

МЕХАНІКА ҐРУНТІВ

УДК 556:621.131

Захарова Л. М., к.т.н., докторант (Інститут фізики гірничих процесів НАНУ, м. Дніпро, Україна)

КІНЕМАТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ НЕОБОРОТНИХ ЗРУШЕНЬ ҐРУНТУ ПІД ЧАС ЙОГО ЛОКАЛЬНОГО ЗСУВУ

Метою статті є встановлення особливостей кінематики необоротних зрушень ґрунту під час глобального та локального зсувів. Методологія досліджень базується на відображенні необоротних зрушень й деформацій ґрунту за допомогою другого закону Ньютона, неасоційованого закону пластичності, критерію міцності Кулона-Мора, модифікованого врахуванням межі міцності на розтягнення, та методу кінцевих різниць. Встановлені особливості патернів полів необоротних інкрементальних зрушень, що реалізуються у стані плоскої й об'ємної деформації, причому останній реалізується завдяки виникненню дисипативних структур, що характеризується суттєвою новизною. Практична цінність результатів пов'язана з обґрунтуванням принципів стабілізації ґрунтових схилів шляхом управління дисипативними структурами.

Ключові слова: зсув ґрунтового схилу, необоротні деформації, дисипативні структури.

Вступ. Актуальність проблеми ґрунтових зсувів посилюється з року в рік у гірських та прибережних районах України та під час відкритої розробки родовищ корисних копалин. Стійкість схилів порушується проведенням та розширенням доріг, а також будівництвом різноманітних інфраструктурних об'єктів.

Точні масштаби і час зсуву передбачити важко, проте масив гірських порід зазвичай генерує певні ознаки майбутнього зсуву. Найбільш поширеними джерелами інформації про поведінку ґрунтового схилу є геодезичні, фотограмметричні та радіолокаційні зйомки земної поверхні. Виконуючи періодичний моніторинг такими зйомками, спеціалісти намагаються передбачити зсув до його початку й прийняти відповідні заходи, щоб попередити небезпечний руйнівний процес або вивести людей, машини й обладнання з території, у межах якої зсув може спричинити пошкодження й збитки.



Аналіз публікацій. Дослідженню механізму зародження й розвитку зсувів присвячено велику кількість публікацій. Були встановлені важливі закономірності розвитку зсувних процесів завдяки вдосконаленню математичних комп'ютерних моделей [1] й дослідженню поведінки ґрунтів й гірських порід поза межею їх міцності [2]. Симптоматично, що навіть застосовуючи сучасні комп'ютерні моделі, спеціалісти залучають результати інструментального моніторингу зрушень земної поверхні, наприклад такі, як прискорення її осідань [1]. Пошуки нових параметрів кінематики зрушень земної поверхні у якості індикаторів небезпеки розвитку зсувних процесів не припиняються. Так, Амітрано з співавторами [3] досліджували перерозподіл швидкості зсуву по площі поверхні, яку охоплював цей процес. Отже, пошуки фахівців підтверджують перспективність залучення для прогнозування розвитку зсуві ґрунтової поверхні кінематичних параметрів зрушень гірського масиву, оскільки вони пропонують низку переваг, серед яких забезпечення масовості вимірів, а отже, достовірності результатів прогнозу, відносно невисока питома вартість моніторингу, його висока точність, оперативність, можливість охоплення великих площ.

Отже, метою досліджень було знайти й обґрунтувати нові параметри кінематики зрушень земної поверхні, які б відображали важливі механізми деформування ґрунтової поверхні у процесі розвитку зсуву.

Методологія досліджень. Основну роль у зсувних процесах виконують необоротні зрушення ґрунту й масиву гірських порід. Фактично, маса ґрунту або порід, яка бере активну участь у зсуві, є відкритою термодинамічною системою, оскільки обмінюється з оточуючим середовищем енергією й речовиною. Згідно [4] така система незалежно від її фізичної природи підкоряється другому закону термодинаміки і може утворювати дисипативні структури. У даному випадку доцільно пошукати такі структури серед кінематичних параметрів зсувного процесу.

