

УДК 624.01:51.001:624.131

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.21>

РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ СХИЛІВ ОДЕСЬКОГО УЗБЕРЕЖЖЯ

Мироненко І. М. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри «Цивільна інженерія та архітектура»
Одеського національного морського університету
ORCID ID: 0000-0002-5322-9859

Литвиненко В. В. – старший викладач кафедри «Морські та річкові порти,
водні шляхи та їх технічна експлуатація»
Одеського національного морського університету
ORCID ID: 0000-0002-0715-5190

На Чорноморському узбережжі, зокрема, в Одеській області, існує величезна кількість зсувних схилів. Практично вся незабудована частина узбережжя є схилами де сталися або відбуваються зсувні явища. Більшість зсувів обумовлено геологічною структурою ґрунтів. Типами прибережних зсувів є: обвалення зі зрізом і обертанням і обвалення сповзання. Більшість зсувів знаходиться в активному стані. Найочевидніше сліди зсувних процесів помічені в приміських популярних селищах – Крижанівка, Дофінівка, Санжейка, Саймон.

Останнім часом окремими фахівцями висловлюються думки, що не може, бути будь-якої вираженої поверхні ковзання. При зсуві шари ґрунтів глибоко захоплюються деформаціями, величини яких безперервно зменшуються в міру віддалення від поверхні ґрунту. Ці обвалення мас ґрунту без фіксування поверхонь ковзання можуть відбуватися тільки при в'язкопластичному перебігу ґрунту.

Причина зсувів – забудова з відсутністю системи стоку ґрунтових вод, недбале ставлення до берегоукріплення та хаотичне будівництво без систем берегозахисту. Раніше в таких зсувонебезпечних районах дозволялося будувати в основному дерев'яні легкі конструкції. Зараз же все узбережжя стало зоною котеджової важкої забудови. Балки, такі як в Чорноморську, засипані, а системи відводу вод не організовані. А адже саме вони і служили буферними місцями накопичення вод при зливових дощах і рясному випаданні опадів. Також інтенсивне будівництво на березі змінило перебігу, а відсутність берегоукріплювальних споруд призвело до того, що в новій ситуації берег виявився беззахисним.

Характер деформацій ґрунту, що відбуваються при обваленні земляних мас істотно залежить від властивостей ґрунту. Неможливо створити таку розрахункову модель, яка могла б відобразити велику різноманітність особливостей властивостей ґрунтів, що зустрічаються в природі.

Ключові слова: пружнов'язкопластичний, стійкість, схил, неоднорідність, навантаження, напруга, деформації, переміщення.

Mironenko I. M., Litvinenko V. V. Calculation of stability of slopes of the Odessa coast

There are a huge number of landslide slopes on the Black Sea coast, particularly in Odesa region. Almost the entire undeveloped part of the coast is slopes where landslides have occurred or are occurring. Most landslides are caused by the geological structure of the soil. The types of coastal landslides are shear and rotation landslides and slip landslides. Most landslides are active. The most obvious traces of landslide processes are seen in the popular suburban villages of Kryzhanivka, Dofinivka, Sanzheika, and Simon.

Recently, some experts have expressed the opinion that there cannot be any pronounced sliding surface. During a landslide, soil layers are deeply affected by deformations, the magnitude of which continuously decreases as they move away from the soil surface. These collapses of masses of soil without fixing sliding surfaces can occur only when the soil is visco-plastic.

The landslides are caused by development without a groundwater drainage system, negligence of bank protection and chaotic construction without bank protection systems. Previously, mainly lightweight wooden structures were allowed to be built in such landslide-prone areas. Now the entire coast has become a zone of heavy cottage construction. Gullies like the one in Chornomorsk are filled in, and there are no water drainage systems in place. But they served as buffer areas for water accumulation during heavy rains and heavy rainfall.

Also, intensive construction on the shore changed the course of the river, and the lack of bank protection structures led to the fact that in the new situation the bank was defenceless

The nature of soil deformations that occur during the collapse of earth masses depends heavily on the properties of the soil. It is impossible to create a calculation model that could reflect the wide variety of soil properties found in nature.

