

Особливості будови карпатського флішу та сучасні методи оцінки його фізико–механічних властивостей

Людмила БОНДАРЕВА¹, Василь БЕГАН²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних сил, Київ, Україна, 03037,

¹bondareva.lo@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-7392-814X

²began.vasya@gmail.com, orcid.org/0009-0008-0357-5762

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.21-31

Анотація. Карпатський фліш є складною геологічною товщею, що характеризується чергуванням пісковиків, алевролітів і глинистих сланців, значною тріщинуватістю та анізотропією механічних властивостей. Ці особливості суттєво впливають на формування геологічних процесів, включаючи оцінку стійкості схилів, визначення несучої здатності та ймовірність розвитку зсувних деформацій. Вивчення фізико-механічних параметрів флішу є важливим завданням, оскільки вони визначають поведінку порід під дією природних і техногенних факторів.

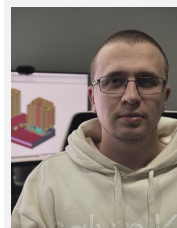
У роботі проаналізовано сучасні методи оцінки механічних характеристик карпатського флішу, що включають лабораторні та польові дослідження. Польові методи (SPT, CPTu, пресіометричні випробування, скельні дилатометри, геофізичні дослідження) дозволяють оцінити опір ґрунтів, параметри міцності та інші важливі параметри безпосередньо у природному заляганні. В роботі досліджено можливість виконання динамічного і статичного зондування в умовах карпатського флішу. Геофізичні методи, зокрема сейсмоакустичні випробування, електророзвідка та георадарні дослідження, дозволяють отримати інформацію про можливі розміри деградованої зони, непряму оцінку міцності та тріщинуватості порід на значних глибинах. Лабораторні дослідження (одновісний стиск, зсувні випробування) забезпечують детальний аналіз структурних особливостей та поведінки матеріалу при різних навантаженнях.

Окрему увагу приділено числовому моделюванню механічної поведінки флішу. Розглянуто основні числові моделі, які можливо застосувати для моделювання флішових порід,



Людмила БОНДАРЕВА

доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Василь БЕГАН

аспірант кафедри
геотехніки

зокрема лінійно–пружні, пружно–пластичні, гіпопластичні та моделі, які враховують анізотропію. Враховано переваги використання анізотропних моделей матеріалу, що дозволяють більш точно оцінювати вплив орієнтації шаруватості на міцнісні та деформаційні властивості флішу.

В результаті, можна зробити висновок, що комплексний підхід, який поєднує лабораторні, польові методи та числове моделювання, є найефективнішим для оцінки механічних характеристик флішу. Отримані дані можуть бути використані для прогнозування стійкості схилів, розробки заходів стабілізації та проектування інженерних споруд у регіонах із флішовими відкладами.

Ключові слова. Карпатський фліш, числове моделювання, анізотропія, Ноек–Brown, стійкість схилу.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Карпатський фліш є складною геологічною товщею, що характеризується чергуванням пісковиків, алевролітів і глинистих сланців. Його неоднорідна структура, наявність численних шаруватих переходів і тріщинуватість визначають складні механічні властивості, що суттєво впливають на інженерно-геологічні процеси, такі як зсуви, деформації схилів та несуча здатність основ під фундаментами. Вивчення фізико-механічних параметрів флішу є важливим завданням геотехніки, оскільки вони визначають поведінку масиву при навантаженні та його стійкість у природних і техногенних умовах. Традиційні методи оцінки параметрів флішу, зокрема лабораторні випробування та польові дослідження, стикаються з труднощами через змінність складу, високу анізотропію та неоднорідність порід. Це вимагає застосування сучасних методів, зокрема геофізичних методів, цифрового моделювання та машинного навчання, що дозволяють отримувати більш точні дані про механічні характеристики флішових відкладів. Аналіз цих параметрів є критично важливим для розробки ефективних заходів стабілізації схилів, проектування інженерних споруд та оцінки ризиків геодинамічних процесів у Карпатському регіоні.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У дослідженнях карпатського флішу значна увага приділялася його стратиграфічним та механічним характеристикам, оскільки цей тип гірських порід має складну геологічну будову та високий ступінь тріщинуватості (Баранник, 2018). Ряд наукових праць присвячено аналізу літологічного складу флішу, зокрема співвідношенню пісковиків, алевролітів і глинистих сланців, що впливає на його загальні властивості. Дослідження показали, що механічна поведінка флішу значною мірою визначається ступенем цементації шарів, наявністю структурних порушень та вологістю порід (Mario Rossi, 2018).

