

UDC 624.137.2

Anatolii P. Sirenko, PhD, Docent, Docent of Department of dynamics and strength machines and strength of materials of the Institute of Mechanical Engineering
ORCID: 0000-0002-4591-1165 *e-mail*: sirenkoap@gmail.com

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

ASSESSMENT OF A LANDSLIDE HAZARD TAKING INTO ACCOUNT SEISMIC IMPACT

Abstract. *Landslides represent a major threat to human life, constructed facilities, infrastructure and natural environment in many regions of the world. During the decade 2000-2009, natural disasters caused nearly one million fatalities, affecting nearly 2.5 billion people across the globe. The landslide frequency of about 20 major events per year in Europe is the highest compared to floods, earthquakes and cyclones. All 50 States and the U.S. territories are subjected to landslides and other ground-failure problems; 36 States have changed (from moderate to highly) the severe landslide hazards. Landslides in the USA constitute a serious hazard. They cause the substantial human and financial losses, estimated as 25...50 deaths annually and to cost approximately \$ 1 billion to \$ 3 billion per year.*

Activation of seismic activity in Vrancea area, the Black Sea region and in the whole world has led to increase level of seismic hazard in Ukraine and in the finally growth relevant provoke factors of landslide movement. Whole Ukraine, not only as earlier considered Carpathian and Crimean regions, is now an area with high potential risk of future huge earthquakes. "... In areas with reduced characteristics of soil (frequent flooding, landslides, etc.) can be observed 7–8-magnitude effects", – said the deputy director of the Institute of Geophysics of the National Academy of Science of Ukraine O. Kendzera. Before the Japanese earthquake (11.03.2011) considered in the world that at 9-magnitude earthquake acceleration of ground can be maximum of 0,4 g. "But the Japanese catastrophe showed whole 2,7 g. This led to much more damage than expected. This means that now is the time when we must to correct all parameters of earthquakes," – says S. Ohasyan, the director of the Armenian Institute of Geophysics and Engineering Seismology. And O. Kendzera added: "... we must to correct initial data, that designers will use in the projects of buildings and construction".

In the early stages of the design of anti-slip structures for operational approximate calculations of the slope and shear pressure coefficient, a program is required that has the following properties: ease of use; graphical, human-oriented interface; is based on tried and tested mathematical methods; endowed with a pleasant form of presentation of the results of calculations (graphical and tabular forms); speed of calculations, etc. LANDSLIDE meets these requirements. An example of taking into account seismic factors when calculating slopes according to the second group of boundary states is considering. A typical calculation using the LANDSLIDE program is given. The slope stability coefficients was calculated using the LANDSLIP program by Maslow-Berer and Shakhutnyants methods. By using the limit equilibrium theory, the mechanism of "unloading the accumulated tension" in the slope massive during an earthquake is described.

Keywords: *slope; earthquake; landslide; marginal equilibrium method; stability*

А.П. Сіренко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ДО ОЦІНКИ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ З УРАХУВАННЯМ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВІВ

***Анотація.** Зсуви становлять серйозну загрозу життю людей, об'єктам інфраструктури та природному середовищу в багатьох регіонах світу. Протягом останнього десятиліття (з 2000 по 2009 рр.) стихійні лиха пошкодили та зруйнували близько одного мільйона об'єктів, що безпосередньо торкнулося майже 2,5 млрд населення у всьому світі. Щорічно у Європі трапляється близько 20 великих зсувів, що за частотою прояву значно більше, ніж повені, землетруси та урагани. Усі 50 штатів території США відчувають зсувні та інші ґрунтові відмови. Причому у 36 штатах США зсувна загроза змінилася від помірної до вкрай небезпечної [2]. Зсуви у США становлять серйозну небезпеку, які призводять до суттєвих людських і фінансових втрат: щорічно від 25 до 50 смертей та збитки від 1 до 3 млрд доларів.*

