

## ДИНАМІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ «ВАГОН-КОЛІЯ-ЗЕМПОЛОТНО» В РОЗРАХУНКАХ ТРАНСПОРТНИХ ВІДКОСІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Запропоновано динамічну інтерпретацію та розширений аналіз комп'ютерної презентаційної графіки розрахунку земляного залізничного полотна.

Предложена динамическая интерпретация и расширенный анализ компьютерной презентационной графики расчета земляного железнодорожного полотна.

The work proposes dynamical interpretation and extensive analysis of display graphics for computations of railway earth permanent way.

Задачею використання наукових досліджень є впровадження останніх у виробничий процес будівництва та експлуатації земляного полотна при переході на швидкісний рух. Особливо важливим є розробка методик розрахунку земполотна, які б включали можливість навчити спеціалістів колійних частин робити аналіз розрахунків, оскільки обмежити інженерні висновки від маси існуючих наукових напрацювань, різних теоретичних та практичних рекомендацій неможливо. Тим більше, що деякі наукові праці не завжди відповідають реальним умовам, а корегувати розрахунки та виконати аналіз робіт по відновленню земляного полотна на кожній колійній частині науковці не зможуть. Це важливо при розробці нормативної документації, яка виключає рекомендації до аналізу і визначає тільки кінцевий результат – прямі вказівки, які необхідні для проектування або для відновлення та обслуговування земляного полотна.

Запропонована методологія аналізу розрахунків земляного полотна, проведених методом скінченних елементів (МСЕ), найперше, включає інтерпретацію експериментальних досліджень, важливою частиною яких є попередня оцінка існуючих напрацювань, оскільки на діючих колійних частинах проведення експериментальних досліджень під час руху неможливе. Для цього необхідно проводити дублюючі експерименти при відомих навантаженнях моделі земполотна під штампом із змінами початкових умов експерименту. Це потрібно для більш точного вираження впливу навантаження на формування тіла сповзання відкосу (рис. 1).



Рис. 1. Експериментальне підтвердження закономірностей накопичення деформацій руйнування за результатами ГНДЛ механіки ґрунтів ДІТТу: поетапне руйнування моделі із ослабленим шаром меотичної глини (по М. Н. Гольдштейну)

### Експериментальна задача

На відміну від звично прийнятих [1], даний експеримент провадиться з нахилом штампу до  $5^\circ$ , чим моделюється ділянка кривої земполотна, наприклад 1021 км перегону Сватове-Попасна Донецької залізниці, де накопичення енергії навантаження призвело до створення поверхневої

тріщини та початку процесу сповзання. Звичайно, що розрахунки стійкості експлуатаційниками не провадилися, а аварійне збереження було здійснено відсіпкою та додатковим привантаженням відкосу баластним гравієм.

Розглянемо поверхню навантаження інтерпретаційної моделі (рис. 2), яка відрізняється від двоколіїної реальної поверхні. Як можна побачити в перехідній зоні (по Горбунову-Посадову) явно виражені деформації [2], в яких переважає горизонтальна складова (третій рівень від поверхні на рис. 2, по стрілці). Це достатньо змінює погляд на раніше зроблені висновки, які відзначають тільки форму та кривизну поверхні сповзання і підтверджує формування області зминання в схемі розташування елементів руйнування відкосу, а також показує, що вертикальні деформації поверхневої частини реалізуються в перехідній зоні в горизонтальні, де і проходить накопичення енергії руйнування. Тобто, опір більш міцних ґрунтів нижче перехідної зони створює умови для накопичення енергії деформування (по стрілці на рис. 2).

