежності від ступеня його ущільнення. У праці (*Kovalchuk і ін., 2021*) зазначено, що поширення пружних хвиль через зернисте середовище залежить від мінералогічного та гранулометричного складу зерен, а також від щільності ґрунтового шару, тобто кількості контактів між зернами. Вимірюючи швидкість хвиль після кожного ущільнення ґрунту, можна визначити ступінь його ущільнення. Із збільшенням щільності підвищується кількість контактів і тертя між зернами, а пористість зменшується. Хоча швидкість хвилі не залежить прямо від міцності на зсув. Вона служить якісним показником змін у міцності, особливо в неоднорідних ґрунтах. У крупнозернистих ґрунтах міцність на зсув і швидкість поперечної хвилі залежать від щільності зерен (*Dashwood і ін., 2020*). Також на поширення хвиль впливає і вологість середовища, такі дослідження проведено у роботі (*Seoungmin і ін., 2023*).

Із аналізу наукових праць (*Kovalchuk і ін., 2021*; *Przybylowicz і ін., 2020*; *Sysyn і ін., 2020; Sysyn et al., 2019*) встановлено, що в основному дослідження ступеню ущільнення земляного полотна проводилися на моделях із однорідною структурою. Проте відсутні експериментальні дослідження, щодо поширення хвиль та їх прискорень у неоднорідному ґрунтовому середовищі. Тому проведення лабораторних експериментальних досліджень щодо поширення хвиль у неоднорідних ґрунтах є актуальною задачею наукових досліджень. Це дозволить встановити залежність значення прискорень від ступеня ущільнення ґрунту з неоднорідностями.

Матеріали і методи

Об'єктом досліджень є модель земляного полотна, яка виконана з неоднорідного ґрунту у скляному ящику розмірами 1,0х0,5х0,7 м. Визначення прискорень пружних хвиль здійснюється на моделі земляного полотна, що наведена у Додатку (*Рисунок 2*). Дослідження проведено при різних ступенях ущільнення неоднорідного ґрунту земляного полотна.

Експериментальні лабораторні дослідження складалися із послідовності циклів ущільнення ґрунтів моделі земляного полотна та запису прискорень проходження пружних хвиль ударів. Удар задавався ударником по круглому штампу, що розташований по центру моделі як наведено у Додатку (*Рисунок 3*). Експеримент проводили для трьох станів моделі: не ущільненому стані; проміжне ущільнення; максимальне ущільнення.

Після кожного циклу ущільнення здійснювали запис поширення хвилі у середовищі моделі неоднорідного земляного полотна за допомогою інерційного приладу (*Kovalchuk і ін., 2021*; *Кравець І. 2021*). Для визначення оптимального значення часу поширення хвилі при кожному стані (не ущільненому, проміжне ущільнення, максимальне ущільнення) моделі неоднорідного земляного полотна удари (імпульси) задавались по п'ять разів.

Результати

Результати записів часу поширення хвиль у моделі земляного полотна при не ущільненому, проміжному ущільненню та максимальному ущільненню ґрунту наведено в Додатку (*Рисунок 4*). Відповідно до результатів записів (*Рисунок 4а*) при не ущільненому стані час проходження хвилі від початку задання імпульсу до аналогових датчиків прискорень становить: до датчика А1 – 0,0004 мс.; до датчика А2 – 0,0022 мс.; до датчика А3 – 0,0015 мс.; до датчика А4 – 0,002 мс. та до датчика А5 – 0,0026 мс.

При проміжному ущільненні ґрунту моделі земляного полотна (*Рисунок 4b*), час проходження хвилі від початку задання імпульсу до аналогових датчиків прискорень становить: до датчика А1 – 0,0002 мс.; до датчика А2 – 0,0018 мс.; до датчика А3 – 0,0016 мс.; до датчика А4 – 0,0019 мс. та до датчика А5 – 0,0021 мс.

При максимальному ущільненні ґрунту моделі земляного полотна (*Рисунок 4с*), час проходження хвилі від початку задання імпульсу до аналогових датчиків прискорень становить: до датчика А1 – 0,0001 мс.; до датчика А2 – 0,001 мс.; до датчика А3 – 0,0012 мс.; до датчика А4 – 0,0009 мс. та до датчика А5 – 0,0012 мс.

Для кращої наглядності результатів, отримані експериментальні дані наведено у додатку (*Таблиця 1*), яка приведена в Додатку. Як бачимо із результатів експериментальних досліджень, при підвищені ступеню ущільнення ґрунту, зменшується час поширення звукової хвилі удару. Це говорить про те, що швидкість поширення хвилі в щільному середовищі є вищою.