Активізація сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвела до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України та, у кінцевому підсумку, зростання відповідного зсувопровокуючого фактора. Україна, а не тільки карпатський і кримський регіони, як раніше вважалося, є зоною, де потенційно можливі землетруси, причому доволі сильні. «...В районах з послабленими ґрунтами (часті зсуви та ін.) можуть спостерігатись і 7–8-бальні ефекти», – зазначає заступник директора Інституту геофізики НАНУ О. Кендзера. До японського землетрусу (11.03.2011) вважалося, що при 9-бальному землетрусі прискорення може бути максимум 0,4 g. «Але японська катастрофа показала всі 2,7 g. Це призвело до більших руйнувань, ніж очікувалось. Це значить, що час передивитись всі параметри землетрусів», – підкреслює директор вірменського Інституту геофізики і інженерної сейсмології С. Огасян. О. Кендзера додає, що відповідно, потрібно переглянути і дані, які використовують проєктувальники при возведенні будівель та споруд.

На ранній стадії проєктування протизсувних споруд для оперативних наближених розрахунків коефіцієнта стійкості схилу та зсувного тиску потрібна програма, яка має наступні властивості: зручність у користуванні; графічний, людино-орієнтований інтерфейс; базується на апробованих математичних методах; наділена приємною формою подання результатів розрахунків (графічна та таблична форми); швидкість виконання розрахунків та ін. Таким вимогам відповідає програма LANDSLIDE. Наведено приклад врахування сейсмічних факторів при розрахунках схилів за другою групою граничних станів. Наведено типовий розрахунок за допомогою програми LANDSLIDE коефіцієнтів стійкості схилу методами Маслова-Берера і Шахунянца. В межах теорії граничної рівноваги описаний механізм «розвантажування накопиченої напруженості» в схиловому масиві при землетрусі.

***Ключові слова:** схил; землетрус; зсув; метод граничної рівноваги; стійкість*

Вступ

Зсуви становлять серйозну загрозу життю людей, об'єктам інфраструктури та природному середовищу в багатьох регіонах світу. Протягом останнього десятиліття (з 2000 по 2009 рр.) стихійні лиха пошкодили та зруйнували близько одного мільйона об'єктів, що безпосередньо торкнулося майже 2,5 млрд населення у всьому світі. Щорічно у Європі трапляється близько 20 великих зсувів, що за частотою прояву значно більше, ніж повені, землетруси та урагани [1]. Усі 50 штатів територій США відчувають зсувні та інші ґрунтові відмови. Причому у 36 штатах США зсувна загроза змінилася від помірної до вкрай небезпечної [2]. Зсуви у США становлять серйозну небезпеку, які призводять до суттєвих людських і фінансових втрат: щорічно від 25 до 50 смертей та збитки від 1 до 3 млрд доларів [3]. В Україні ж загалом станом на 01.12.2011 виявлено понад 23 100 зсувів, 17 400 зсувів – станом на 01.12.1997. Таким чином, за останні роки відбулося збільшення кількості зсувів у понад 1,3 раза, а за 30 років – у понад 3 рази. Це пов'язано з тим, що протягом другої половини ХХ ст. на більшій частині геологічних структур території України накопичені значні техногенні зміни верхньої зони геологічного середовища, які вплинули на його напружено-деформований стан та сейсмічний режим:

- вилучення великих обсягів порід при видобутку корисних копалин (вугілля до – 10 млрд тонн, залізних руд до – 5 млрд тонн, загальне вилучення руд і вміщуючих порід – до 60–70 млрд тонн);

- накопичення великих обсягів води у поверхневих водосховищах та техногенних водоймищах (до 50 млрд м³), з порушенням балансу підземних вод та зростанням потенційної енергії геологічних структур;

- регіональне техногенне водонасичення верхньої зони геологічного середовища з формуванням регіонального підтоплення на 5% території держави, переважно в межах техногенно порушених геологічних структур гірничо-видобувних регіонів (Донбас, Кривбас, Прикарпаття), великих промислово-міських агломераціях та ін.;