Key words: *elastic-viscoplastic, stability, slope, heterogeneity, load, stress, strain, displacement.*

Вступ. Зсув виникає тоді, коли спрямована вздовж схилу складова сил, що діють на деяку масу пухкого ґрунту або скельних порід, виявляється більше міцності матеріалу або більше його опору сколювання. Перехід від стійкого стану до початку ковзання означає, що в результаті якихось причин змінилося або зусилля, що діє на гірські породи схилу, або опір цих порід. Досліджуючи компоненти, що утворюють сумарну силу, прикладену до матеріалу, і його опір деформуючих, можна встановити, які причини привели до початку зсуву і який механізм цього зсуву.

Конкретна розрахункова ґрунтова модель схилу зазвичай розробляється з урахуванням тих чи інших припущень на підставі інженерно-геологічних досліджень, які мають якнайповніше відображати реальний поточний стан ґрунтів і можливу їхню зміну з плином часу.

Під схилами розумітимемо нахилені в один бік ділянки земної поверхні природного походження. Один із таких схилів, розташований на Одеському узбережжі, показаний на рисунку 1.

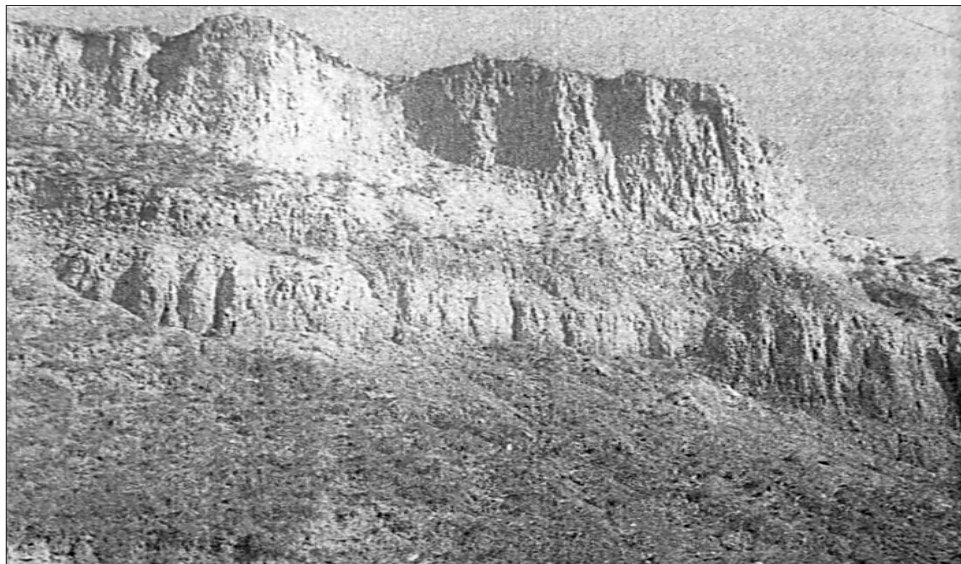


Рис. 1. Схил на Одеському узбережжі

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найчастіше науковці використовують групу моделей, яка розглядає ґрунти схилів як суцільне, деформоване, пружнов'язкопластичне, неоднорідне і зміцнювальне середовище, у кожній точці якого можна з єдиних позицій визначити, як напруження, так і деформації. Це найпрогресивніша нелінійна теорія складна, як у теоретичному викладі, так і під

час чисельної реалізації, але вона, як порівняти з іншими теоріями, якнайповніше відображає природні властивості ґрунтів [1; 2, с. 38; 3, с. 53; 4, с. 87].

Мета дослідження. Метою дослідження є розрахунок стійкості схилів в залежності від умов, що хибно впливають на їх надійність.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час проектування надійних захисних споруд для забезпечення довготривалої стійкості схилів необхідно виходити з найнесприятливіших умов, що виникають у даному районі їх розташування. Наприклад, зміна властивостей ґрунтів від вивітрювання, від порушення фільтраційного режиму підземних вод. Від сейсмічних сил землетрусу, а також від підмиву річковими або морськими хвилями підніжжя схилів, їхнього підризування, додаткового навантаження і забудови. Вплив цих та інших чинників на напружено-деформований стан і тривалу міцність ґрунтів схилу може бути враховано тільки в його сучасній нелінійній розрахунковій моделі. Отримані з розрахунку кількісні та якісні результати дають змогу визначати деформації, напруження і прояви зсувів, що виникають у схилі. Вони також дають змогу керувати поведінкою схилу під час його експлуатації та реконструкції, а також надійніше та більш економніше проектувати комплекси протизсувних захисних споруд, що дасть змогу своєчасно уникнути неприємних наслідків. Тому, пружно-пластична модель на даний час більш точно і повно порівняно з іншими теоріями відображає реальні властивості ґрунтів [2, 5, 6]. Для аналізу, ілюстрації та інтерпретації деяких характерних результатів розрахунку розглянемо один з одеських схилів. Його розрахункова схема наведена на рисунку 2.

