

Obliczenia zrównoważonego naturalnego i sztucznego spowolnienia osuwiska z uwzględnieniem efektu przestrzennego

**Mgr inż. Denis Velikiy, dr inż. Vladimir Slobodyanyuk, dr inż. Seregy Dmitriev, dr inż. Vladimir Osadchiy
Państwowa Akademia Budownictwa i Architektury w Odessie**

Problemy stateczności zboczy gruntowych i rozwoju procesów osuwiskowych, w tym wybrzeża Morza Czarnego, stanowią poważne zagrożenie dla ludności oraz istniejących budynków i budowli. Rozwój osuwisk i nachyleń zboczy niebezpiecznych dla osuwisk wymaga dokładnych i szczegółowych badań, których wyniki powinny stać się podstawą do wdrożenia środków inżynierskiej ochrony terenów, uwzględnionych przy projektowaniu i budowie nowych obiektów. Przy obliczaniu stateczności zboczy występuje różnica w obliczonych wartościach współczynników stateczności w układach płaskich i przestrzennych. Analiza badań wskazuje na potrzebę uwzględnienia wpływu warunków topograficznych całego osuwiska przy obliczaniu według płaskich schematów w wyznaczonych odcinkach.

Obliczenia stateczności naturalnych i sztucznych zboczy są przeprowadzane podczas projektowania, obliczeń weryfikacyjnych w warunkach eksploatacyjnych, ekspertyz oceny stanu technicznego zbocza, obliczeń weryfikacyjnych pod kątem ewentualnych zmian obciążenia na zboczu lub przyległym terenie. Głównymi czynnikami wpływającymi na wartość współczynnika stateczności są: topografia powierzchni terenu, struktura geologiczna, działające obciążenia oraz położenie krzywej depresji.

Czynniki wpływające na powstawanie reliefu na powierzchni terenu:

1. Erozja wiatrowa (mięknienie powierzchni z powodu wietrzenia skał).
2. Erozja wodna (powstawanie dolin rzecznych, wąwozów, zniszczenie linii brzegowej falami, ruch lodu).
3. Transformacje tektoniczne (rozwój zstępujących i rosnących form reliefowych w postaci pęknięć i fałd powierzchniowych).
4. Wpływ grawitacji (szpilki osuwiska, osuwiska, piargi).
5. Działalność gospodarcza człowieka (wykonywanie wykopów, nasypów, dołów).

Wpływ tych czynników prowadzi do powstawania unikalnych form terenu na każdym osobno rozpatrywanym obszarze.

Częstym przypadkiem jest sytuacja, w której połączenie kilku powyższych czynników przyczynia się do zmiany warunków osuwiska.

Obecne zalecenia normowe [1, 2, 3] nie uwzględniają wpływu takich czynników, oferując projektantowi metody obliczania możliwego procesu osuwiska tylko dla danego przekroju po-



Rys. 1. Wiązka Arkadievskaya w Odessie przed rozpoczęciem rozwoju



Rys. 2. Zmiany terenu w wyniku osuwisk w mieście Czernomorsk w regionie Odessy

przecznego, co prowadzi do obliczenia układu płaskiego, który uwzględnia kształt płaskorzeźby tylko wzdłuż określonego przekroju.

Zgodnie z wynikami badań [4] zauważono, że tylko geometria samego nachylenia wpływa na wartość współczynnika stateczności. W pracach nie uwzględniono zmian w poziomie wód gruntowych, możliwego podcięcia skarp, obecności uskoków tektonicznych, wąwozów, źródeł itp.

Zastosowanie metod inżynierskich w obliczaniu stateczności sztucznych zboczy gruntowych i naturalnych zboczy o złożonym kształcie w planie, ważnym czynnikiem, od którego zależy poprawność uzyskanych wyników, jest wybór położenia przekroju poprzecznego, wzdłuż którego przeprowadzane są

obliczenia. Na przykład w [5] obliczono stateczność nachylenia trójkąta w planie, złożonego z jednorodnego gruntu wzdłuż dwóch różnych przekrojów poprzecznych. W wyniku obliczeń uzyskano wartości współczynników stateczności, których różnica wynosiła 23%.

Należy zauważyć, że w przypadku zboczy o złożonej geometrii przestrzennej, skomplikowanej budowie geologicznej i warunkach hydrogeologicznych różnica między obliczeniami dwu- i trójwymiarowymi może wynosić $20 \div 30\%$ [6, 7].