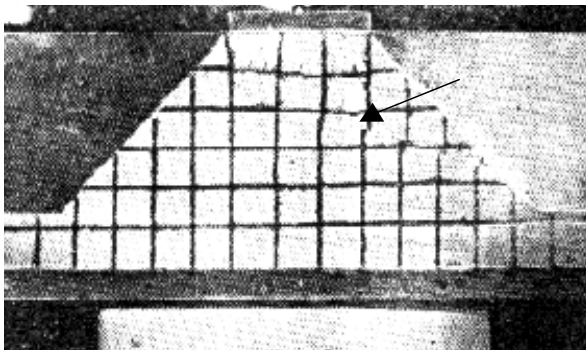


Рис. 2. Експериментальні випробування моделі ґрунтової основи під штампом із фізичними параметрами суглинку твердого, прийнятого для розрахунків МСЕ (за М. Н. Гольдштейном)

Розглядаючи у цьому аспекті закономірність формування напружень можемо відзначити, що тіло сповзання є адитивною системою, термодинамічні властивості поглинання енергії руйнування у якій різко відрізняються від явно виражених дисипативних систем, оскільки температура змін реального земляного полотна від проїзду потяга практично не змінюється або змінюється дуже незначно. Це дозволяє зробити висновок, що зміна форми тіла сповзання проходить на рівні пластичних деформацій, а в зоні накопичення останніх проходять найбільші зміни внутрішнього стану. Останнє також підтверджується існуючими експериментальними дослідженнями, проведеними під керівництвом проф. М. Н. Гольдштейна (см. рис. 1) в ГНДЛ механіки ґрунтів. Се-

редній шар ґрунту зафарбовано білим кольором, що робить картину руйнування більш наглядною.

На рис. 1 у поверхневій пасивній зоні початок руйнування проходить блоками із явно вираженим випором ґрунтів у перехідній зоні. А на рис. 2 відображено зміни всього тіла руйнування та сповзання поверхневої частини, при практично відсутньому руйнуванні пасивної нижньої зони.

Це підтверджує дослідження Г. М. Шахуняца [3] про розподіл енергії навантаження у земляному полотні, за якими найбільш навантаженим приймається баластний шар, де реалізується до 50 % енергії руйнування, 70...80 % якої розповсюджуються і впливають до глибини у 3 м.

### Динамічна задача

Враховуючи, що поїзне навантаження проходить у динамічному режимі, то найбільш впливовими і можливими до розгляду є маси вагона, навантаження та їх співвідношення з масою ґрунту, який вступає із ними у взаємодію. Таким чином, слід розглянути динамічну схему взаємодії елементів, основний розподіл мас та особливості методу, який передбачає пошук характеру підтвердження виявленої закономірності [4] появи сегментних зон розтягнень.

Тому для ідентифікації у динамічній постановці задачі розглянемо коливальну систему рис. 3.

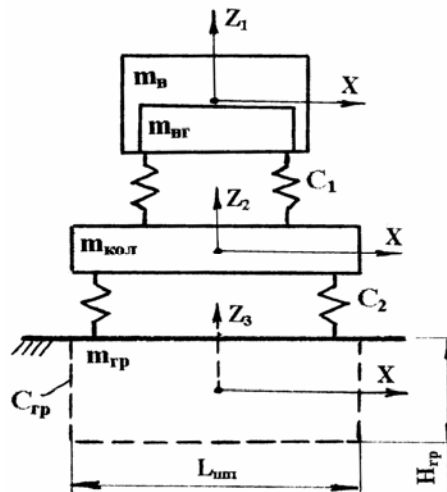


Рис. 3. Динамічна схема системи:

$m_b$  – маса вагона або потяга;  $m_{br}$  – маса вантажу;  $m_{коп}$  – маса коливальної системи колісних пар та рейкошпальной решітки;  $m_{гр}$  – приєднана маса ґрунту;  $L_{шп}$  – ширина приєднаної маси ґрунту, що дорівнює довжині шпали;  $H_{гр}$  – висота приєднаної маси ґрунту;  $C_1$  – жорсткість пружних зв'язків вагона;  $C_2$  – жорсткість рейкошпальной решітки;  $C_{гр}$  – умовна жорсткість ґрунту