Важливо, що необоротні зрушення відбуваються згідно конкретної історії зв'язку напружень й необоротних деформацій ґрунту, яка є унікальною. Іншими словами результат зсуву залежить від історії навантаження об'ємів ґрунту або масиву гірських порід. У таких умовах інтегрування поточних швидкостей зсувних процесів може призвести до втрати важливої інформації, оскільки елементарні зсуви є величинами векторними, й можуть міняти величину, знак і напрямок. Отже, поля зсувів необхідно реєструвати з такою частотою, або пері-

одом у часі, щоб не пропустити моменти створення окремих дисипативних структур. З практичної точки зору це означає, що послідовні сесії моніторингу потрібно виконувати так, щоб з одного боку виявити моменти виникнення структур, а з другого – реєструвати інкрементальні зрушення [5], величини яких будуть суттєво більші за похибку вимірювань.

Це означає, що треба виконати велику кількість сесій моніторингу зрушень, що відіб'ється на трудомісткості експерименту. Отже на першому етапі досліджень доцільно виконати експеримент на комп'ютерних моделях. Для забезпечення достовірності результатів досліджень необхідно обґрунтувати математичну модель, яка б гарантувала відображення реального шляху навантаження ґрунтової маси у процесі її необоротного сповзання.

Обґрунтування математичної моделі. Наразі найбільш популярним методом дослідження зсувних процесів є метод скінчених елементів (МСЕ) [1]. Проте МСЕ не гарантує відображення реального шляху навантаження під час моделювання необоротного деформування твердого тіла й особливо гірської породи. Справа у тому, що при переході породи у позамежний стан залежність її деформацій від напружень становиться суттєво нелінійною, причому цю нелінійність відображають зазвичай неасоційованим законом течії, оскільки порода розпушується (а ґрунт може до того ж ще й ущільнюватись) під час переходу у позамежний стан.

Проблема у тому, що МСЕ передбачає обов'язкове рішення системи рівнянь для всього об'єму гірського масиву, який моделюється. Іншими словами обчислення інкрементальних деформацій виконуються *одночасно* для усіх скінчених елементів розрахункової схеми. Для відображення нелінійної залежності між напруженнями й деформаціями цей процес виконується ітераційно. Для одночасної підгонки напружень і деформацій один під одне застосовуються абстрактні математичні процедури, наприклад метод початкових напружень. Проте введення таких абстрактних процедур не обґрунтовано фізикою процесу і може викривити реальний шлях навантаження.

Отже необхідно застосувати такий метод обчислень нелінійної залежності між деформаціями і напруженнями, який відображає реальну поведінку ґрунтів і порід після переходу через межу їх міцності. Вперше такий метод був запропонований Кундалом [6]. На рис. 1 наведено схему відповідних обчислень. Схема поєднує послідовне використання другого закону Ньютона, узагальненого закону Гука й моделі міцності й реалізується послідовно в один цикл, тобто без



ітерацій.

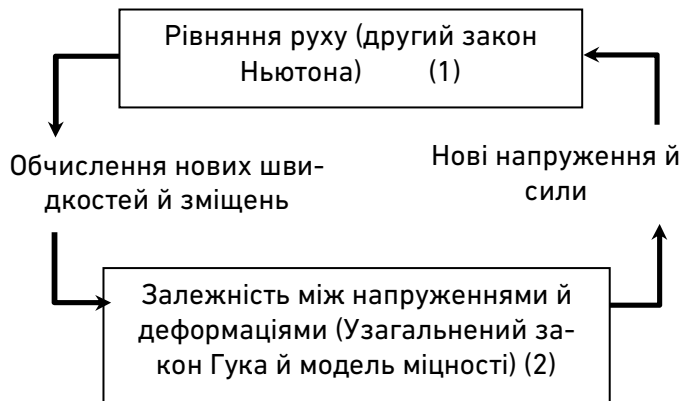


Рис. 1. Схема обчислень у моделях Кундала

Процес обчислень виконується з кроком по часу. Закони Ньютона, Гука, а також функції моделей міцності використовуються в інкрементальній формі, що вирішує проблему нелінійності, й додатково дозволяє використовувати будь-яку форму функції моделі міцності. Початок зсуву автоматично означає, що ґрунт або гірський масив втратив рівновагу, отже, є незбалансовані сили, які породжують прискорення певним ділянкам масиву у результатів чого він починає рухатися. Тому на першому етапі спочатку обчислюють інкрементальні прискорення по відомим силам і масі ґрунту. Вказані елементарні або інкрементальні прискорення легко запам'ятати, а потім уже інтегрувати для визначення швидкостей й переміщень.