Обговорення

Проведення лабораторних експериментальних досліджень щодо поширення хвиль у неоднорідних ґрунтах є важливою науковою задачею досліджень. Такі експериментальні дослідження дозволять визначати ступінь ущільнення ґрунтів земляного полотна за часом та швидкістю поширення пружних хвиль удару. Слід зазначити, що розроблена лабораторна установка, яка наведена в Додатку (*Рисунок 2*; *Рисунок 3*), дозволяє виконати дослідження поширення пружних хвиль для моделі земляного полотна яка може бути запроектована із різного роду ґрунтів. Крім цього вона дозволяє задавати різні неоднорідності, які можуть виникати при експлуатації земляного полотна залізничної колії.

Результати експериментальних досліджень моделі земляного полотна при різних ступенях ущільнення ґрунтів показали, що при збільшенні щільності час проходження хвилі зменшується (*Рисунок 4*). Відповідно до схеми (*Рисунок 3*) бачимо, що датчик А3 розташований знаходиться на найменшій відстані до ударника, тому і час (*Таблиця 1*) проходження хвилі є найменший. Датчики А2 та А4 розташовані на однаковій відстані від ударника відповідно, і час проходження хвилі, майже однаковий з незначним відхиленням. Це пояснюється наявністю неоднорідного включення у вигляді глини. Також слід зазначити, що час проходження хвилі до датчика А1 є найменший через те, що він розташований у місці де відсутня неоднорідність земляного полотна, тобто швидкість хвилі в такому середовищі є найвищою.

Висновки

Розроблена лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень поширення хвиль у ґрунтах із різною щільністю та неоднорідностями, дозволять визначати ступінь ущільнення ґрунтів земляного полотна за часом поширення пружних хвиль удару.

За отриманими значеннями часу проходження хвиль удару у моделі земляного полотна встановлено, що при збільшенні щільності час проходження хвилі зменшується, оскільки у щільному середовищі швидкість поширення хвилі є вищою. Відповідно найменший час проходження хвилі отримано до датчика А3 і він становить 0,0016 мс. при неущільненому стані, при проміжному ущільненні – 0,0015 мс. та при максимальному ущільненні – 0,0012 мс. Час проходження хвилі до датчиків А2 та А4, які розташовані на однаковій відстані від ударника, практично однаковий і становить 0,0022 мс. та 0,002 мс. при неущільненому стані, при проміжному ущільненні – 0,0018 мс. та 0,0019 мс. та при максимальному ущільненні – 0,001 мс. та 0,0009 мс.

Список джерел інформації:

Даніленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом. Підручник для вищих навчальних закладів. У 2-х томах. Том 1. Київ: Інпрес, 2010. [Danilenko, E. I. (2010). *Railway track. Device, design and calculations, interaction with rolling stock. Textbook for higher educational institutions* (Vol. 1). Kiev, Inpres. (In Ukrainian)]

Дубінчик, О., Мірошник, В., Тютькін, О. Обґрунтування концепцій підсилення земляного полотна в Україні та Європейському Союзі // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2023. – № 24. – С. 22-30. [Dubinchik, O., Miroshnik, V., & Tyutkin, O. (2023). Substantiation of concepts of roadbed reinforcement in Ukraine and the European Union. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, *24*, 22-30. (In Ukrainian)]. https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291779

Дяченко, Л., Кислий, Г., Курач, В. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України (ЦП-0072). Арт-прес, 2001. [Dyachenko, L., Kislyy, G., & Kurach, V. (2001). Instructions for the maintenance of the roadbed of Railways of Ukraine (CP-0072). Art Press]

Кравець, І. Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії [Дисертація на здобуття ступеню доктора філософії. Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна]. Дніпро, 2021. [Kravets, I. (2021). *Methods for estimating and increasing the load-bearing capacity of a non-uniform roadbed of a railway track*. [Doctor of Philosophy dissertation, Academician V. Lazaryan Dnipro National University of Railway Transport]. (In Ukrainian)]

Онищенко, А. М., Ковальчук, В. В., Коваль, М. П.,. Карнаков, І. А., Кравець, І. Б., Торхов, А. С. (2024). Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій: проєктування, будівництво, випробування. Монографія. Київ: «Видавництво Людмила». [Onishchenko, A. M., Kovalchuk, V. V., Koval, M. P., Karnakov, I. A., Kravets, I. B., & Torkhov, A. S. (2024). *Transport structures made of metal corrugated structures: design, construction, testing. Monograph*. Kiev: "Lyudmila Publishing House"]

Dashwood, B., Gunn, D., Curioni, G., Inauen, C., Swift, R., Chapman, D. & Taxil, J. (2020). Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe. *Journal of Applied Geophysics*, *174*, 103923. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103923

Karnakov, I., Kovalchuk, V., & Onyshchenko, A. (2023). Assessment of the state of stress and deformation of metal corrugated pipe structures taking into account its diameter and thicknesses of the corrugated sheet. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 3, 33-40.