Для визначення навантаження авторами роботи [5] запропонована модель Бусінеска-

Фламана, за якої визначення дотичних напружень провадиться із прив'язкою до радіуса можливої поверхні ковзання. Обмеженість такої наукової постановки у кінцевому результаті впливає на побудову епюр навантаження та розподіл напружень у баластному шарі, де можемо мати тільки проекції дотичних напружень, оскільки прив'язка до радіуса поверхні ковзання виключає визначення дотичної як вектора, а епюри втрачають фізичний характер відображення процесу на відміну від МСЕ. Для пояснення динамічної схеми звернемося до канонічного рівняння одномасної системи з вимушеним збудженням коливань

$$m_1 \ddot{Z} + \mu C \dot{Z} + CZ = Pr\omega^2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де  $m_1$  – вага  $i$ -ї одиниці системи;  $P$  – сила припусового збудження коливань;  $r$  – плече прикладання вимушеної сили  $P$ ;  $C$  – жорсткість пружних зв'язків із дисипативною характеристикою  $\mu$ ;  $\omega$  – частота вимушених коливань;  $\varphi$  – кут початкового розташування плеча прикладання вимушеної сили, який визначає пускову характеристику системи;  $Z$  – вертикальна вісь переміщень (см. рис. 3).

Звернення до рівняння Лагранжа зроблено, тому що «лагранжіани» найбільш зрозуміло описують стан системи: друга похідна – закон збереження енергії; перша похідна відображує момент імпульсу системи; пряме звернення показує момент сили, який розвиває система з вимушеним приводом залежно від кута зупинки приводу, що впливає на пусковий момент.

Оскільки реальна динамічна система є самобалансною і навантаження від неї через колісну пару приводимо до довжини скінченного елемента у 1 м, то самобалансність можемо прийняти за основу. При цьому можемо вважати, що швидкість поїзного руху не впливає на схему, яка стає саморезонансною без приводу вимушених коливань, тому що для швидкості, наприклад, у 140 км/год, термін проходження умовного скінченного елемента, складає лише 0,26 с. У такому випадку динамічну модель можемо описати системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{Z}_1 + C_1 Z_1 &= 0; \\ (m_1 + m_2) \ddot{Z}_2 + \mu_2 C_2 \dot{Z}_2 + C_2 Z_2 &= 0; \\ (m_1 + m_2 + m_3) \ddot{Z}_3 + \eta_{гр} C_{гр} \dot{Z}_3 + C_{гр} Z_3 &= 0, \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

де  $\eta_{гр}$  – в'язкопластична характеристика ґрунтової маси.

У наведеній системі  $m_1$  – сумарна маса вагона та вантажу, причому вважаємо, що маса вантажу приєднана і процес коливань безвідривний. Друга маса  $m_2$  становить сумарну вагу колісної пари та колійної шпальної решітки із сумарною жорсткістю системи  $C_2$  та дисипативною характеристикою  $\mu_2$  гумових підкладок під рейками, а індекси системи відповідають їх порядковому визначенню за масами.

Оскільки в реальних умовах ґрунти не мають явно виражених структурних зв'язків і зміну їх нагрівання практично не можна визначити, то у системі (2) для ґрунтів приймаємо переважаючими в'язкопластичні властивості ( $\eta_{гр}$ ).

Особливістю динамічної системи є те, що приєднану масу ґрунтів визначити практично не можна, тоді ширину останньої  $L_{шп}$  приймаємо по довжині шпали, а глибину на першому етапі розрахунків  $H_{гр}$  визначаємо за дослідженнями Г. М. Шахунянца [3], в яких наведено максимальний розсів енергії навантаження на глибині у 5 м, що складає 99 % і визначає рівень взаємопідтвердження за даними науково-технічної літератури. Це підтверджує розподіл переміщень, які проведені МСЕ для земляного полотна перегону Сватове-Попасна Донецької залізниці [4].

### Задача механіки ґрунтів

Повноцінним аналізом та підтвердженням надійності розрахунків МСЕ можемо вважати використання прогресивного доказу, який використовується в геологічних дослідженнях. Для цього переводимо інтерпретацію на новий рівень, проводячи пружносилову інтерпретацію презентаційної графіки МСЕ.