Одним із ключових аспектів є оцінка міцності та деформаційних характеристик флішу. У польових умовах (для оцінки міцності та деформаційних характеристик, для дисперсних ґрунтів) широко застосовувалися методи динамічного зондування (SPT), статичного зондування (CPTu), пресіометричних і дилатометричних випробувань, які дозволяють отримати параметри міцності та деформативності, однак, для флішових ґрунтів такі методи не можливо застосувати. Водночас лабораторні дослідження включали випробування на одновісне стискання, зрушення та тріщинуватість, що дало змогу визначити межу міцності порід флішу та їхню чутливість до зволоження (Luis García, 2020).

Окремим напрямом досліджень є аналіз зсувонебезпечних процесів, оскільки флішова товща схильна до дестабілізації під впливом змінного навантаження, коливань ґрунтових вод та тектонічних процесів (Jozef Kováčik, 2016). Результати попередніх робіт підтверджують, що тріщинуватість флішу, анізотропія міцності та наявність слабких прошарків суттєво впливають на формування зсувних деформацій. Геофізичні методи, зокрема сейсмоакустичні випробування та електророзвідка, також широко використовувалися для оцінки розповсюдження тріщинуватих зон і зміни фізико-механічних характеристик флішу з глибиною.

Останнім часом у дослідженнях все частіше застосовуються числові методи моделювання, такі як скінчено-елементний аналіз та метод дискретних елементів, що дозволяють прогнозувати поведінку флішу при різних сценаріях навантаження. Крім того, використання машинного навчання та обробки великих масивів даних відкриває нові можливості для автоматизованої оцінки механічних параметрів флішових порід на основі польових та лабораторних даних.

Таким чином, попередні дослідження заклали фундамент для розуміння механічних властивостей карпатського флішу, проте складність його будови та мінливість параметрів вимагають подальшого вдосконалення методів їхньої оцінки. Сучасні підхо-

ди, що поєднують класичні лабораторні та польові дослідження з геофізичними методами та числовим моделюванням, дозволяють отримати більш комплексну картину фізико-механічних характеристик флішу та їхнього впливу на інженерно-геологічні процеси.

МЕТА РОБОТИ

Метою даного дослідження є комплексний аналіз особливостей будови карпатського флішу та оцінка сучасних методів визначення його фізико-механічних параметрів. Особлива увага приділяється впливу літологічного складу, тріщинуватості та структурних особливостей флішу на його механічну поведінку, а також порівнянню традиційних і сучасних підходів до оцінки його міцності та деформаційних характеристик. Дослідження спрямоване на узагальнення існуючих методик, виявлення їхніх обмежень та перспектив вдосконалення, що є важливим для геотехнічних розрахунків при проєктуванні інженерних споруд у Карпатському регіоні.

КАРПАТСЬКИЙ ФЛІШ: ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА ПОРОДИ

Карпатський фліш – це складна геологічна система, що формується переважно чергуванням шарів пісковиків, алевролітів, аргілітів та інших осадових порід. Він є типовим для зон передгір'їв і гірських хребтів Карпат, утворюючись у процесі осадонакопичення в глибоководних басейнах. Флішеві відклади, які показано на рис. 1 та 2, мають специфічну будову, що значно впливає на їхні фізико-механічні параметри та поведінку в умовах зовнішніх навантажень.

Фліш формується внаслідок турбідитних потоків – підводних зсувів і грязекаменевих потоків, що переносять і відкладають осадовий матеріал на морському дні. Ці процеси відбуваються в умовах нестабільних континентальних окраїн, що сприяє формуванню складної стратиграфічної будови. В

результаті цього виникають послідовності шарів різної потужності, що складаються з чергування пісковиків і глинистих порід.

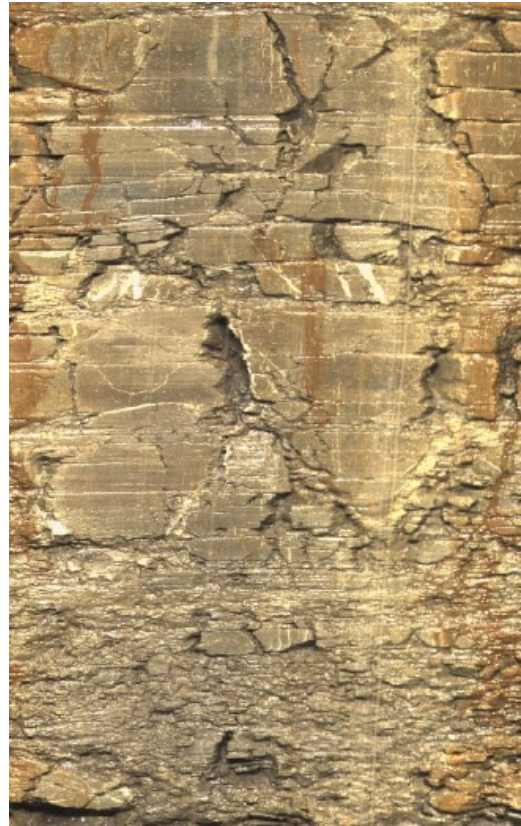


Рис.1. Фрагмент флішу в розрізі.
Fig.1. Flysch fragment in section.