Kovalchuk, V., Karnakov, I., Onyshchenko, A., Petrenko, O., & Boikiv, R. (2023a). Assessing the stresses and magnitude of plastic hinge in a tunnel conduit made of precast metal corrugated structures taking into account the soil backfill parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *4/7*(124), 43-53. Kharkiv. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285893

Kovalchuk, V., Sysyn, M., Rad, M., & Fischer, S. (2023b). Investigation of the bearing capacity of transport constructions made of corrugated metal structures reinforced with transversal stiffening ribs. *Infrastructures*, *8*(9), 131. https://doi.org/10.3390/infrastructures8090131

Kovalchuk, V., Kravets, I., Nabochenko, O., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Pentsak, A., Petrenko, O., & Hembara, N. (2021). Devising a procedure for assessing the subgrade compaction degree based on the propagation rate of elastic waves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *1/5* (109), 6-15. Kharkiv. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225520

Kravets, I. (2021). Increasing carrying capacity subgrade of the railway track (overview). *Bulletin of Lviv National Environmental University*, *22*, 54-61. https://doi.org/10.31734/architecture2021.22.054

Przybylowicz, M., Sysyn, M., Kovalchuk, V., Nabochenko, O., & Parneta, B. (2020). Experimental and theoretical evalution of side tamping method for ballasted railway track maintenance. *Transport Problems: An International Scientific Journal*, *15*(3), 93-106. Silesian University of Technology, Gliwice, Poland. https://doi.org/10.21307/tp-2020-036

Seoungmin Lee, Dong Kook Woo, & Hajin Choi. (2023). Contactless estimation of soil moisture using leaky Rayleigh waves and a fully convolutional network. *Vadose Zone Journal*, *22*(6), e20285. https://doi.org/10.1002/vzj2.20285

Sysyn, M., Nabochenko, O., Kovalchuk, V., & Gerber, U. (2019). Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works. *Journal of Advanced Engineering*, *59*(1), 77-87. Czech Technical University in Prague. https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0077

Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., & Pentsak, A. (2020). Experimental study of railway ballast consolidation inhomogeneity under vibration loading. *International Journal for Engineering and Information Sciences*, *15*(1), 27-36. https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.3

Додаток

a *b*

Рисунок 1. Дефектні місця земляного полотна: *a* – ділянка залізничної колії з вихлюпами; *b* – втрата стійкості укосу земляного полотна через розущільнення ґрунтів

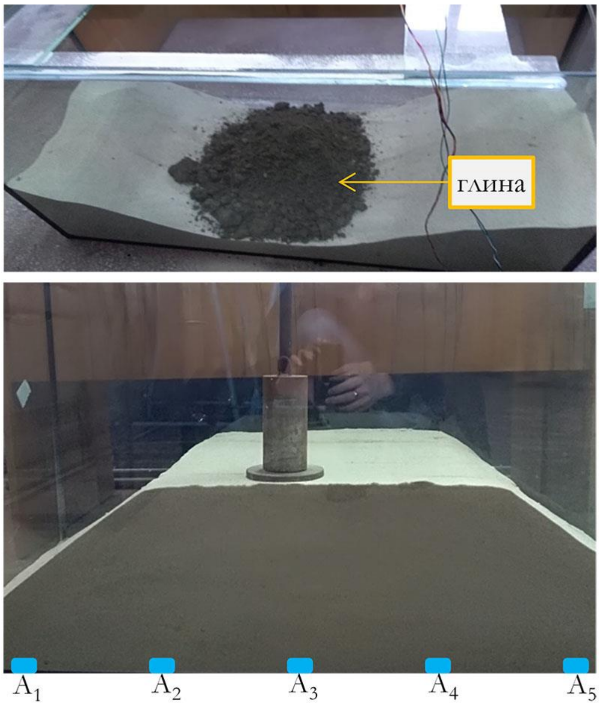


Рисунок 2. Модель земляного полотна з неоднорідним включенням: А1, А2, А3, А4, А5 – аналогові датчики прискорень