Тільки після цього обчислюються нові напруження з урахуванням закону Гука, якщо система знаходиться в пружному стані, або корегуються інкрементальні деформації згідно моделі міцності, якщо ґрунт або порода перейшли за межу міцності. Таким чином врахування нелінійності поведінки ґрунту або породи здійснюється за один цикл, без ітерацій і залучення абстрактних математичних прийомів. Важливо, що таке обчислення виконується окремо й незалежно для кожного вузла розрахункової схеми методом кінцевих різниць. Для того, щоб рішення не встигло відхилитись від реальної поведінки ґрунту, визначається критична величина кроку по часу, яку не можна перевищувати. Детальний опис методики викладений у [6]. До того ж здійснюється гістерезисне демпфування динамічних (незбалансованих) сил, для відображення процесів релаксації й розсіювання енергії гірського тиску або потенціальної енергії положення ґрунту, який сповзає.

Саме така схема розрахунку відображає фізику процесу необо-

ротного зрушення ґрунту, що забезпечує відтворення реального шляху навантаження, отже, й можливість виявлення дисипативних структур. Описана схема реалізована у кількох комп'ютерних моделях нового рівня, зокрема у FLAC3D [7].

. Для моделювання вибраний типовий ґрунтовий схил узбережжя Азовського моря, де розповсюджені зсуви ґрунту. Ширина ділянки масиву, який моделювався, приймалась рівною спочатку 40 м, а потім 80 м. Довжина моделі 80 м, висота схилу 25 м, а основи 15 м. Кут нахилу ґрунтового схилу 50° (рис. 2).

Загально відомо, що переважна більшість ґрунтових зсувів провокується обводненням після тривалих опадів або танення снігів. Тому вирішувалась спряжена задача нестационарного необоротного сповзання ґрунтового схилу й фільтрації підземних вод, дзеркало поверхні яких й розподіл порового тиску показані на рис. 2. Іншими словами зсув відбувався під дією зменшення у 1,5-2 рази показників міцності ґрунту внаслідок його обводнення й напору ґрунтових вод в сторону ґрунтового нахилу.

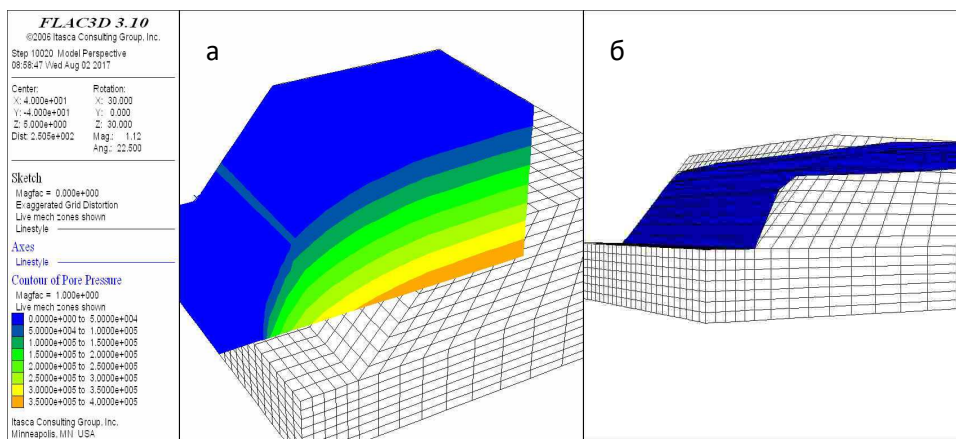


Рис. 2. Поверхня рівня підземних вод (б) і розподіл порового тиску (а)

Модуль об'ємного стискування $2 \cdot 10^8$ Па, модуль зсуву $1 \cdot 10^8$ Па, кут внутрішнього тертя сухого глиняного ґрунту 30° , зчеплення 100 кПа, межа міцності на розтягнення 1 кПа. Розрахункову область було розбито на 2460 зон і 3 094 вузлів скінчено-різницевої сітки.