Рис.2. Загальний вигляд флішу.
Fig.2. General appearance of flysch.

Структурно-тектонічні особливості карпатського флішу полягають у його інтенсивній тріщинуватості, що зумовлена складчастими деформаціями, які виникли під час альпійського орогенезу. Це призводить до

формування зон слабкості, які можуть бути потенційними площинами зсувів. Флішові породи зазнали багаторазових тектонічних деформацій, що призвело до порушення їхньої первісної напшарованості та створення складних складчасто-насувних структур. Внаслідок цього в Карпатах виділяють різні структурні покриви, такі як Кросненська зона, Дуклянський покрив та інші.

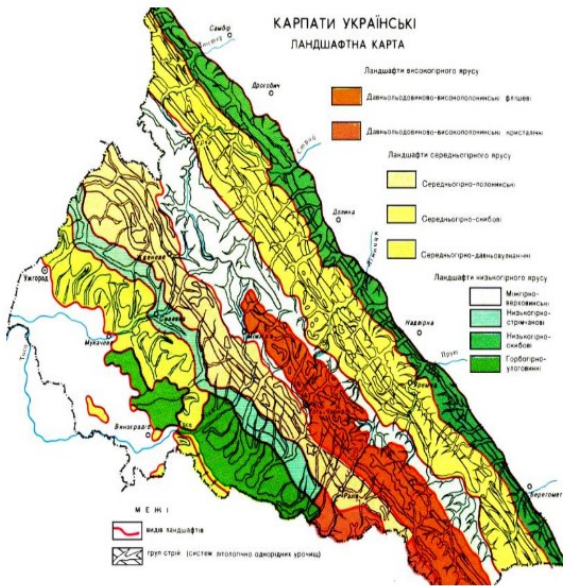


Рис.3. Ландшафтна карта Карпат.
Fig.3. Landscape map of the Carpathians.

Залежно від переважного типу порід у розрізі виділяють піщаниковий, аргілітовий та змішаний фліш. Кожен із цих типів має різні інженерно-геологічні характеристики та вимагає специфічного підходу до дослідження. Піщаниковий фліш містить масивні піщаники, що мають вищу міцність і пружність, у той час як аргілітовий фліш складається переважно з маломіцних глинистих порід, які швидко розмокають і втрачають несучу здатність.

Фізико-механічні властивості флішу визначаються його мінералогічним складом, структурою та ступенем порушення. Основними параметрами, що впливають на механічну поведінку порід, є міцність на стиснення, зсув і розтяг, деформаційні характеристики, а також водонасиченість і фільтраційні властивості. Піщаники, що входять до складу флішу, зазвичай мають ви-

соку міцність і пружність, у той час як аргіліти й алевроліти значно слабші і більш схильні до розмокання.

Значний вплив на механічні характеристики флішу має його тріщинуватість. Зони підвищеної тріщинуватості є областями концентрації напружень, що може спричинити локальні руйнування та обвали. Орієнтація тріщин також відіграє важливу роль у стійкості схилів, оскільки вона визначає можливі напрямки розвитку зсувів.

Однією з ключових особливостей карпатського флішу є його анізотропія – неоднорідність фізико-механічних властивостей у різних напрямках. Вона обумовлена переважно шаруватою будовою та орієнтацією мінеральних зерен, що формуються під впливом геодинамічних процесів. Анізотропія впливає на міцність і деформаційні характеристики порід, що особливо важливо при розрахунках стійкості схилів, проектуванні підземних споруд та оцінці ризиків геотехнічних процесів. Наприклад, міцність породи в напрямку, перпендикулярному до шарів, може бути значно нижчою, ніж уздовж них, що впливає на поведінку породи при навантаженні та її руйнування.

У Карпатах фліш відіграє ключову роль у формуванні геодинамічно активних зон, де часто спостерігаються зсуви та обвали. Водонасичення порід значно знижує їхню міцність, що особливо критично для аргілітів, які при зволоженні можуть втрачати до 70% своєї початкової міцності. Ці особливості необхідно враховувати при проектуванні інженерних споруд, особливо доріг, тунелів і підпірних стін у регіоні Карпат.