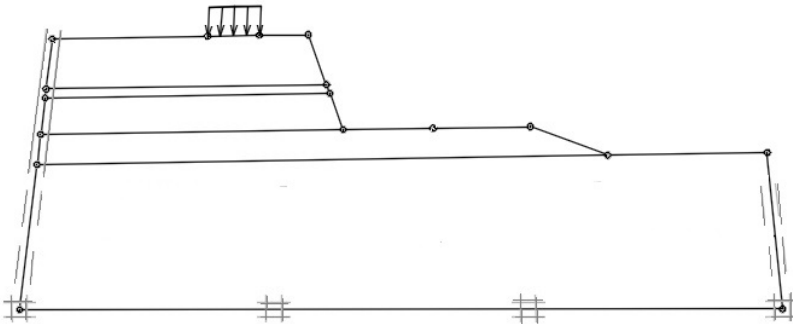


Рис. 2. Розрахункова схема схилу

Дискретизацію області схилу та вихідних рівнянь виконано методом скінченних елементів. У розрахунках прийнято кількість скінченних елементів 340, а їхніх вузлів 2845. Як функцію навантаження не використовуємо умову Кулона-Мора зі зміцненням.

Досліджуємо цей схил за відсутності підземних вод, тому що вважаємо, що вони перехоплені й виведені в галереї та штольні. Приймаємо такі міцнісні й деформовані властивості ґрунтів: зчеплення c (у кН/м^2), кут внутрішнього тертя (у градусах), модуль деформації E (кН/м^2), коефіцієнт Пуассону. Лес – $C=100$, $\varphi=20$, $E=8600$, $\mu=0,35$; червоно-бурі глини – $C=120$, $\varphi=20$, $E=10400$, $\mu=0,4$; вапняк – $C=100$, $\varphi=20$, $E=9000$, $\mu=0,25$; меотична глина на верхній шар – $C=90$, $\varphi=19$, $E=16000$, $\mu=0,4$; меотична глина, що перебуває у зволоженому стані – $C=30$, $\varphi=15$,

$E=14000$, $\mu=0,4$. Дані наведені по ґрунтових шарах схилу зверху вниз, як показано на рисунку 2.

Наведемо деякі результати, отримані після виконання розрахунку, який здійснювався за двома етапами. На першому етапі визначався напружено-деформований стан у ґрунтах від дії їхньої власної ваги. Потім отримані деформації обнулялися, але напруження зберігалися. На другому етапі розрахунку визначали сумарні напруження від чинного навантаження і власної ваги. Переміщення враховували тільки від навантаження. На рис. 3 наведено епюру його повних переміщень (що збігаються з напрямком вектору переміщень).

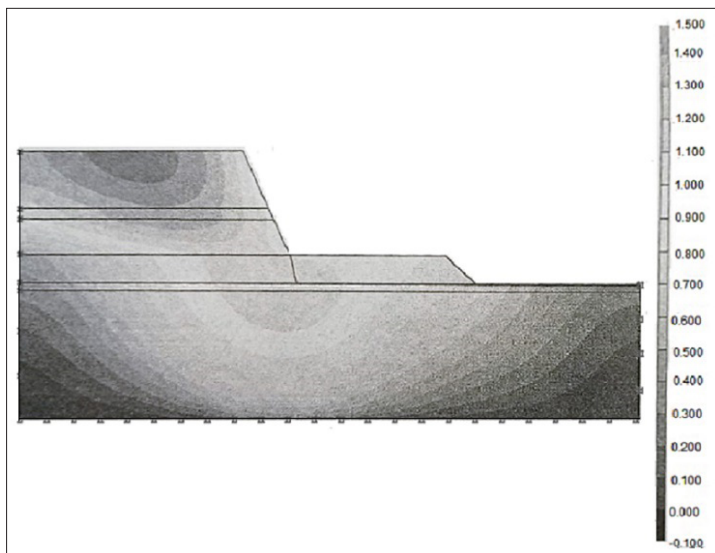


Рис. 3. Еюра загальних переміщень схилу

Праворуч рисунку зображено шкалу переміщень (у метрах). Найбільше переміщення в схилі становлять 1.46 метра, вона розташована на плато схилу під природним навантаженням.