Результати моделювання. Було вирішено три окремі задачі з різними граничними умовами. У переважній більшості випадків дослідники розглядають ґрунтовий схил у стані пласкої деформації [1]. Така ситуація відповідає випадку, коли висота уступу схилу у кілька разів менша за його ширину, або ширину фронту зсуву (рис. 3).



За таких умов на усіх вертикальних стінках розрахункової схеми були заборонені лише переміщення по нормалі до цих стінок. Днище розрахункової схеми було повністю закріплене. Верхня границя й ґрунтовий схил були вільні від будь-яких напружень, оскільки контактували з повітрям.

Зауважимо також, що для коректного врахування початкового стану системи кожна з задач вирішувалась у два етапи. На першому етапі модель масиву приймалась пружною й безкінечно міцною. Потім вмикалась гравітація й розрахункова схема витримувалась деякий час, щоб дати змогу ґрунту ущільнитись під дією власної ваги. Після цього пружна модель змінювалась на модель Кулона-Мора, модифіковану врахуванням межі міцності на розтягнення. У результаті починалось руйнування схилу й розвиток зсувного процесу.

Завдяки схемі Кундала з'являються можливості моделювати великі необоротні деформації ґрунтів і масиву гірських порід. Як видно з розподілу на рис. 3, зсув сформував техногенну складку, яка створилась біля підніжжя зсуву. Причому відбувся двох-стадійний зсув: спочатку перший уступ схилу почав рухатися вниз і коли загальна амплітуда необоротного проковзування ґрунту сягнула 4 м, почав зароджуватися другий уступ. Це видно на графіку зсувів обох уступів, показаному справа на рис. 3.

Коли величина проковзування першого уступу досягла 14 м, темпи зсування почали загасати. Основна причина такого загасання полягала у тому, що техногенна складка язика зсуву торкнулась підніжжя ґрунтового схилу і почала передавати свою вагу на підніжжя, чим зменшила активну силу, яка підживлювала процес зсування. Після повного загасання зсуву загальна величина проковзування першого уступу склала майже 16 м, а ґрунт язика зсуву пересунувся на 16,14 м. Максимальне проковзування другого ступеня склало 1,6 м.

Проте частіше зсуви розвиваються на локальних обмежених ділянках, причому довжина язика або тіла зсуву у кілька разів більше його ширини. Отже, друга задача вирішувалась для наступних умов: ширину розрахункової схеми було збільшено до 80 м. На її бокових стінках були заборонені не тільки переміщення по нормалі, але й горизонтальні зміщення уздовж напрямку зсуву. Зауважимо, що вертикальний ступінь свободи залишався доступним для можливості консолідації ґрунту розрахункової схеми під дією власної ваги. В середині розрахункової схеми параметри міцності ґрунту зменшувались у 1,3 рази, щоб обмежити ширину полоси ґрунту, який зсувався.

Параметри міцності крайових ділянок масиву шириною по 20 м залишались на початковому рівні. Це дозволило обмежити ширину зсуву до 40 м.

Вказані граничні умови відповідали реальній ситуації максимально, оскільки природна межа, де зсувне тіло граничить з стійким масивом завжди присутня у реальності. На рис. 4 показаний зовніш-

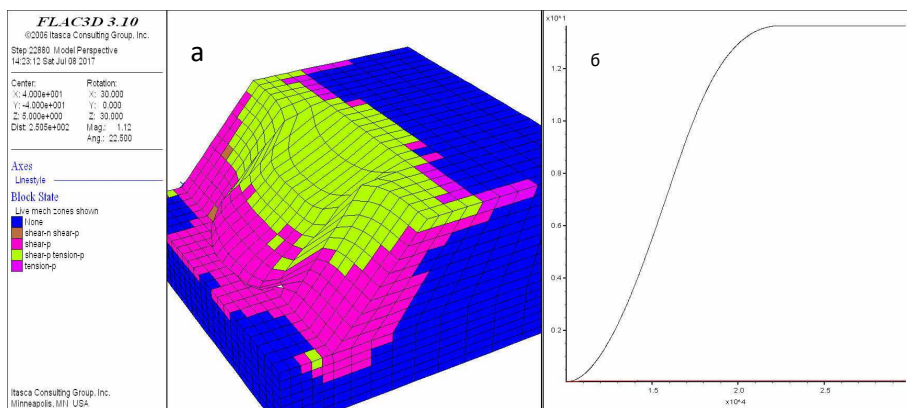


Рис. 4. Розподіл позамежного стану схилу (а) і величини зсуву верхнього уступу (б)