Рис.4. Загальний вигляд зміни напрямку в фліші.

Fig.4. General view of the change in direction in the flysch.

Таким чином, карпатський фліш є складною геологічною системою, що поєднує різні типи порід з неоднорідною структурою. Його формування, фізико-механічні характеристики та анізотропія мають значний вплив на інженерно-геологічні умови території, що потребує комплексного підходу до його вивчення.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФЛІШУ

Дослідження механічних параметрів флішу включає комплексний підхід, що поєднує польові та лабораторні методи. Кожен із цих методів має свої особливості, переваги та обмеження, які необхідно враховувати при визначенні інженерно-геологічних характеристик порід.

Польові методи, такі як статичне та динамічне зондування, дозволяють отримати інформацію про міцнісні та деформаційні властивості ґрунтів в природних умовах. Випробування статичним і динамічним зондуванням дозволяють оцінити опір ґрунтів проникненню зондів і визначити їхню щільність, пористість та несучу здатність. Прямі випробування на зріз і штампування застосовуються для визначення граничного напруженого стану масиву, отримання параметрів міцності та деформаційних характеристик порід. Однак, для флішових ґрунтів не можливо використовувати дані мето-

ди дослідження. Одним з польових методів, за допомогою якого можна визначити механічні властивості флішу є пресіометричний метод. За допомогою скельного дилатометра можливо визначити деформацію породи під дією контрольованого тиску та отримати значення механічних характеристик породи.

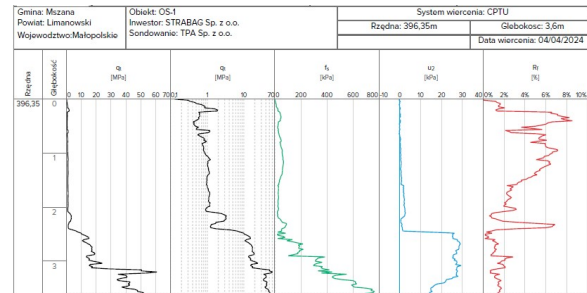


Рис.5. Результати статичного зондування.

Fig.5. Results of CPTu test.

Для дослідження флішу можна використати два основні методи буріння – шнекове і колонкове. Кожен із них має свої переваги та обмеження, проте для вивчення флішових ґрунтів вибір методу має ключове значення.

Шнекове буріння є відносно швидким і дешевшим способом створення свердловин. Воно передбачає використання бурового шнека, який обертається і виносить ґрунт на поверхню. Цей метод добре підходить для дисперсних ґрунтів, оскільки дозволяє отримати загальну інформацію про будову ґрунтових шарів. Однак шнекове буріння не підходить для флішових відкладів. Фліш складається з чергування глинистих і піщаних порід, а також щільніших прошарків, які можуть деформуватися під час буріння. Це призводить до змішування зразків і втрати їх природної структури, що ускладнює точний аналіз геологічних умов.

Колонкове буріння є дорожчим, але значно ефективнішим методом для дослідження флішу. Його основна перевага – отримання якісних кернів, які зберігають природну послідовність і стан шарів порід. Це дає змогу детально аналізувати структуру ґрунтів, визначати фізико-механічні властивості та оцінювати можливі деформації.

Крім того, колонкове буріння дозволяє опускати камеру у свердловину для візуального огляду її стінок, що дає додаткові дані про склад і стан порід. Метод потребує використання спеціального обладнання, зокрема бурових коронок і промивних рідин, що ускладнює і здорожчує процес буріння. Однак у складних геологічних умовах, зокрема у флішових товщах, саме колонкове буріння є найкращим способом отримання достовірної інформації про будову ґрунтів.

Таким чином, хоча шнекове буріння є економічнішим і може бути корисним для швидкої оцінки нашарувань, воно не підходить для флішу через ризик змішування зразків. Колонковий метод, хоч і дорожчий, дозволяє отримати більш точні дані та дає змогу проводити візуальний огляд свердловини (рис. 6), що робить його незамінним для детального дослідження флішових порід.



Рис.6. Керни флішових порід.
Fig.6. Core samples of flysch rocks.