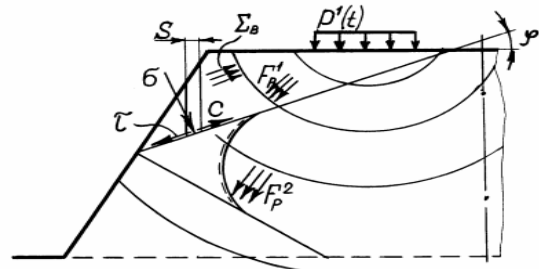


Рис. 4. Схема до аналізу силових факторів у земполотні за появи вступуючої хвилі від руху потяга або одиничного імпульсу при проходженні стику колії (позначення за текстом далі)

Вивчаючи швидкість деформацій при зсувах А. Г. Протосеня прийшов до оцінки інтенсив-

ності деформацій зсуву, і опираючись на дослідження Релея про довговічність і повзучість широкого кола матеріалів, започаткував кінетичну теорію процесів руйнування твердих тіл. Деякі відмінності запропоновано Г. М. Барте-невим [2] при використанні термоентропійного підходу, але в загальному вигляді всі теорії поведінки ґрунтів не можуть бути використані для розрахунків їх стійкості та несучої здатності – визначення міжремонтних термінів.

У цьому випадку звертаємось до теорії управління, де форма вектора управління в додатку до методу відсіків може бути виражена напруженням  $\sigma(t)$  [6]. Це означає, що зміни напружень в часі не проходять безслідно, а повинно проходити накопичення енергії за рахунок зміни внутрішнього стану, тобто після кожного навантаження баланс внутрішньої енергії  $U_1$  змінюється на величину, яка визначається з такої залежності:

$$\sigma A = U_1 - U_2. \quad (3)$$

У цьому випадку виникає питання, де найбільш активно проходить накопичення енергії руйнування і взагалі, як воно проходить і по яких законах? Така зона може характеризуватися активним переходом нормальних напружень в дотичні, розширенням внутрішньої структури окремого участку, зміною порового тиску та накопиченням вологості [4].

В активній зоні за методом Горбунова-Посадова зміна структури ґрунтів повинна змінювати поровий тиск. Тоді за умови, доведеної М. Н. Гольдштейном, на межі відсіку напруження в середині масиву будуть  $(\sigma + p_w)$ . Але якщо врахувати реакцію масиву, вільна енергія стиску повинна змінити стан ґрунтів у зоні дилатації на деяку величину  $\Delta\sigma$  і тоді рівняння Кулона приймає вигляд

$$\tau - C = (\sigma + \Delta\sigma - p_w) \operatorname{tg}\varphi + \Sigma_B, \quad (4)$$

де  $p_w$  – поровий тиск води;  $\Sigma_B$  – в'язка складова зчеплення.

Така постановка наближає нас до пояснення циклічності процесів у земполотні, оскільки останнє є самоорганізуючою системою із властивостями до самовідновлення глинистих ґрунтів за відсутності критичної сезонної зміни вологості і визначає необхідність локального обстеження кожної ділянки земполотна.

Розглянемо рис. 4, де до земполотна прикладено імпульс вступуючої хвилі від поїзного

руху навантаження  $P^1(t)$ . Проаналізуємо виділений відсік  $S$ , для якого складено рівняння (4).

Якщо поверхня ковзання до вказаного відсіку відсутня, то зчеплення  $C$ , як і поровий тиск  $p_w$  не мають напрямку і не можуть бути вектором., тим не менш дотична  $\tau$  виражена вектором поздовж лінії ковзання – протиріччя постановки задачі Кулона. В'язка складова  $\Sigma_B$  від динамічної дії  $F_p^1$  миттєво змінює напрямок, що зменшує величину зчеплення  $C$ . Але оскільки зсувні напруги  $\tau$  за відсутністю реальної поверхні ковзання не можуть виходити до відкосу, тоді лінію умовного клину випирання ґрунту, на який впливає динамічна згасаюча складова  $F_p^2$ , також не можливо виводити до відкосу. Це дає можливість зробити припущення, що умовні лінії ковзання з'єднуються в середині масиву по якійсь криволінійній траєкторії.