- порушення гідродинамічної рівноваги басейнів підземних вод та нафтогазоносних провінцій внаслідок видобутку великих обсягів нафти, газу, прісних і мінеральних вод та змін пружно-напруженого режиму системи "флюїд – мінеральний скелет". Загалом на території України еродовано 12,4 млн га сільгоспугідь. Середньорічні втрати ґрунтів з орних земель в середньому становлять 10–15 т/га. Кількість ярів різного ступеня розгалуження, глибини врізу і активності перевищує 500 тис. Небезпечні (надзвичайні) ситуації виникають в зв'язку з ерозією при зливах в районах із значною енергією рельєфу. Це переважно гірські та передгірські райони Карпат і Криму. Особливо інтенсивно ерозія протікає при паводкових підняттях рівня води на гірських річках та потоках. Тільки за останні десятиліття в Карпатах і Прикарпатті відмічались надзвичайні події в зв'язку із зливами (1965, 1969, 1974, 1993, 1994, 1998, 2001 рр.). Зокрема, в 1965 році в районі Чернівців випали зливові опади, які викликали катастрофічну повінь на струмку Клокучка. Максимальний шар опадів в м. Чернівці був зафіксований в центральній частині міста і складав 222 мм/добу. Злива завдала великих збитків міському господарству Чернівців. Були затоплені вулиці в низовій частині міста, залізничний вокзал, міська електростанція, зруйновані

розмивом будинки, розмиті дороги, знесені мости, занесено наносами залізничне полотно. Максимальні модулі стоку р. Клокучки під час паводку перевищили 3000 л/сек. км². Гранична насиченість покривних відкладів, підняття рівня ґрунтових вод, глибина і бокова ерозія водотоків обумовили розвиток зсувів. Руйнування споруд, зсуви і селі в Карпатах відмічались також при зливових опадах в 1969, 1974, 1992, 1998, 2001 рр.

Основна частина

Найбільш поширеними процесами, що зумовлені взаємодією атмо-, гідро- і літосфери, на території України є схилі гравітаційні процеси – ерозія, абразія, зсуви, обвали – які взаємопов’язані, часто виступають спільно або послідовно доповнюючи один одного (рис. 1).