W związku z tym podstawowym zadaniem jest ocena wpływu różnych czynników na wartość współczynnika stateczności, w tym lokalnych form reliefu na rozważanym zboczu. W tym celu na pierwszym etapie należy przeprowadzić analizę porów-



Rys. 3. Zmiany terenu w wyniku osuwisk w pobliżu Południowego miasta regionu Odessy

nawczą podejść do wyznaczania współczynnika stateczności w układach płaskich i przestrzennych.

Przedmiotem badań w tym przypadku jest współczynnik stateczności zbocza gruntu.

Istniejące tak zwane inżynierskie metody obliczeń w przeważającej części oparte są na metodzie równowagi granicznej. Twórcą metody jest Coulomb, który sformułował jej główne zasady w 1773 roku. Jednak pierwsze metody obliczania stateczności zboczy, oparte na zasadach Coulomba, zaczęły pojawiać się dopiero na początku XIX wieku. Proces tworzenia modelu dowolnego obiektu wiąże się z koniecznością wprowadzenia pewnych ograniczeń. Tak więc wiele założeń jest nieodłącznie związanych z modelem nachylenia gruntu. Założenia te są związane z faktem, że zadanie określenia parametrów stałego nachylenia jest statycznie nieokreślone. W tym względzie twórcy metod obliczeniowych stawiają dodatkowe restrykcyjne wymagania. Dlatego do tej pory opracowano ponad 100 metod, technik i schematów obliczania stateczności zboczy naturalnych w układzie płaskim [8].

Na obecnym etapie w zaleceniach normalizacyjnych stawiane są wymagania dotyczące obliczania stateczności zbocza w określonych warunkach w otoczeniu przestrzennym. Tak więc, zgodnie z wymaganiami DBN V.1.1-12:2014 „Konstrukcja w sejsmicznych regionach Ukrainy” [9], badania stateczności można przeprowadzić przy użyciu metod uproszczonych (metoda równowagi granicznej), z wyłączeniem wpływu stratygrafii powierzchni i gruntu. Zakłada się jednak, że nie należy stosować uproszczonych metod w gruntach, w których może wystąpić duże ciśnienie wody w porach lub znaczne osłabienie sztywności pod wpływem obciążenia cyklicznego. Wskazuje się, że analiza wyników obliczania stateczności zbocza w układzie przestrzennym jest najbardziej odpowiednia w przypadku

zboczy o złożonej geomorfologii, różnych przestrzennych rozkładach wytrzymałości i charakterystyk deformacyjnych gruntów oraz heterogenicznych warunkach hydrogeologicznych. W tym przypadku określenie kierunku ruchu gruntu prowadzi do ustalenia minimalnego współczynnika stateczności, a obliczona wartość tego parametru uwzględnia wpływ geometrii i charakterystyki wytrzymałościowej zbocza. Wszystko to można uzyskać jedynie za pomocą analizy trójwymiarowej.

Podobnie w DBN V.2.4-20:2014 „Tamy z gruntów. Przepisy podstawowe (szkic, wydanie końcowe)” [10], przy obliczaniu tam w wąskim kanionie, w obszarach o niskiej wytrzymałości, zaleca się ocenę stateczności zboczy z uwzględnieniem ich pracy przestrzennej.

Również w wymaganiach DBN V.1.1-46:2017 „Inżynieria na ochrona terenów, budynków i budowli przed osuwiskami. Główne przepisy” [1] wskazano, że obliczenia procesów osuwiskowych należy wykonywać na modelach uwzględniających przestrzenny charakter tych procesów. Podstawą obliczeń są mapy geologiczno-inżynierskie, które pokazują cechy przestrzenne bloków oddzielonych od zboczy z rzeczywistymi oraz możliwymi powierzchniami i strefami osłabienia. Materiały topograficzne określają objętości mas gruntu, które będą się poruszać, powierzchnie, wzdłuż których poruszać się będą grunty, miejsca ich złóż, ścieżki i trajektorie ruchu.

Obliczenia stateczności w układzie trójwymiarowym należy z reguły przeprowadzać w złożonych warunkach inżynierskich i geologicznych z dużym stopniem ich rozpoznania oraz niezawodnym określeniem położenia powierzchni poślizgu. Metody oceny stateczności zboczy i skarp, oparte na teorii równowagi granicznej, uwzględniają jedynie stan naprężenia masy gruntuowej w stanie równowagi ekstremalnej, nie uwzględnia się odkształceń gruntów tworzących zbocze [1].