На додаток можемо припустити, що напруження стиску в середині масиву можуть бути достатньо великі для розвитку поверхні ковзання, тоді остання буде повернена в сторону найменшого опору, тобто в сторону відкосу, створюючи додаткову лінію ковзання. При цьому на місці розвороту почнеться хаотичне руйнування масиву, яке буде виражено зміною напружень стиску на напруги розтягу, що і є, на наш погляд, тестом для визначення стану земполотна і міжремонтного терміну.

Явище формування напружень розтягу в середині земполотна проаналізовано в роботі [4] розрахунками МСЕ, має аналітичне підтвердження, але недостатньо перевірено на практиці.

Розглядаючи МСЕ з точки зору геоакустичної постановки задачі, слід відзначити, що інтерпретація фізичних процесів повинна враховувати відмінність розрахунків статичного миттєвого навантаження МСЕ від реального хвильового навантаження.

### Геоакустична інтерпретація хвильового процесу коливань приєднаної маси ґрунту

Характерними признаками з точки зору геоакустики [7], що виражають вплив рухомого навантаження на ізотропний глинистий відкоступ, є хвилі розповсюдження напружень, які можуть бути трьох видів:

– вертикальна хвиля гравітаційного приєднання маси транспортного засобу;

- горизонтальна, поверхнева хвиля;
- стояча хвиля мінімального коливання частинок ґрунту.

Розглядаючи систему рівнянь (2) з геоакустичної точки зору можемо спростити її до рівняння, яке описує стійкий рух типу «ударно-вібраційна трамбівка» за умови поєднання  $m_1 + m_2 = F_a$  та замість  $\ddot{\xi} = m\omega^2 r / F_a$ ,  $\tau = \omega t$ ,  $p = P / F_a$ , де точки над функціями означають диференціювання по  $\tau$ . Тоді маємо безрозмірне диференціальне рівняння, яке наближує нас до пояснення суті геодинамічного впливу

$$\ddot{\xi} = p + \cos(\tau + \phi). \quad (5)$$

У цьому рівнянні  $p$  представляє відношення динамічної змінної до навантаження системи з відносною вертикальною хвилею постійного приєднання, яку можемо вважати статичною складовою на довжині одного скінченного елемента. Таким чином, на даному етапі вплив обертонів накладених коливань проміжних мас  $m_2$  та  $m_3$ , які відповідають масам колісної пари та рейкошпальної решітки, не враховуємо. Однак слід відзначити, що основне навантаження у МСЕ повинно враховувати коефіцієнт динамічного збільшення, який визначається зміною стану колії за результатами обстеження, тобто процес відновлення земполотна є загальною проблемою колійників та спеціалістів по земполотну.

При швидкості розповсюдження вертикальної хвилі у 1800...2500 м/с кут запізнення прикладання поїзного навантаження до скінченного елемента складатиме 1/20 частину, за якої можемо прийняти цю складову за вектор, а висунуте припущення до розрахунків навантаження допустимим.

Стосовно горизонтальної складової поверхневої хвилі, швидкість якої менше більш як на порядок від вертикальної, то із рівняння (4) можливо бачити, що вона в рівнянні не враховується, є самостійною за характером формування і на динамічну систему (2) не впливає, тому її вплив розглядається окремо від МСЕ.

Стояча хвиля характеризується відсутністю переносу енергії, тобто в ґрунтовому середовищі виникають витрати, обумовлені затуханням розповсюдження хвилі із відстанню. При циклічному навантаженні амплітуди прямої та зворотної хвиль не рівні між собою, а за нерівності характеристик міцності ґрунтів по осях, зворотна хвиля може розташовуватися під ку-

том із зміною напрямку. При цьому нормальні вертикальні напруження переходять у дотичні.

### Інженерна інтерпретація презентаційної графіки методу скінчених елементів

Оскільки спеціальних методів розшифровки презентаційної графіки МСЕ не існує, то вищепроведений частковий аналіз доповнюємо інтерпретацією, за допомогою якої проєктантам та ремонтникам мають можливість визначити характерні місця реакції транспортного відкосу на навантаження.