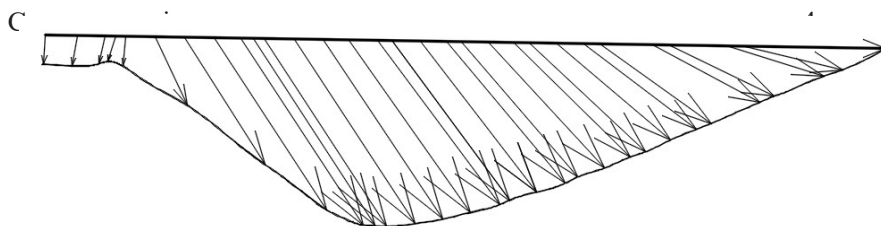


Рис. 4. Схема нуклімації схилу до перерізу на рівні підшови

Рядками вказано напрямок отриманих переміщень. Масштаб переміщень збережено до найбільшого з них = 0.98 метра.

Було визначено коефіцієнт стійкості схилу, який дорівнює $K=1.029$, тобто схил перебуває у стадії близькій до втрати стійкості. Еюра дотичних напружень σ_{12} (у kH/m^2) наведена на рисунку 5.

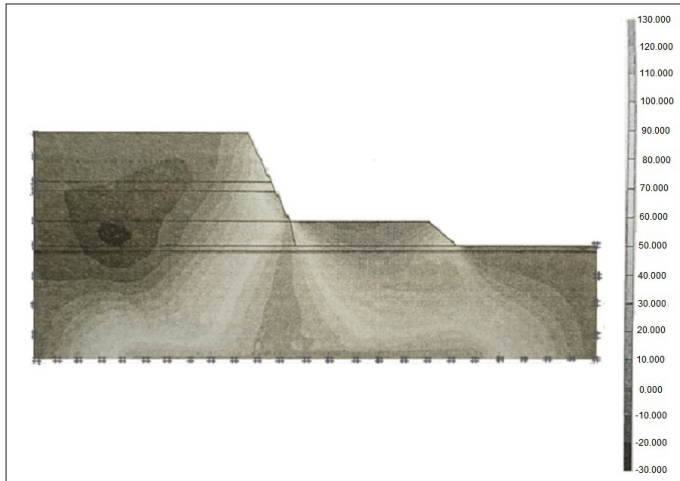


Рис. 5. Еюра дотичних напружень

Встановлено, що найбільші дотичні напруження дорівнюють $121,17 \text{ kN/m}^2$.

Вище розглядалася стійкість схилів одеського узбережжя із застосуванням пружнов'язкопластичної моделі, яка найточніше і найповніше, порівняно з іншими моделями, відображає реальні властивості ґрунтів [2, 3, 4]. Також описано два етапи визначення напружено-деформованого стану в ґрунтах від їхньої власної ваги та від дії навантаження і власної ваги.

На третьому етапі зрізалася тераса схилу, яка відігравала роль його привантаження. Після її зняття схил втрачає стійкість. Найбільші його переміщення стали рівними 147 метрів. Еюра загальних переміщень до стабілізації зсуву ґрунту, коли найбільші їхні значення дорівнюють 42,5 метри, наведена на рисунку 6.