До польових методів також відносять і геофізичні. Ці методи використовуються для непрямої оцінки фізико-механічних параметрів флішу та дозволяють отримати інформацію про структурні особливості масиву. Сейсморозвідка, зокрема методи відбитих і заломлених хвиль, дозволяє визначити з якою швидкістю хвилі проходять крізь ґрунт, які корелюють із їхньою щільністю та міцністю та дають можливість визначити такий параметр скельного ґрунту

як RMR (rock mass rating). Електророзвідка, зокрема метод опору, застосовується для оцінки водонасиченості порід, отримання інформації про пори та визначення зон можливих зсувів, однак має певні вимоги по температурі навколишнього середовища. Георадарні дослідження дозволяють отримати детальне зображення внутрішньої структури масиву, виявити тріщинуватість і приховані зони послаблення, однак на результати суттєво впливає рівень ґрунтових вод. Отже, геофізичні методи є швидкими та економічно ефективними, проте вони мають обмеження у точності та потребують калібрування за даними польових і лабораторних випробувань.

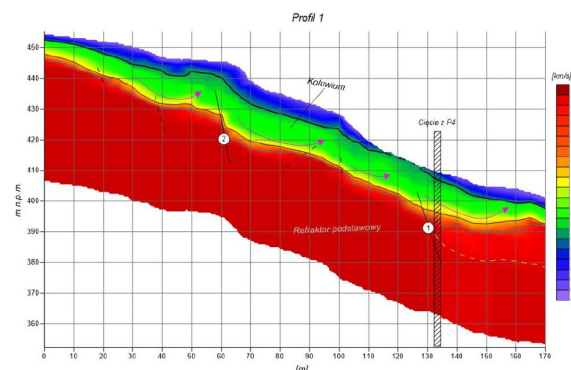


Рис.7. Результати геофізичних досліджень (швидкість проходження хвиль).
Fig.7. Results of geophysical studies (wave velocity propagation).

Лабораторні методи дослідження механічних параметрів флішу спрямовані на вивчення зразків порід у контрольованих умовах. Випробування на одноосовий і тривісний стиск дозволяють визначити основні характеристики міцності, такі як межа міцності при стиску, кути внутрішнього тертя та зчеплення. Дослідження гранулометричного складу та мінералогічного складу допомагають оцінити структурно-текстурні особливості породи, які впливають на її поведінку при навантаженні. Випробування на водопроникність та набухання критично важливі для визначення чутливості флішу до зміни вологості, що є ключовим фактором у розвитку зсувних процесів. Додатково проводяться випробу-

вання на розтягування та міцність при циклічних навантаженнях, що дозволяє оцінити поведінку флішу в умовах динамічного впливу. Лабораторні дослідження забезпечують високу точність отриманих параметрів, проте вони не завжди відображають реальну поведінку масиву через зміну напруженого стану при відборі зразків.

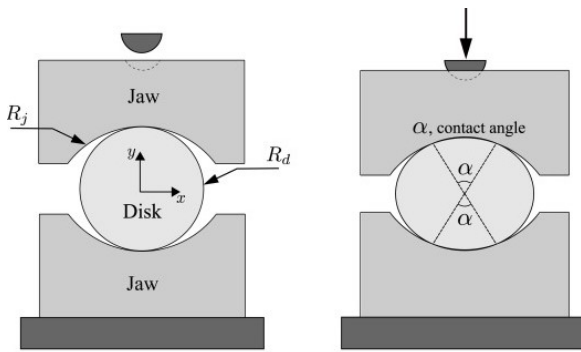


Рис.8. Схема бразильського тесту на розтяг.
Fig.8. Diagram of the Brazilian tensile test.

Комплексне застосування цих методів дозволяє отримати всебічну характеристику механічних параметрів флішу, що є критично важливим для оцінки стійкості схилів, проектування будівельних конструкцій та прогнозування геодинамічних процесів. Ґрунтовний аналіз отриманих результатів дає змогу виявити взаємозв'язки між фізико-механічними параметрами флішу та впливом природних і техногенних чинників, що сприяє розробці ефективних інженерних рішень для стабілізації геодинамічно небезпечних зон.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ФЛІШУ

Числове моделювання є ключовим методом для аналізу механічної поведінки флішу, оскільки дозволяє прогнозувати його реакцію на навантаження та зміну зовнішніх умов. Основні моделі, що використовуються для числового аналізу флішу, включають лінійно-пружні, пластичні, гіпопластичні, та анізотропні моделі, однак, для вибору моделі, яка могла б імітувати поведінку флішових порід найбільш на-

ближено до реальної поведінки, потрібно виконувати додаткові дослідження.

Лінійно-пружна модель є найпростішою і передбачає, що напруження σ і деформації ϵ пов'язані лінійною залежністю через закон Гука:

$$\sigma = C \cdot \epsilon, \quad (1)$$

де σ – напруження, C – тензор пружності, який залежить від модуля пружності та коефіцієнта Пуассона, ϵ – деформації. Ця модель підходить для найпростіших розрахунків або попереднього аналізу. Однак вона має значне обмеження: не враховує незворотні деформації, які можуть виникати внаслідок пластичної деформації матеріалу, та не має межі міцності – що робить її непридатною для аналізу поведінки флішу.