Для цього сформулюємо послідовність, яка може бути першим варіантом загальної інтерпретації: порівняння схем полів напружень силового розрахунку; епюр розташування головних напружень від власної ваги по осях на прикладі рис. 5; визначення межі присутності вузлових переміщень та приєднаної маси ґрунту, яка реагує на навантаження.

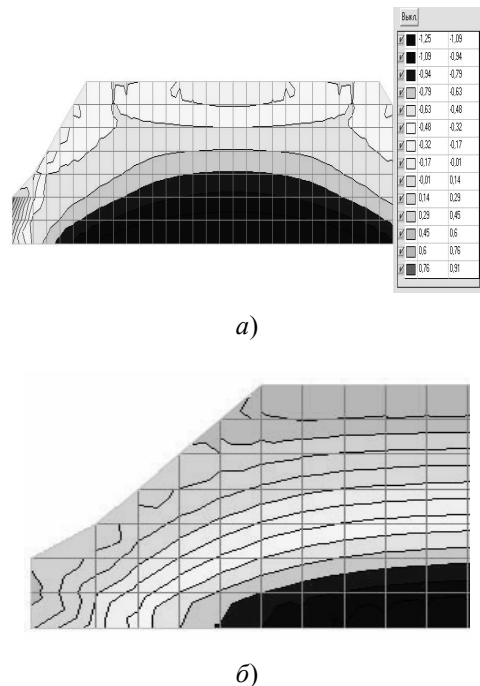


Рис. 5. Перевірочний розрахунок МСЕ від власної ваги ґрунту:

а) – ізолінії та ізополя головних напружень по осі X (горизонтальні); б) – збільшене зображення поверхні відкосу, де ізополя головних напружень по осі Z (вертикальні)

Найбільш важливим для експлуатаційників є реакція земляного масиву на розташоване на межі поверхні відкосу навантаження [4]. Реакція земляного відкосу виявляється у розподілі останнього на похилий підпирний відкос, на вертикальній межі якого спостерігається хаотичне розташування полів напружень із виникненням зон розтяг-

нення, та основне тіло відкосу, що формується вертикальною геоакустичною складовою. Це означає, що при зміщенні шпальної решітки до краю відкосу виникають умови до найкорішого виникнення тріщини на поверхні.

Таке явище підтверджується експериментальною інтерпретацією (рис. 2), тому її висновки можливо вважати достовірними, але це можуть бути особливості МСЕ, які відмінні від реальних умов. Тому перевірку характерних особливостей МСЕ необхідно провести, порівнюючи характеристики розподілу напружень від власної ваги ґрунту, та зміщенням навантаження на декілька положень по горизонтальній поверхні, одним із яких є нормативне [4].

Розташування напружень від власної ваги для горизонтальної складової підтверджуються класичними розрахунками за М. Н. Гольдштейном, що також дозволяє вважати розрахунки достовірними. Але все це підтверджує тільки вірність розрахунків по напруженнях. МСЕ не відображає реального геоакустичного впливу, та фізичної суті процесу. Враховуючи, що на межі стоячої хвилі реакція земполотна повинна бути відображена горизонтальною лінією, то маємо тільки часткове підтвердження геоакустичного відображення в МСЕ, оскільки на денних поверхнях відкосу виходу напружень розтягу не маємо, але лінії розподілу напружень розташовані (на перший погляд) хаотично.

Відсутність виходу напружень розтягу на поверхню відкосу підтверджує стійкий стан без навантаження, але реакція хаотичного розподілу епюр вертикальних напружень на відкосі (рис. 5, б) вказує на те, що на відстані у 0,7...1 м від поверхні МСЕ (в межах одного елемента) може давати недостатньо ясну картину. Тому в розрахунках виникає необхідність до зменшення розмірів скінченного елемента. Оскільки рекомендацій щодо вибору розмірів останніх не існує, то користуючись теорією управління гірничодобувними об'єктами [8], можемо визначити оптимальний розмір скінченного елемента у 0,3...0,6 м, що необхідно при врахуванні реальних шаруватих насипів із багаторазовою відсипкою баластного шару при ремонтах.