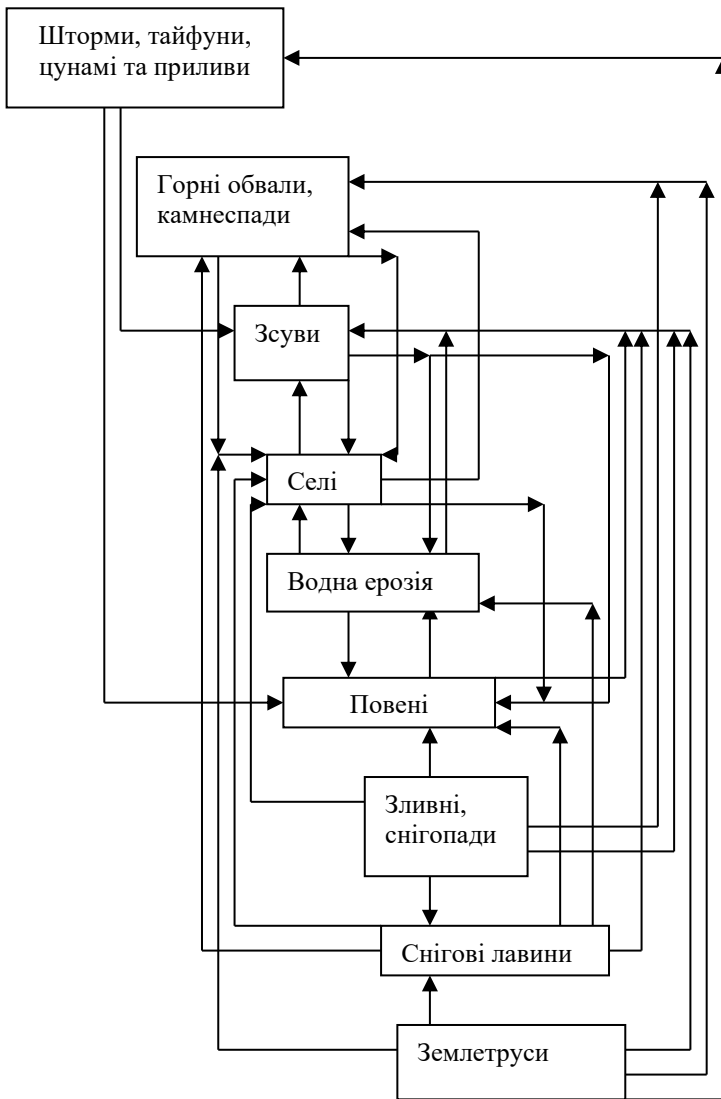


Рис. 1 – Системна дія ендо- і екзодинамічних процесів

Гравітаційні процеси – різноманітні форми руху геологічних тіл, при яких основною рушійною силою виступає сила тяжіння. Види, масштаби, швидкості, тривалість руху порід визначається перепадами висот конкретної місцевості. В межах України, в її гірських районах Карпат і Криму, спостерігаються також прояви селів як форми швидкого переміщення породного матеріалу в річищах гірських річок та ярів. В Карпатах зареєстровано понад 271 селевий водозбір в басейнах р.р. Черемоша, Прута, Дністра, Тиси. В Гірському Криму досліджено 75 селевих водозборів переважно на малих річках Південно-Східного Криму (Кутлак, Шелен, Ускут, Арпат, Судак, Ворон). В меншій мірі на річках південного берегу Криму (Учан-Су, Дерикойка, Улу-Узень, Авунда); північного схилу (Альма, Бельбек, Чорна) та в ярах (Туакська балка, Ставлухар, Західно-Карабахський, Кастель). Крім техногенних і природно-техногенних змін інженерно-геологічних умов та напруженого стану великих частин геологічних структур, в останні десятиріччя відбувається регіональне порушення балансу потенційної енергії та розвиток техногенних землетрусів у верхній зоні геологічного середовища при затопленні шахт, підйомі рівня моря, проведенні вибухових робіт та ін. Перший досвід комплексного аналізу сейсмічного та структурно-геодинамічного режимів геологічних структур був пов'язаний з оцінкою стійкості ТГС "проммайданчик Крим АЕС – ГС" (1988–1990 рр.) (акад. Осипов В.І., проф. Демчишин М.Г., акад. Шнюков Є.Ф., акад. Шестопапов В.М. та ін.) [4–9]. В цілому сейсмо-геофізична та структурно-тектонічна вивченість території України є дуже нерівномірною і недостатньою для вірогідної оцінки інженерно-сейсмогеодинамічної небезпеки. Сейсмічність території України визначається сейсмоактивними зонами Карпат, особливо зоною масиву Вранча на стику Східних і Південних Карпат на території Румунії і зоною кримських сейсмогенних осередків. В останні роки зафіксовані малопотужні сейсмогенні осередки в Прикарпатті і Українських Карпатах.

В літописних джерелах зафіксовані руйнівні прояви сейсмічності на території України: в Києві в 1170, 1196, 1230 рр., зокрема, в 1230 р. внаслідок сильного землетрусу, що відчувався по всій території Русі (Київ, Переяслав, Новгород, Ростов), був зруйнований побудований в 1176 р. Успенський собор Печерської Лаври. Збережені дані про землетруси на Україні 1650, 1730, 1793 рр. Описані наслідки землетрусів 26.10.1802 р., 26.11.1829 р., 23.01.1838 р. Достатньо повно вивчений макроефект на території України землетрусів із зони Вранча 6.10.1908 р. та 22.10.1940 р. Спостерігались і вивчались макроефекти руйнівних землетрусів 4.03.1977 р., 30.08.1986 р., а також 30.05.1990 р.