Zgodnie z wymaganiami ODM 218.2.006-2010 „Zalecenia dotyczące obliczania stateczności zboczy niebezpiecznych i określania ciśnienia osuwiskowego w konstrukcjach inżynierskich dróg” [11] oceniając stateczność skarp i zboczy, należy wziąć pod uwagę warunki równowagi masy gruntu o szerokości 1 m (zadanie płaskie) z pionowymi powierzchniami bocznymi, warunkowo wyciętymi ze zbocza równoległe do wektora ścinania (siły działające wzdłuż powierzchni bocznych nie są brane pod uwagę). W przypadku obiektów ochrony inżynierskiej o znaczących konsekwencjach zniszczenia obliczenia stateczności skarp i zboczy w modelu trójwymiarowym należy przeprowadzić w złożonych warunkach inżynierskich i geologicznych podczas ich szczegółowego badania i określania położenia powierzchni poślizgu.

Pomimo tego, że w [9 ÷ 11] mówi się, że w niektórych przypadkach konieczne jest wykonywanie obliczeń w układzie trójwymiarowym (przestrzennym), jednak nie podano żadnych zaleceń dotyczących takiego obliczenia.

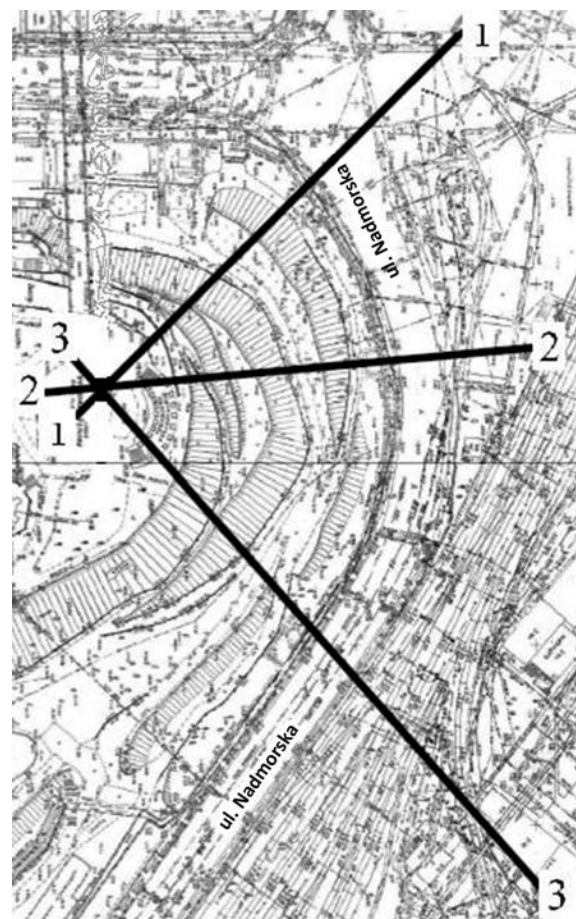
Najczęściej stosowaną i powszechną praktyką wykonywania takich obliczeń jest stosowanie metody elementów skończonych. Biorąc pod uwagę znaczną liczbę elementów skończonych w obszarze modelu zbudowanego z uwzględnieniem form płaskorzeźby w układzie trójwymiarowym, możemy jednoznacznie stwierdzić, że nie można zastosować obliczeń „ręcznych” ze względu na ich nieporęczność. Znaczny koszt specjalistycznego oprogramowania i brak niedrogich modułów projektowych produkcji krajowej również nie przyczyniają się do powszechnego stosowania metody elementów skończonych w praktyce obliczeń geotechnicznych stateczności zbocza. Jednak przewagą metody elementów skończonych nad tradycyjnymi metodami równowagi granicznej jest uniwersalne podejście do różnych kryteriów wytrzymałości skał i przestrzeganie zasad mechaniki teoretycznej, co pozwala na precyzyjne modelowanie różnych procesów geomechanicznych w masywie.

Podczas obliczeń stateczności zbocza, z udziałem autorów, na terenie greckiego (księżycowego) parku w Odessie [12] występowała niewielka rozbieżność między wartościami współczynników stateczności uzyskanymi z obliczeń w układzie płaskim metodami inżynierskimi a wartością uzyskaną metodą elementów skończonych w układzie przestrzennym.

Jako wstępne dane do prac obliczeniowych i opracowania zaleceń dotyczących budowy konstrukcji oporowych wykorzystano Raport techniczny na temat warunków inżynierskich i geologicznych obszaru projektowego w celu renowacji parku greckiego [13]. Plan nachylenia i położenie wybranych przekrojów projektowych pokazano na rys. 4.