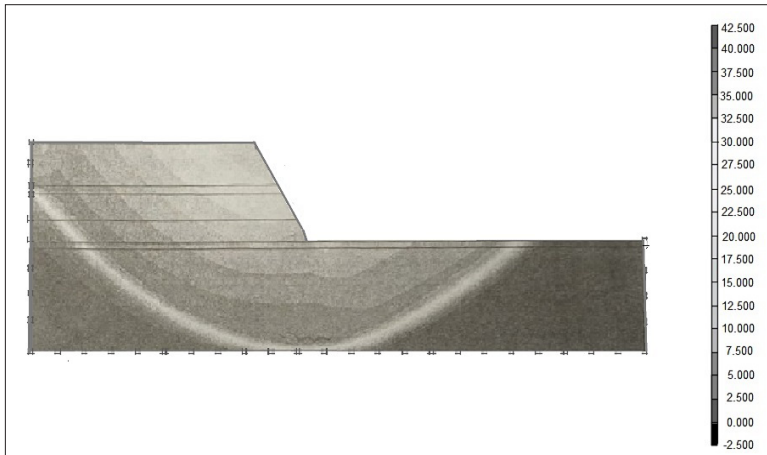


Рис. 6. Еюра повних переміщень схилу після третього етапу розрахунку.

Стався глибокий зсув ґрунту першого типу за класифікацією Драпникова А.М. із захопленням меотичних глин.

Попередні розрахунки виконувалися в пружнопластичній, але геометрично лінійній постановці. Було також виконано розв'язання наведеного вище прикладу з урахуванням геометричної нелінійності. Розрахунки показали, що після третього етапу коефіцієнт безпеки схилу став дорівнювати $K=1.01$, тобто формально він стійкий, але незначні впливи, які погіршують його стан, можуть призвести до утворення опірнів. Врахування в розрахунках геометричної нелінійності ніби збільшує жорсткість системи і уповільнює настання втрати стійкості схилу. Епюра повних переміщень схилу в цьому випадку наведена на рисунку 7.

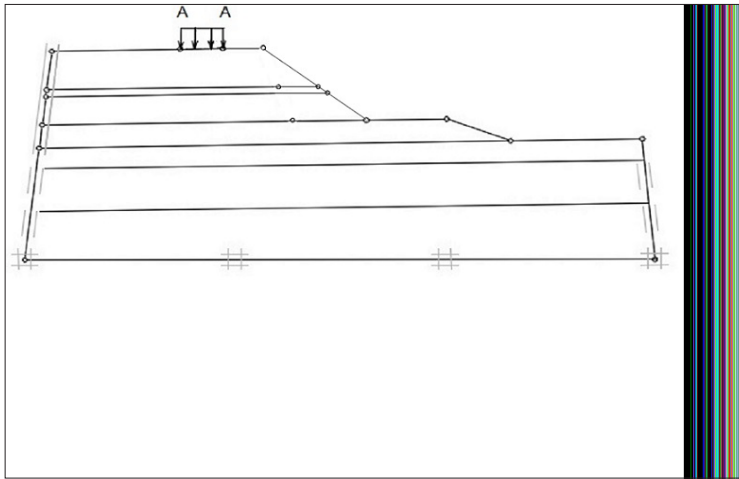


Рис. 7. Епюра повних переміщень схилу в разі врахування в розрахунках геометричної нелінійності

Також було виконано тільки пружний розрахунок за збереженої тераси. Для цього після другого етапу розрахунку епюра повних переміщень наведена на рисунку 8.

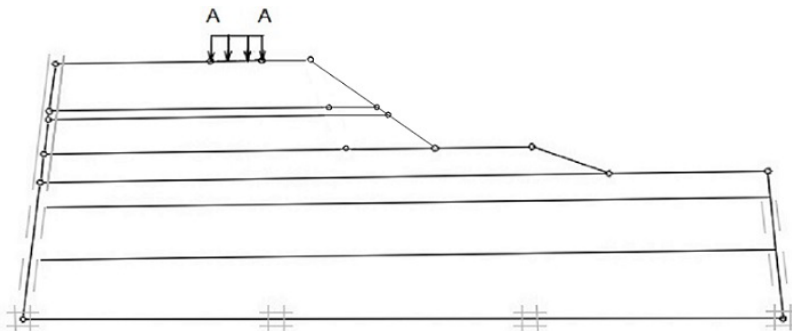


Рис. 8. Розрахункова схема уположеного схилу

Якщо за пружнопластичного розв'язання максимальне загальне переміщення схилу дорівнювало 1,46 метрів, а найбільша дотична напруга становила $121,17 \text{ кН/м}^2$, то ці величини за пружного розрахунку відповідно дорівнюють

1,04 метри і $189,73 \text{ кН/м}^2$. З цього випливає, що переміщення зменшилися, а дотичні напруження збільшилися.