Активізація сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвела до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України та, у кінцевому підсумку, зростання відповідного зсувопровокуючого фактора. Україна, а не тільки карпатський і кримський регіони, як раніше вважалось, є зоною, де потенційно можливі землетруси, причому доволі сильні. «...В районах з послабленими ґрунтами (часті зсуви та ін.) можуть спостерігатись і 7–8-бальні ефекти», – підкреслює заступник директора Інституту геофізики НАНУ О. Кендзера [10]. До японського землетрусу (11.03.2011) вважалось, що при 9-бальному землетрусі прискорення може бути максимум 0,4 g. «Але японська катастрофа показала

всі 2,7 г. Це призвело до більших руйнувань, ніж очікувалось. Це значить, що час передивитись всі параметри землетрусів», – зазначає директор вірменського Інституту геофізики і інженерної сейсмології С. Огасян. О. Кендзера додає, що, відповідно, потрібно переглянути і дані, які використовують проектувальники при зведенні будівель та споруд [10].

Інженерний захист територій, будинків та споруд від небезпечних впливів сучасних геологічних процесів як науково-технічна проблема набуває дедалі більшої актуальності. Аналіз ефективності заходів з інженерного захисту, виконаних у минулому в окремих регіонах України, сучасний його стан свідчать, що за всіма основними напрямками вирішення проблеми існує багато питань, які потребують подальшого опрацювання. Про це свідчать масштаби та наслідки повені у Прикарпатті у липні 2008 р. Важливим напрямом, де потрібні нові підходи, є інженерно-технічні розвідування. Коли йдеться про здійснення заходів з інженерного захисту, то їх основним завданням є визначення масштабів реальної загрози руйнувань, яких можуть зазнати об'єкти й території від розвитку небезпечних геологічних процесів. Як недооцінка, так і переоцінка цієї загрози вкрай небажані. У першому випадку це спричинить непередбачено великі збитки, а в другому – невиправдані витрати.

У кожному конкретному випадку проектування та виконання заходів з інженерного захисту слід виходити з таких принципів [6, 8]:

- стимулювання здатності природних систем до саморегулювання й самовідновлення;
- урахування стадійності, циклічності та ритмічності, характерних для перебігу геологічних процесів, особливо екзогенних, що знаходяться в тісному зв'язку з гідрометеорологічними чинниками;
- адекватності заходів характеру і масштабам прояву небезпечних геологічних процесів, що важливо з економічних та екологічних позицій;
- комплексності проведення інженерного захисту й урахування селективності дії окремих заходів, спрямованих на усунення певних чинників, що спричиняють небезпечні геологічні процеси;
- поєднання захисних заходів з інженерною підготовкою території та елементів захисних систем з конструктивними елементами будівель і споруд.

Слід також удосконалювати методи оцінки вразливості об'єктів стосовно дії небезпечних геологічних процесів та способи її зменшення [11–13]. Для математичного моделювання напружено-деформованого стану схилів існує багато програм та програмних комплексів: канадська програма GEOSLOPE, програмний комплекс LANDSLIDE різних версій та ін. [14–16]. Однак, на ранній стадії проектування протизсувних споруд для оперативних наближених розрахунків коефіцієнта стійкості схилу та зсувного тиску потрібна програма, яка має наступні властивості: зручність у користуванні; графічний, людино-орієнтований інтерфейс; базується на апробованих математичних методах; наділена приємною формою подання результатів розрахунків (графічна та таблична форми); швидкість виконання розрахунків та ін.

На наш погляд, всім цим вимогам відповідає програма LANDSLIDE. На рис. 2 та 3 наведено типовий розрахунок за допомогою програми LANDSLIDE. У таблиці 1 наведені коефіцієнти стійкості схилу, відповідні кожному з трьох варіантів та розраховані за допомогою програми **LANDSLIP** методами Маслово-Берера і Шахунянца.

Таблиця 1 – Коефіцієнт стійкості схилу K_y

№ п/п	Номер варіанта	K_y , розрахунок за методом Шахунянця	K_y , розрахунок за методом Маслова- Берера	Сейсмічність, бали
1	Тестовий приклад	1.16	1.23	0- 6
2	1	1.07	1.15	7
3	2	0.99	1.07	8
4	3	0.87	0.95	9

На рис. 2 і 3 наведені епюри зсувного тиску, отримані при математичному моделюванні фактору сейсмічності за допомогою програми **LANDSLIP**.