ній вид зсуву після його стабілізації. Тепер довжина зсувного тіла майже удвічі довша за ширину. У позамежний стан перейшов не тільки об'єм ґрунту, який відокремився від оточуючого масиву, але й ділянки ґрунту, які оточують зсувне тіло. Проте вказані ділянки не втратили зчеплення з ґрунтовою основою й у цілому зберегли свою позицію, яку вони мали до розвитку зсувного процесу. Верхня частина зсувного тіла перейшла у позамежний стан у результаті перевищення межі розтягуючих і дотичних напружень. Нижня порція або язик зсуву зруйнувалась лише від критичних дотичних напружень.

В цілому масштаби зсуву помітно менші, структура самого зсуву простіша, оскільки верхня його порція сповзла у вигляді одного уступу, а величина сповзання менша і не перевищує 14,6 м, що на 1,4 м менше за попередній випадок, коли зсув реалізувався в умовах пласкої деформації.

Аналіз дисипативних структур. Для виявлення можливих дисипативних структур були проаналізовані поля інкрементальних зрушень ґрунтової поверхні протягом зародження й розвитку зсувів. Як вказувалось, час протікання зсувних процесів враховувався у явному вигляді завдяки використанню другого закону Ньютона. Калібрування моделі показало, що один цикл моделювання по схемі, що зображена на рис. 1, відповідав 5,6 години. Послідовні знімки стану

моделі виконувались через кожні 20 циклів або приблизно 5 діб у натурних умовах. Зсуви Приазов'я належать до типу повільних й розвиваються протягом кількох років. Отже за такий короткий проміжок часу навіть у моменти прискорень, або активізацій зсувного процесу ґрунт встигав зміститися не більш ніж 5 мм, що у 2,5 рази перевищувало похибку геодезичних вимірювань і можна вважати значимою величиною.