Характерним для інженерної інтерпретації є необхідність приведення довжини скінченного елемента до контактної відстані колісної пари, що дозволяє нам співставити навантаження до приєднаної маси  $m_3$  ґрунту земполотна, оскільки  $m_3$  необхідна нам для завершення динамічної інтерпретації.

Оскільки «наїзд» колісної пари на скінчений елемент можливо подати у вигляді норма-

льного ергодичного випадкового процесу з приведеним усередненим терміном навантаження, то процес можемо вважати одноударним, який носить резонансний характер. Тому співставлення частоти наїзду колісних пар, тобто швидкості руху, з власною частотою коливання ґрунтів земполотна дає експлуатаційнику уяву про режими навантаження.

Важливим також для інженерної інтерпретації є визначення приєднаної маси  $m_3$ . Розглядаючи площину поперечного перетину земполотна, на якій у МСЕ визначено присутність переміщень [4], можемо прийняти умову, що сумарна площа таких елементів може бути прийнятою за мінімальну, яка реагує на навантаження. Знаючи напруженні у кожному скінченному елементі та його переміщення, можемо визначити роботу реакції  $m_3$ .

$$A_3 = \sum \delta A_i = \sum_0^i \sigma_i s_i \varepsilon_i, \quad (6)$$

де  $\sigma_i$  – напруження  $i$ -го елемента маси  $m_3$ ;  $\varepsilon_i$  – переміщення  $i$ -го елемента;  $s_i$  – площа перетину  $i$ -го елемента, кут нахилу як та реальну її величину визначаємо із презентаційної графіки.

Але реально стан земляного полотна можливо визначити після визначення вологості ґрунтів. У сучасних розробках ГНДЛ механіки ґрунтів розробляються методики та прилади пенетрометричних випробувань, які можливо довести до нормативного впровадження та забезпечити діючі колійні частини методологією комп'ютерних розрахунків земляного залізничного полотна із частковим експериментальним підтвердженням.

Особливістю таких випробувань є забезпечення пенетрометра камерами безконтактного визначення вологості, які монтуються безпосередньо за конусом. Після занурення пенетрометра в ґрунт, із визначенням сил опору, останній остається на деякий термін в земполотні, залежно від поглинаючих властивостей характерних для наповнювача камер. Таким чином, процес обстеження земполотна можемо вважати завершеним.

## Висновки

1. Використовуючи прогресивний метод обстеження земляного залізничного полотна виникає можливість визначення реальних умов експлуатаційного навантаження, залежно від кількості проходу колісних пар, та визначення міжремонтних термінів.

2. Після забезпечення пенетрометра камерами безконтактного визначення вологості ґру-

нтів, останній може виконувати три функції: пенетрометр – репер – вологомір.

3. Сумарна методика розрахунково – експериментальних досліджень доводить можливість неруйнівних методів обстеження діючих земляних відкосів без зупинки руху.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
2. Гольдштейн М. Н. Распределение напряжений в насыпи от действия сил собственного веса / М. Н. Гольдштейн, В. М. Тубольцев, А. Н. Шанина // Вопросы геотехники: Труды ДИИТа. – Д., 1976. – Вып. 179/25. – С. 39–49.
3. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. – М.: Трансжелдориздат, 1953.
4. Цепак С. В. Закономерности влияния динамической нагрузки на земляное транспортное со-

- оружение // Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України – Д., 2003. – Вип. 47. – С. 152–157.
5. Фришман М. А. Стабильность подшпального основания при железобетонных шпалах / М. А. Фришман, В. В. Говоруха // Весник Всесоюз. научно исслед. ин-та ж.-д. транспорта, – М., 1968. – № 7. – С. 27–29.
6. Виноградов В. В. Гемеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / АН УССР. Ин-т геотехн. механики. – К.: Наук. дум., 1989. – 192 с.
7. Ямщиков В. С. Введение в геоакустику: Учебное пособие. – М.: МГИ, 1968. – 284 с.
8. Полищук С. З. Геомеханические задачи рационального природопользования на открытых горных работах // Між від. зб. наук. праць / Ін-т проблем природокористування та екології НАН України. – К.: Наук. дум., 1998. – 178 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2005.