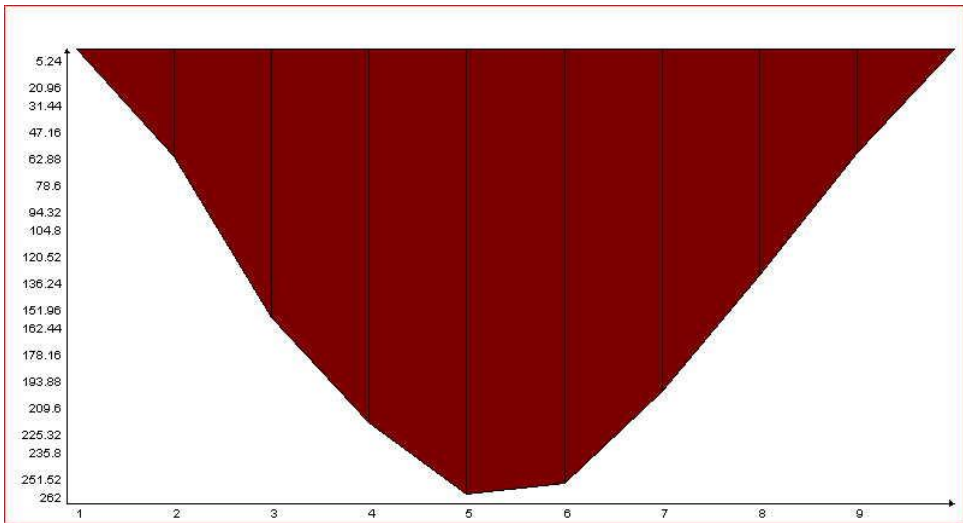


Рис. 2 – Епюра зсувного тиску. Тестовий приклад. Метод Шахунянця

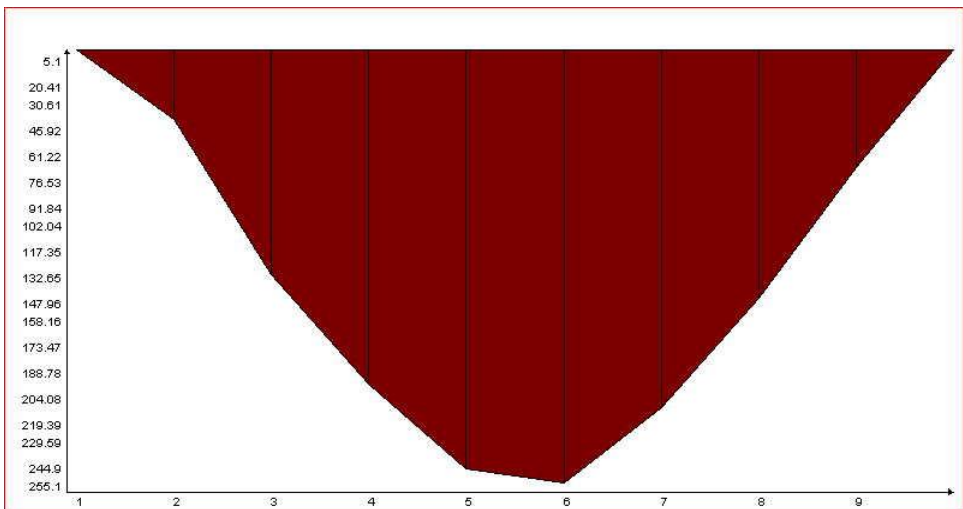


Рис. 3 – Епюра зсувного тиску. Варіант № 3. Метод Маслова-Берера

За допомогою аналізу чисельних розрахункових даних отримано наступне:

1. Незначне підвищення сейсмічності майданчика будівництва (7–8 балів) призводить до зниження коефіцієнта стійкості. Схил, спочатку стійкий, переходить в стан граничної рівноваги.