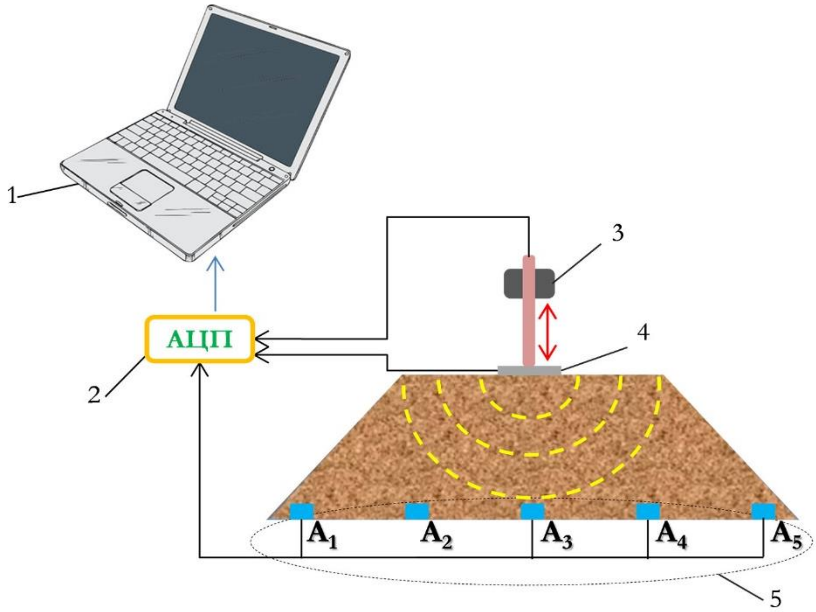
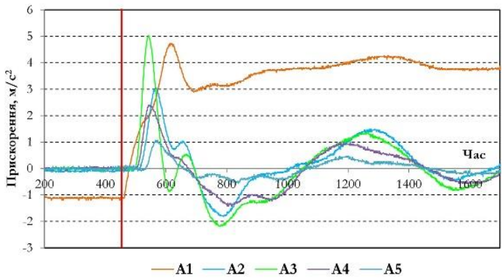
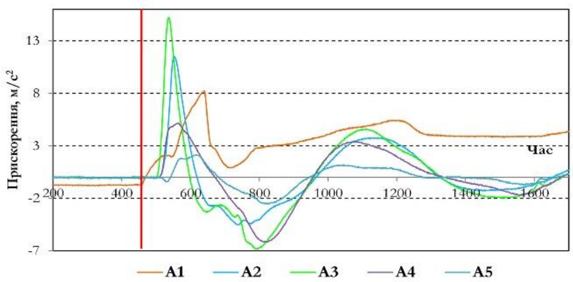


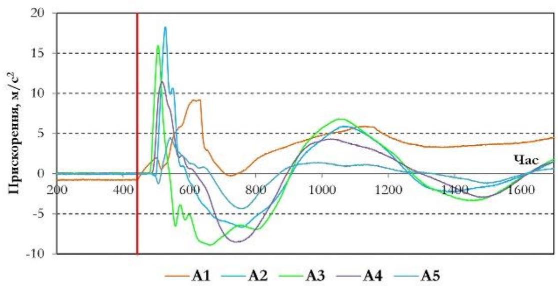
Рисунок 3. Схема лабораторної установки для проведення вимірювань: 1 – ноутбук, 2 – аналого-цифровий перетворювач, 3 – ударник, 4 – штамп, 5 – датчики прискорень



a



b



c

Рисунок 4. Записи поширення хвиль у моделі земляного полотна (A1, A2, A3, A4, A5 – аналогові датчики; вертикальна лінія – момент удару (початку задання імпульсу)): *a* – в не ущільненому стані; *b* – проміжне ущільнення; *c* – максимальне ущільнення

Таблиця 1. Результати часу проходження хвилі у моделі земляного полотна при різних ступенях ущільнення ґрунтів

Аналогові датчики прискорень / Ступінь ущільнення	A1	A2	A3	A4	A5
не ущільнено	0,0004 мс.	0,0022 мс.	0,0016 мс.	0,002 мс.	0,0026 мс.
проміжне ущільнення	0,0002 мс	0,0018 мс.	0,0015 мс.	0,0019 мс.	0,0021 мс.
максимальне ущільнення	0,0001 мс.	0,001 мс.	0,0012 мс.	0,0009 мс.	0,0012 мс.