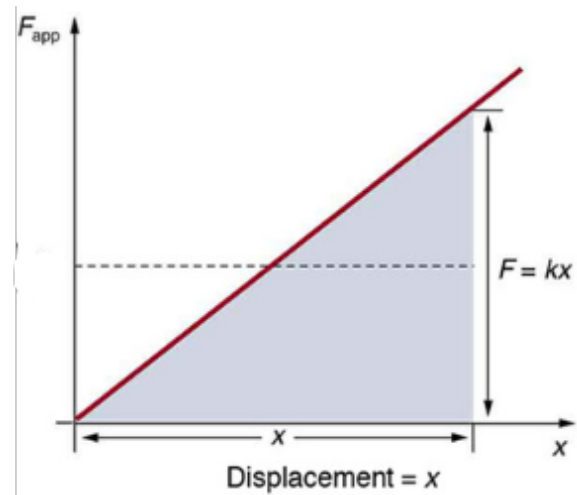


Рис.9. Графік до закону Гука.
Fig.9. Graph of Hooke's law.

Модель Мора-Кулона використовується для опису пружно-пластичної поведінки матеріалу. Вона базується на критерії руйнування:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\varphi), \quad (2)$$

де τ – напруження зсуву, c – питоме зчеплення, σ_n – нормальні напруження, φ – кут внутрішнього тертя. Ця модель ефективно описує поведінку матеріалів, однак вона має обмеження при моделюван-

ні поведінки породи в умовах високих навантажень і розвитку складних структурних змін, коли потрібно враховувати в'язкі деформації та інші нелінійні ефекти, які можуть бути важливими для флішу.

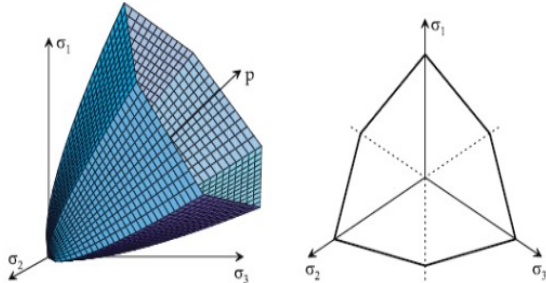


Рис.10. Поверхня текучості Мора–Кулона.
Fig.10. Mohr-Coulomb yield surface.

Гіпопластична модель є більш складним та точним підходом до опису поведінки флішу, оскільки вона враховує нелінійність зв'язку між напруженням і деформацією, а також залежність жорсткості від історії навантаження. Це дозволяє моделювати поведінку флішу в умовах, коли матеріал зазнає постійних або циклічних навантажень.

У гіпопластичній моделі відображена залежність жорсткості від розвитку деформацій, що є важливим для таких матеріалів, як фліш, де з часом може відбуватися деградація породи або її зміна під впливом зовнішніх сил. Ця модель є адаптацією ідеї моделей, схожих на "hardening soil", оскільки вона включає зміни в модулі пружності в залежності від рівня напруження і зміни структурних характеристик матеріалу. Однак, на відміну від простих моделей «hardening soil», гіпопластична модель здатна описувати більш складні поведінкові характеристики, такі як пластичні та в'язані деформації, а також структурні зміни матеріалу при великих і тривалих навантаженнях.

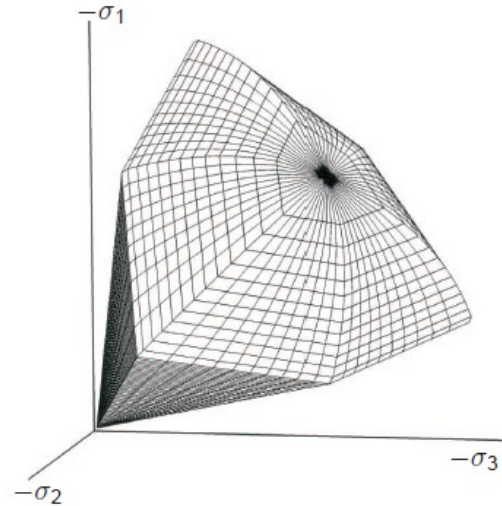


Рис.11. Поверхня текучості моделі Hardening Soil.
Fig.11. Hardening Soil model yield surface.