2. Подальше підвищення сейсмічності майданчика будівництва (до 9 балів і вище) призводить до зниження коефіцієнта стійкості до 20% ~ 25%. При розрахунковому землетрусі відбудуться незворотні зрушення зсувних мас вниз по схилу, що в окремих випадках може призвести до загибелі людей і руйнування будівельних конструкцій, що зводяться на такому схилі.

3. За даними чисельних розрахунків, отриманих на основі комп'ютерної програми LANDSLIP, можна поетапно простежити процес накопичення і перерозподілу напружень в зсувному схилі при підвищенні сейсмічності майданчика будівництва, що призводить, в кінцевому підсумку, до руху зсуву (розвантаження накопиченої напруженості):

- Симетричний розподіл зсувного тиску при сейсмічності будівельного майданчика від 0 до 6 залишається симетричним і при сейсмічності 9 балів. Однак при цьому, при зовнішньому збереженні форми розподілу зсувного тиску, відбуваються суттєві кількісні зміни результуючого зсувного тиску по блоках.

- При зниженні сейсмічності майданчика від 6 до 9 балів відбувається поетапне зменшення максимуму зсувного тиску в схилі приблизно 10–15% на один бал, що корелює зі зниженням підсумкового коефіцієнта стійкості зсувного схилу в цих же межах. Схил зі стану стійкої рівноваги переходить в нестійкий стан при розрахункових параметрах землетрусу (сейсмічність будівельного майданчика 8–9 балів).

- Щоб перейти в нову стійку «форму», під час землетрусу відбудеться «розвантаження накопиченої напруженості» – рух зсувних мас. Схилі маси стануть стійкими вже в новому положенні, нижче щодо початкового положення по висоті.

Висновки

1. Наведено приклад врахування сейсмічних факторів при розрахунках схилів за другою групою граничних станів.

2. В межах теорії граничної рівноваги описаний механізм «розвантаження накопиченої напруженості» в схилі масиву при землетрусі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lacasse S. 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013. – P. 15–34.
2. The U.S. Geological Survey Landslide Hazards Program 5-Year Plan 2006-2010. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
3. National Landslide Hazard Mitigation Strategy – A framework for loss reduction / Circular 1244. U.S. Department of the Interior. USGL.
4. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів / Гошовський С.В., Рудько Г.І., Преснер Б.М. – К., ЗАТ "НІЧЛА-ВА", 2002. – 624 с.

5. Шнюков Е.Ф. Шестопапов В.М., Демчишин М.Г. и др. Экологическая геология Украины. Справочное пособие. – К.: Наук. думка, 1993. – 408 с.
6. Демчишин М.Г. Современная динамика склонов на территории Украины (Инженерно-геологические аспекты). – К.: Наук. думка, 1992. – 256 с.
7. Евсеев С.В. Землетрясения Украины. – Киев. Изд.-во АН УССР, 1961. – 75 с.
8. Демчишин М.Г., Краев В.Ф. Динамика и сейсмичность склонов территорий, прилегающих к сейсмогенным зонам // Геол. журн. 1987. № 6. – С. 42–48.
9. Чекунов А.В., Кутас В.В., Харитонов О.В. Сейсмичность Киева // Геол. журн. 1991. – № 2. – С. 24–33.
10. Ученые: Сильные землетрясения могут быть во всей Украине *Новости Украины* / 23 марта 2011 | 08:51 Режим доступа: <http://for-ua.com/ukraine /2011/03/23/085121.html>
11. Сиренко А.П. Влияние уровня грунтовых вод на устойчивость оползневого склона / А.П. Сиренко // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2014. – Вип. 80. – С. 210–213.
12. Трофимчук А. Н. Математическое моделирование устойчивости оползневого склона при подъеме уровня грунтовых вод / А. Н. Трофимчук, Ю. И. Калюх, А. С. Глебчук // *Екологія і ресурси*. – 2008. – № 18. – С. 51–58.
13. Сиренко А.П. Критична відстань між утримуючими елементами для зсувних та зсувонебезпечних схилів Чернівецької області / А.П. Сиренко // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2013. – № 13. – С. 73–76.
14. Kaliukh Yu.I., Khavkin A., Khavkin K. Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine // *Fib Symposium Tel-Aviv 2013*. – P. 625–628.
15. TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine / O. Trofymchuk. I. Kaliukh, O. Klimenkov / In book: *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools*. – 2018. – P. 491–508.
16. Сиренко А.П. Формування оптимальних по Парето рішень відмов ґрунтової основи в умовах сейсмічної небезпеки / А.П. Сиренко // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2019. – № 30. – С. 114–122. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.113-122>