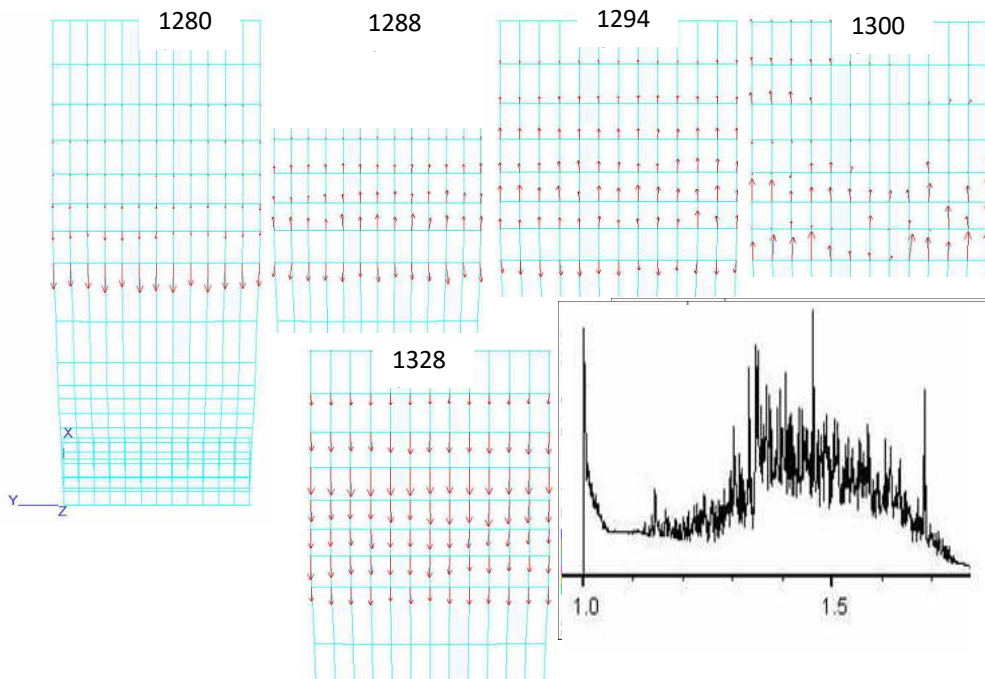


Рис. 5. Еволюція дисипативних структур ґрунту

З'ясувалось, що зовнішня картина поля зсувів, яке має вигляд мозаїки інкрементальних векторів необоротних зрушень змінюється не плавно, а стрибкоподібно, на кшталт картинки у калейдоскопі. Це узгоджується з другим законом термодинаміки, який постулює можливість мимовільного виникнення дисипативних структур у відкритій термодинамічній системі [4]. Аналіз патернів мозаїк інкрементальних необоротних зрушень ґрунту засвідчив, що вони є короткоживучі й змінюють одна одну у вигляді біфуркацій, що збурюються випадковими флуктуаціями термодинамічних параметрів системи. У даному випадку роль флуктуацій виконують невірноважені сили, які виникають у зсувному тілі у результаті переходу фрагментів ґрунту у поза межній стан та нелінійних процесів деформування. Графік флуктуації вказаних сил наведений на рис. 5.

На цьому ж рисунку показані послідовні патерни поверхні ґрун-

ту дисипативних структур, які змінювали одне одного упродовж певного відрізка часу. Видно, що на циклі 1280 вектори зрушень направлені у сторону сповзання ґрунту (вниз на рис. 5). У наступний момент (цикл 1288) край уступу рухався у тому ж напрямку, проте решта поверхні здійснила малі за амплітудою зворотні інкрементальні зміщення. На циклі 1294 цей процес став ще більш помітним. Потім на циклі 1300 розподіл інкрементальних зсувів стає хаотичним. Цей нерегулярний патерн змінюється відновленням руху усієї ґрунтової поверхні у генеральному напрямку зсуву на циклі 1328.

Співставлення цих біфуркаційних процесів з графіком зсуву на рис. 3 та дисбалансу сил на рис. 5 свідчить про те, що вказаний момент відповідає періоду, коли зсувне тіло набрало максимальної швидкості сповзання (вказано стрілкою на рис. 3). Описаний процес має просте й логічне фізичне тлумачення. Період розгону сповзання відповідає ситуації максимального відокремлення активної частини ґрунтового схилу від решти масиву. Це призвело до зменшення реакційних сил, які утримували ґрунт від сповзання.

Зворотні вектори інкрементальних зміщень (тобто ті, що направлені уверх на рис. 5) відображають пружні короткочасові деформації відновлення масиву, який не брав активної участі у зсуві. Хаотичний патерн у момент 1300 відображає перехід від зворотного відновлення до нормального процесу сповзання. Саме такі дисипативні структури є основним джерелом для підживлення процесу необоротного розсіювання потенціальної енергії ґрунтової маси, яка втрачала початкову висоту й сповзала у напрямку дії сил гравітації.

Аналогічну, але своєрідну еволюцію дисипативних структур показано на рис. 6 для випадку, коли ширина зсувного тіла була обмежена. У цьому випадку до різнонаправлених патернів мозаїки структур додалися патерни, які нагадують віяла.

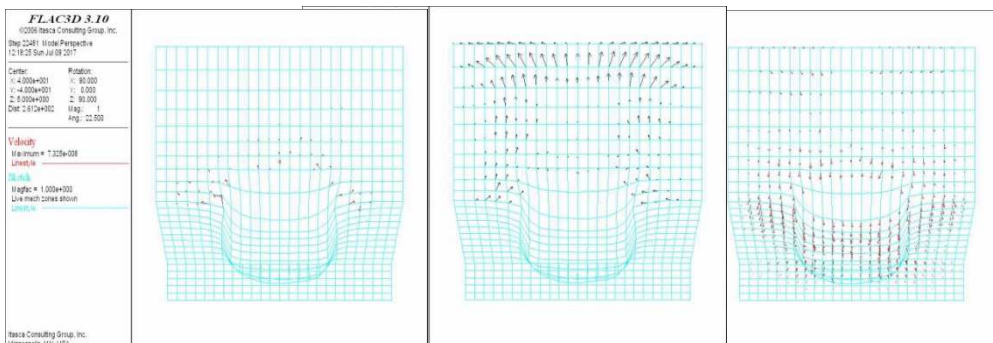


Рис. 6. Еволюція дисипативних структур ґрунту навколо локального зсуву

На рис. 7 наведено патерн дисипативної структури у вигляді ротору для третьої задачі, у якій на відміну від другої задачі міцність 132

середньої частини розрахункової схеми не змінювалась. Отже, зсув відбувався по всьому фронту. Таким чином, очевидно, що патерни дисипативних структур є різноманітними й здатні відображати тонкі, але важливі деталі процесу необоротного зрушення ґрунтових схилів під час їх сповзання.