Модель Хоєк-Броуна є однією з найбільш розповсюджених моделей для аналізу тріщинуватих гірських порід, зокрема флішу, і застосовується для оцінки механічної поведінки в умовах складних навантажень, характерних для гірських порід, які містять тріщини та інші дефекти. Вона описується наступними рівняннями:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (3)$$

де σ_1 і σ_3 – головні напруження, m_i – параметр, який залежить від типу породи, σ_{ci} – межа міцності на стиск, m_i – параметр, який залежить від типу ґрунту.

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right), \quad (4)$$

де GSI – емпіричний індекс геологічної міцності, який залежить від якості породи, D – параметр, який залежить від ступеня порушення породи, який вона зазнає внаслідок вибуху/екскавації.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right), \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right), \quad (6)$$

Ця модель є дуже корисною для аналізу поведінки флішу в умовах складних навантажень, таких як при проєктуванні тунелів, гірських виробок чи оцінки стійкості схилів.

Geological Strength Index for Jointed Rock (Hoek & Marinos, 2000)	V. GOOD	GOOD	FAIR	POOR	V. POOR
	Decreasing Surface Quality →				
INTACT OR MASSIVE	90			N/A	N/A
BLOCKY	80				
VERY BLOCKY	70				
BLOCKY/DISTURBED	60				
DISINTEGRATED	50				
LAMINATED/SHEARED	40				
	30				
	20				
	10				
	N/A	N/A			

Рис.12. Таблиця для визначення GSI.
Fig.12. Table for determining GSI.

У деяких програмних комплексах, наприклад в ПК Rocscience, існує можливість використання анізотропних моделей матеріалу, які особливо важливі для моделювання флішу через його неоднорідну структуру.

Анізотропія означає, що механічні властивості матеріалу залежать від напрямку волокон/шарів. Це важливо для флішу, оскільки він складається з чергування слабших глинистих прошарків і міцніших піщаних або вапнякових верств. У Rocscience анізотропні моделі дозволяють:

- Враховувати різні міцнісні характеристики залежно від орієнтації шарів.
- Використовувати напрямні залежності для напружень і деформацій.
- Більш точно моделювати руйнуван-

ня і зсувні процеси у флішових масивах.

Зокрема, моделі Anisotropic Strength Model та Anisotropic Elastic Model можуть бути використані для оцінки поведінки породи, якщо її структура має істотний вплив на механічні властивості.

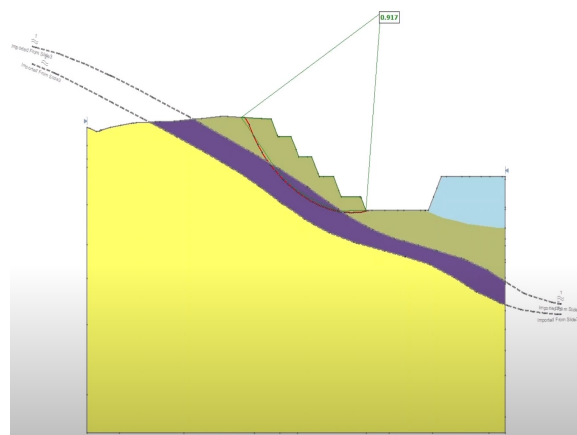


Рис.13. Приклад розрахунку стійкості схилу з урахуванням анізотропних властивостей шару ґрунту

Fig.13. Example of slope stability calculation considering the anisotropic properties of the soil layer.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Карпатський фліш є складною геологічною системою, яка характеризується значною варіативністю фізико-механічних властивостей, зумовленою його шаруватою будовою, тріщинуватістю та анізотропією. Це суттєво впливає на поведінку флішу під навантаженням, визначаючи його міцність, деформаційні характеристики та стійкість схилів. Традиційні методи оцінки фізико-механічних параметрів флішу, такі як лабораторні та польові випробування, дозволяють отримати важливі дані про механічні характеристики порід, однак мають обмеження, пов'язані зі значною неоднорідністю флішових масивів та складністю масштабування отриманих результатів. Колонкове буріння може дати бага то інформації про нашарування ґрунтів, але враховуючи що нашарування флішу можуть досить різко змінювати напрямок, з'являється необхідність у виконанні великої кількості све-

рдловин.

Геофізичні методи, зокрема сейсмічні, електророзвідка та георадарні дослідження, є ефективним засобом оцінки тріщинуватості флішу та виявлення зон послаблення, проте їх результати потребують додаткового калібрування на основі польових і лабораторних випробувань. Використання числового моделювання значно розширює можливості прогнозування механічної поведінки флішу. Методи кінцево-елементного аналізу (FEM), дискретно-елементного моделювання (DEM) дозволяють враховувати нелінійні ефекти, пластичні деформації, тріщинуватість та анізотропні властивості породи. Використання різних моделей, зокрема Мора-Кулона, Хоєк-Брауна, гіпопластичних та анізотропних моделей, забезпечує високу точність розрахунків і можливість оцінки стійкості схилів, поведінки флішу під навантаженням і прогнозування геодинамічних процесів.