Також було виконано пружнов'язкопластичний розрахунок схилу. Розрахунком встановлено, що переміщення припиняться через 8426 діб, якщо на нього за цей час не буде нових впливів і властивості ґрунтів не зміняться. Його максимальні загальні деформації за вказаний термін додатково збільшуються тільки на 5,2 см.

Припустимо цей схил уположений (рис. 9). Виконаємо розбиття схилу на трикутні скінченні елементи.

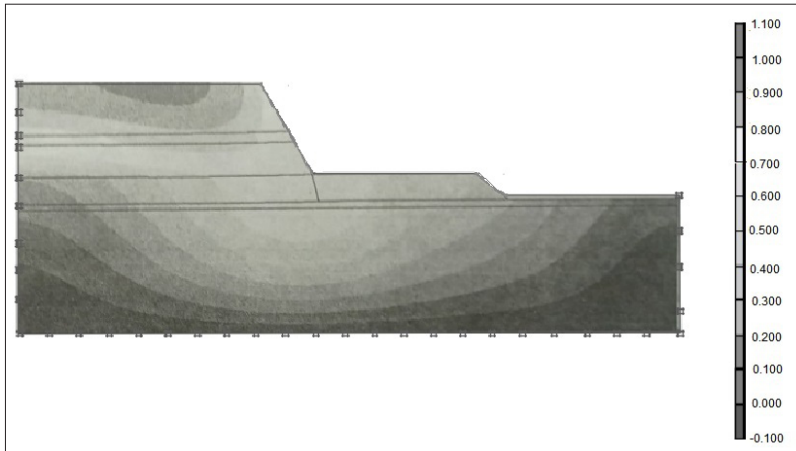


Рис. 9. Епюра повних переміщень, отримана з пружного розрахунку.

Припустимо, що благоустрій схилу виконано, але витік рідини, спричинений зношеністю водонесучих комунікацій у прибережній зоні, не усунуто. У цьому разі верхні шари ґрунту перебувають у зволоженому стані та їхні міцнісні властивості зменшилися. Тоді вони у вище зазначених позначеннях 1 стали рівними: лес – $C=60$, $\varphi=150$, $E=8600$; червоно-бурі глини – $C=80$, $\varphi=160$, $E=10400$; вапняк – $C=60$, $\varphi=150$, $E=9000$; месотична глина нижній шар – $C=30$, $\varphi=150$, $E=14000$.

Епюра утворення пластичних зон у схилі наведена на рисунку 10.

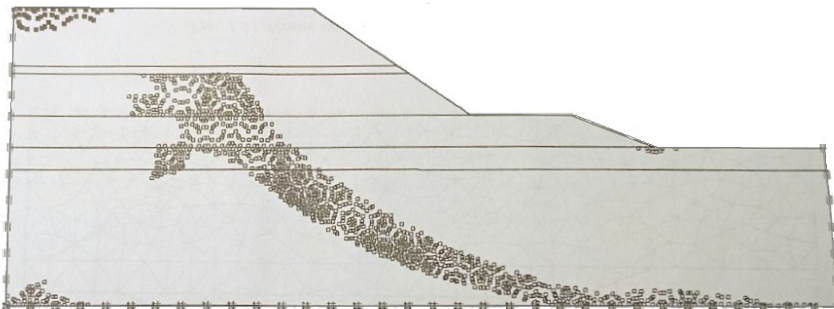


Рис. 10. Утворення пластичної зони в схилі

На ній чітко видно утворену поверхню руху майбутнього зсуву ґрунту, що утворюється. Поки що ця поверхня лівим кінцем не виходить на вільну верхню поверхню схилу, тому її формування остаточно не закінчено.

Епюра повних переміщень схилу наведена на рисунку 11.