Стаття надійшла до редакції 24.10.2019 і прийнята до друку після рецензування 26.12.2019

REFERENCES

1. Lacasse, S. (2013). 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013. (pp. 15-34). Paris.
2. The U.S. Geological Survey Landslide Hazards Program 5-Year Plan 2006-2010. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
3. National Landslide Hazard Mitigation Strategy – A framework for loss reduction. Circular 1244. U.S. Department of the Interior. USGL.
4. Hoshovskyi, S.V., Rudko, H.I., & Presner, B.M. (2002). *Ekolohichna bezpeka tekhnopryrodnykh heosystem u zviazku z katastrofichnym rozvytkom heolohichnykh protsesiv*. Kyiv: ZAT "NICHLA-VA". (in Ukrainian)
5. Shniukov, E.F. Shestopalov, V.M., & Demchishin, M.H. (1993). *Jekologicheskaja geologija Ukrainy. Spravochnoe posobyje*. Kyiv: Nauk. dumka. (in Russian)
6. Demchishin, M.G. (1992). *Sovremennaja dinamika sklonov na territorii Ukrainy (Inzhenerno-geologicheskie aspekty)*. K.: Nauk. dumka. (in Russian)
7. Evseev, S.V. (1961). *Zemletrjasenija Ukrainy*. Kiev: Izd.-vo AN USSR. (in Russian)
8. Demchishin, M.G., & Kraev, V.F. (1987). *Dinamika i sejsmichnost' sklonov territorij, priliegajushhij k sejsmogennym zonam. Geol. Zhurn.*, 6, 42-48. (in Russian)

9. Chekunov, A.V., Kutas, V.V., & Haritonov, O.V. (1991). Sejsmichnost' Kiev. *Geol. zhurn.*, 2, 24-33. (in Russian)
10. Uchenye: Sil'nye zemletrjasenija mogut byt' vo vsej Ukraine Novosti Ukrainy. (23 marta 2011 | 08:51). Retrieved from <http://for-ua.com/ukraine /2011/03/23/085121.html>. (in Russian)
11. Sirenko, A.P. (2014). Vlijanie urovnja gruntovyh vod na ustojchivost' opolznevogo sklona. *Budivelni konstruktsii: zb. nauk. pr.*, 80, 210-213. (in Russian)
12. Trofimchuk, A.N., Kaliukh, Ju.I., & Glebchuk, A.S. (2008). Matematicheskoe modelirovanie ustojchivosti opolznevogo sklona pri podjeme urovnja gruntovyh vod. *Ekolohiia i resursy*, 18, 51-58. (in Russian)
13. Sirenko, A.P. (2013). Krytychna vidstan mizh utrymuiuchymy elementamy dlia zsvnykh ta zsvonebezpechnykh skhyliv Chernivetskoj oblasti. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 13, 73-76. (in Ukrainian)
14. Kaliukh, Yu.I., Khavkin, A., & Khavkin, K. (2013). Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine. In *Fib Symposium*, Tel-Aviv, 2013. (pp. 625-628). Tel-Aviv.
15. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Klimenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. In book: *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (pp. 491-508).
16. Sirenko, A. (2019). Formation by optimal on Pareto resolve of the problems of ground-based failure in conditions of seismic danger. *Environmental Safety And Natural Resources*, 30(2), 113-122. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.113-122> (in Ukrainian)

The article was received 24.10.2019 and was accepted after revision 26.12.2019

Сіренко Анатолій Петрович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37

e-mail: sirenkoap@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-4951-1165