Найбільш ефективним підходом до оцінки механічних властивостей флішу є поєднання кількох методів дослідження, що дозволяє мінімізувати невизначеність у прогнозах та отримати більш достовірні результати. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення методів числового моделювання, розширення використання геофізичних методів та розробку рекомендацій щодо стабілізації схилів і фундаментів у флішових товщах Карпатського регіону.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баранник, О. (2018). Особливості формування морфогенетичних властивостей гірсько-лучно-буроземних ґрунтів Чорногірського масиву Українських Карпат. Вісник Львівського університету. Серія географічна.
2. Rossi, M., & Brambilla, L. (2018). Lithological characteristics and engineering properties of flysch deposits in the Northern Apennines, Italy. *Journal of Engineering Geology*.
3. García, L., & Fernández, M. (2020). Mechanical behavior of flysch rocks: A case study from the Pyrenees. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
4. Kováčik, J., & Kováč, P. (2016). Landslides in flysch zones of the Western Carpathians. *Geographia Slovaca*.
5. Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In *Proceeding of the 5th North American Rock Mechanics Symposium* (Vol. 1, pp. 267–273). Toronto, Canada.
6. Rocscience Inc. (n.d.). *Rocscience software documentation*. Rocscience. Retrieved from <https://www.rocscience.com>.

REFERENCES

1. Barannyk, O. (2018). Osoblyvosti formuvannya morfohene-tychkykh vlastyvostei hirs'ko-luchno-burozemnykh hruntiv Chornohirs'koho masyvu Ukraïns'kykh Karpat. *Visnyk L'vivs'koho universytetu. Seriya heohrafichna*.
2. Rossi, M., & Brambilla, L. (2018). Lithological characteristics and engineering properties of flysch deposits in the Northern Apennines, Italy. *Journal of Engineering Geology*.
3. García, L., & Fernández, M. (2020). Mechanical behavior of flysch rocks: A case study from the Pyrenees. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
4. Kováčik, J., & Kováč, P. (2016). Landslides in flysch zones of the Western Carpathians. *Geographia Slovaca*.
5. Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In *Proceeding of the 5th North American Rock Mechanics Symposium* (Vol. 1, pp. 267–273). Toronto, Canada.
6. Rocscience Inc. (n.d.). *Rocscience software documentation*. Rocscience. Retrieved from <https://www.rocscience.com>.

Features of the Structure of the Carpathian Flysch and Modern Methods for Assessing Its Physical and Mechanical Properties

Liudmyla BONDAREVA,
Vasyl BEHAN

Summary. The Carpathian flysch is a complex geological formation characterized by alternating

layers of sandstone, aleurolite, and clayey shale, significant fracturing, and anisotropy of mechanical properties. These features substantially influence the formation of geological processes, including slope stability assessment, bearing capacity determination, and the likelihood of landslide deformations. Studying the physical and mechanical parameters of flysch is an important task, as they determine the behavior of rocks under the influence of natural and anthropogenic factors.

This paper analyzes modern methods for evaluating the mechanical characteristics of the Carpathian flysch, which include laboratory and field studies. Field methods (SPT, CPTu, pressuremeter tests, rock dilatometers, geophysical studies) allow for the assessment of soil resistance, strength parameters, and other important characteristics directly in their natural state. The paper explores the possibility of conducting dynamic and static probing in the Carpathian flysch conditions. Geophysical methods, including seismic-acoustic testing, electrical resistivity, and ground-penetrating radar studies, provide information about the possible size of the degraded zone, indirect assessment of the strength and fracturing of rocks at significant depths. Laboratory studies (unconfined compression, shear tests) provide a detailed analysis of structural features and the material's behavior under various loads.

Special attention is given to numerical modeling of the mechanical behavior of flysch. The paper discusses the main numerical models that can be applied to model flysch rocks, including linear-elastic, elastic-plastic, hypoplastic, and models that account for anisotropy. The advantages of using anisotropic material models are considered, as they allow for a more accurate assessment of the influence of layering orientation on the strength and deformation properties of flysch.

As a result, it can be concluded that a comprehensive approach combining laboratory, field methods, and numerical modeling is the most effective for assessing the mechanical characteristics of flysch. The obtained data can be used for slope stability forecasting, stabilization measures development, and engineering structure design in regions with flysch deposits.

Keywords. Carpathian flysch, numerical modeling, anisotropy, Hoek-Brown, slope stability