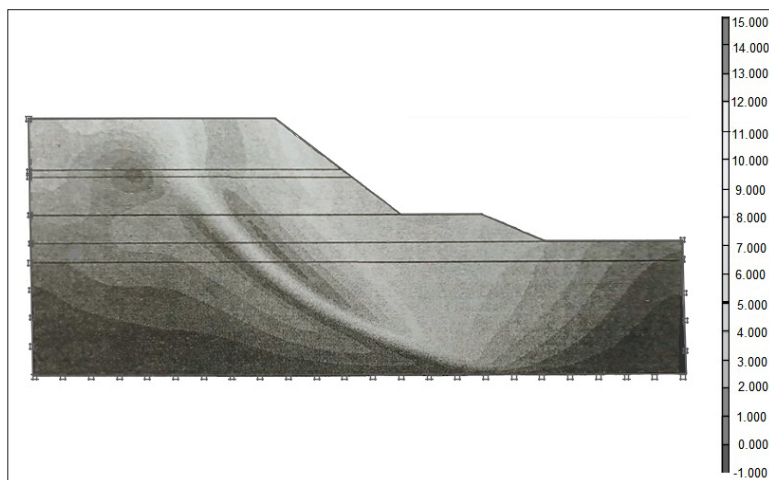


Рис. 11. Повні переміщення схилу

Його найбільше переміщення дорівнює 2,63 см.

Коефіцієнт стійкості для цього схилу дорівнює величині $K=1.21$. Також було виконано розрахунок, коли аварійний стан водопроводу і каналізації усунуто і витік води відсутній. У цьому випадку величина коефіцієнта стійкості стала рівною $K=1.87$.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведеними за двома етапами розрахунками схилу встановлено, що коефіцієнт стійкості схилу $K=1,029$, а максимальні дотичні напруження $\sigma_{12}=121,17$ кН/м². Виконані розрахунки стійкості схилу за третім етапом свідчать про те, що зволоження ґрунту значно знижує коефіцієнт стійкості схилу та може при великій вологості призвести до втрати стійкості навіть впорядкованих схилів. Коефіцієнт стійкості для цього схилу дорівнює величині $K=1.21$. У випадку коли аварійний стан водопроводу і каналізації усунуто і витік води відсутній величина коефіцієнта стійкості стала рівною $K=1.87$.

Проведення подальших досліджень, щодо стійкості схилів, має перспективний напрямок. На основі аналізу сучасного стану узбережжя, геологічних та гідрологічних умов в даному районі, а також вираженої тенденції на забудову прибережної і реактивної зони, існує необхідність розробки протизсувних заходів на даній ділянці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гришин В.А., Дорофєєв В.С. Нелінійна динаміка конструкцій, що взаємодіють з деформованим середовищем. Одеса, Астропрінт, 2000. 136 с.
2. Гришин В.А., Дорофєєв В.С. Нелінійні моделі конструкцій, що взаємодіють із ґрунтовим середовищем / монографія. Одеса: Зовнішнєрекламсервіс, 2006. 242 с.

3. Гришин В.А., Дорофєєв В.С. Деякі нелінійні моделі ґрунтового середовища. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2007. 309 с.
4. Гришин В.А., Дорофєєв В.С. Розрахунок протизсувних споруд. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. 215 с.
5. Вировий В.М., Дорофєєв В.С., Суханов В.Г. Моделювання конструкцій як складних систем // Вісник ОДАБА. В. 28. Одеса: Зовнішрекламсервіс: 2007. С. 64–70.
6. Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофєєв В.С. Основи композиційних будівельних матеріалів // Харків: ХІНГХ, 1990. 52 с.

REFERENCES:

1. Hryshyn V.A., Dorofieiev V.S. (2000) Neliniina dynamika konstruksii, shcho vzaiemodiiut z deformovanyum seredovyshchem. Odesa, Astroprint, 136s.
2. Hryshyn V.A., Dorofieiev V.S. (2006) Neliniini modeli konstruksii, shcho vzaiemodiiut iz gruntovym seredovyshchem / monohrafiia. Odesa: Zovnishreklamservis, 242 s.
3. Hryshyn V.A., Dorofieiev V.S. (2007) Deiaki neliniini modeli gruntovoho seredovyshcha. Odesa: Zovnishreklamservis, 309 s.
4. Hryshyn V.A., Dorofieiev V.S. (2009) Rozrakhunok protyzsuvnykh sporud. Odesa: Zovnishreklamservis, 215 s.
5. Vyrovyy V.M., Dorofieiev V.S., Sukhanov V.H. (2007) Modeliuvannia konstruksii yak skladnykh system. Visnyk ODABA. V.28. Odesa: Zovnishreklamservis. S. 64–70.
6. Solomatov V.I., Vyrovyy V.M., Dorofieiev V.S. (1990) Osnovy kompozytsiinykh budivelnykh materialiv. Kharkiv: KhINHKh, 52 s.