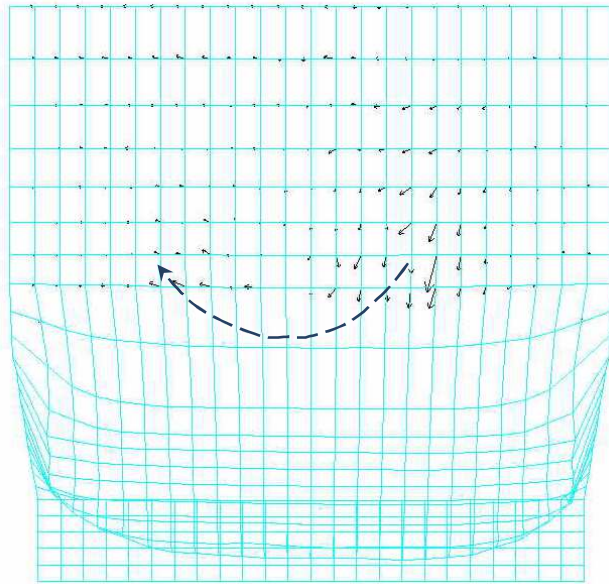


Рис. 7. Ілюстрація роторної дисипативної структури

Обговорення. Аналіз дисипативних структур свідчить про те, що в реальних умовах стан пласкої деформації після переходу ґрунту чи масиву гірських порід у поза межний стан малоймовірний якщо взагалі можливий. Навіть у випадку, коли у тривимірній розрахунковій схемі були задані такі граничні умови, які максимально відповідають стану пласкої деформації, дисипативні структури порушують цей стан.

Незважаючи на те, що вектори інкрементальних зрушень у момент 1300 на рис. 5 орієнтовані уздовж осі X , або уздовж площини ZX , величина реверсних векторів (тобто векторів, які направлені проти напрямку зсування ґрунту) є різною у сусідніх вертикальних перерізах. Це означає, що у площині ZY виникають дотичні напруження й деформації, що порушує умови плаского деформування.

На більш узагальненому рівні хаотичність векторів інкрементальних зрушень є фундаментальним механізмом, який дозволяє розвиватись зсуву фрагментально, по черзі у просторі і часі, що відповідає вимогам другого закону термодинаміки необоротних процесів, згідно якому система повинна перейти у стан самоорганізації, щоб мінімізувати надлишкове виробництво ентропії [4]. З практичної точки зору це означає, що ґрунтові зсуви будуть практично завжди порушувати умови пласкої деформації, що дає можливість залучати нові ступені свободи для розпушення ґрунту й вивільняти тіло, яке бере активну участь у сповзанні й відокремленні від решти масиву.

Отже, перспективним напрямком слід вважати такий, що залу-

чає управління дисипативними структурами для стабілізації ґрунтових схилів і попередження їх сповзання. Зокрема це можна зробити, обмеживши усі ступені свободи ґрунтової маси, включаючи як три поступальні, так і три обертальні.

Висновки. Обґрунтовано нову методологію досліджень процесу зародження, розвитку й затухання ґрунтового схилу. Вона базується на відображенні необоротних зрушень й деформацій ґрунту за схемою Кундала, яка основана на циклічному використанні другого закону Ньютона, неасоційованого закону пластичності, критерію міцності Кулона-Мора, модифікованого врахуванням межі міцності на розтягнення, та методу кінцевих різниць. Така схема забезпечує адекватне врахування шляху навантаження й відповідність реальним процесам необоротних зрушень ґрунтових схилів, що супроводжуються втратою рівноваги й флуктуаціями незбалансованих внутрішніх сил.

Встановлено, що в тілі сповзаючого ґрунту, який є відкритою термодинамічною системою, виникають короткоживучі дисипативні структури у вигляді розподілів інкрементальних необоротних зрушень, патерни яких змінюються стрибкоподібно у часі і просторі. Саме ці дисипативні структури порушують стан пласкої деформації, що сприяє розвитку процесу зсуву завдяки залученню додаткових ступенів свободи. Обґрунтовані принципи стабілізації ґрунтових схилів шляхом управління дисипативними структурами.

1. Sadovenko I.A. et al. Dynamics of loess mass deformation due to technogenic load. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2(66)2014: 164–171.
2. Choi, K. Y. and Cheung, R.W.M. : 2013, Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5:354–365.
3. Amitrano, D., Gaffet, S., Malet, J-P., and Maquaire, O.: 2017, Understanding mudslides through micro-seismic monitoring: the Super-Sauze (South-East French Alps) case study. Bull. Soc. géol. Fr. 178:149–157.
4. Kondepudi, D. and Prigogin, I.: 2015, Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second edition. John Wiley & Sons; XXVI, 524.
5. Lia, X. Y., Zhang, L. M. and Jiang, S. H.: 2016, Updating performance of high rock slopes by combining incremental time-series monitoring data and three-dimensional numerical analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 83: 252–261.
6. Cundall P. A. Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics. Numerical Methods in Engineering (Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, 1976), Vol. 1, pp. 132–150.
7. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Itasca. – 2015. 213 p.
8. Szafarczyk, A. and Gawalkiewicz, R.:



2015, Case study of the tensor analysis of ground deformations evaluated from geodetic measurements in landslide area. Acta Geodyn. Geomater., 13, No. 2 (182), 213–222.

Рецензент: д.т.н., професор Гріньов В. Г. (Інститут фізики гірничих процесів НАН України)

Zakharova L. M., Candidate of Engineering (PH.D.), Postdoctoral Fellow
(Institute for Physics of Mining Processes)

KINEMATIC FEATURES OF GROUND IRREVERSIBLE MOVEMENT DURING A LOCAL LANDSLIDE

The landslides expose infrastructure to the danger and cause harm to the environment. The most popular and systematic monitoring of the landslides is produced with geodetic, photogrammetric, and synthetic aperture radar periodic measurement. Analysis of ground surface displacements, velocities, and acceleration provides valuable information for prediction of a landslide evolution. The aim of this paper was to find another kinematic feature of ground movement that would expand potentialities of the forecasting. I used complex methodology that uses Cundall concept that includes cyclic evolvement of Newton second law, non-associated law of plasticity, Mohr-Coulomb model, which has been modified by accounting tensile limit of the ground, and finite difference method. Such approach unveiled short-living dissipative structures in the sliding ground which replace each other in time and space. Fields of ground irreversible incremental movement form different patterns of vector's mosaic that depends on the dynamics of unbalanced forces in the sliding ground. The dissipative structures take ground mass away from the plain strain state and evolve new degrees of freedom that facilitate dilatation of the ground and progress of sliding. Control of the dissipative structures has been proposed as new concept that has practical value for improvement of technologies for stabilization of ground slopes.

Keywords: Landslide, irreversible deformation, dissipative structures.

Захарова Л. Н., к.т.н., докторант (Институт физики горных процессов, г. Днепр)

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НЕОБРАТИМЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГРУНТА ПРИ ЕГО ЛОКАЛЬНЫХ ОПОЛЗНЯХ

Целью статьи является выявление новых особенностей кинематики необратимых сдвижений грунта во время глобального и локального оползней. Методология исследований базируется на отражении необратимых сдвижений и деформаций грунта с помощью второго закона Ньютона, неассоциированного закона пластичности, критерия прочности Кулона-Мора, модифицированного учетом предела прочности на растяжение, и метода конечных разностей. Установлены особенности паттернов полей необратимых инкрементальных сдвижений, реализуемых в состоянии плоской и объемной деформации, причем последняя реализуется благодаря возникновению диссипативных структур, что является существенной новизной. Практическая ценность результатов связана с обоснованием принципов стабилизации грунтовых склонов путем управления диссипативными структурами.

***Ключевые слова:* смещение почвенного склона, необратимые деформации, диссипативные структуры.**