Liczbę odcinków osadniczych i ich położenie w planie wybrano na podstawie warunków inżynierskich i geologicznych oraz uwzględniając potrzebę uwzględnienia cech topograficznych rozważanej skarpy.

Zgodnie z wymogami [1] dla każdego nachylenia osuwiska należy przypisać co najmniej jeden cel projektowy. W przypadku dużych osuwisk ustawia się dodatkowe cele. Lokalizacja głównej linii osadniczej na obszarach zbocza osuwiska powinna pokrywać się z głównym kierunkiem istniejącego lub rzutowanego ścinania wzdłuż linii największej stromości powierzchni terenu. Na dużych działkach osuwiskowych sekcje osadnicze należy rozpatrywać w kilku kierunkach, uwzględniając możliwość zmiany warunków stateczności w wyniku budowy i etapu zagospodarowania.



Rys. 4. Plan nachylenia i położenie obliczonych średnic

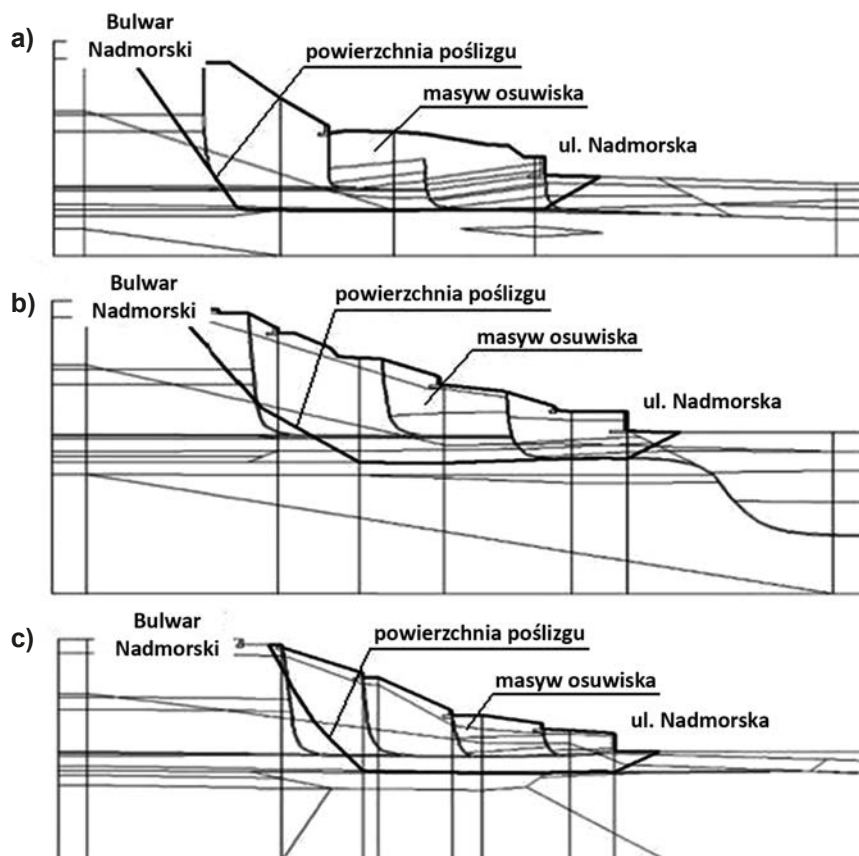
W tym przypadku obliczenia stateczności zbocza przeprowadzono metodami Bishopa i Janbu, stosując stałe krzywe poślizgu, biorąc pod uwagę ciężar bloku i siły hydrodynamiczne przepływu wody w gruncie.

Zgodnie z wynikami obliczeń uzyskano następujące wartości współczynników stateczności:

- dla obliczonego wyrównania 1-1 zgodnie z metodą Bishopa – 0,832 i Janbu – 0,812; nie uwzględniono stateczności rozważanego nachylenia w tej sekcji;
- dla obliczonego wyrównania 2-2 zgodnie z metodą Bishopa – 0,785 i Janbu – 0,813; nie uwzględniono stateczności rozważanego nachylenia w tej sekcji;
- dla obliczonego wyrównania 3-3 zgodnie z metodą Bishopa – 0,755 i Janbu – 0,728; nie uwzględniono stateczności rozważanego nachylenia w tej sekcji.

Obliczone średnice z zaznaczonymi szacowanymi liniami poślizgu pokazano na rys. 5.

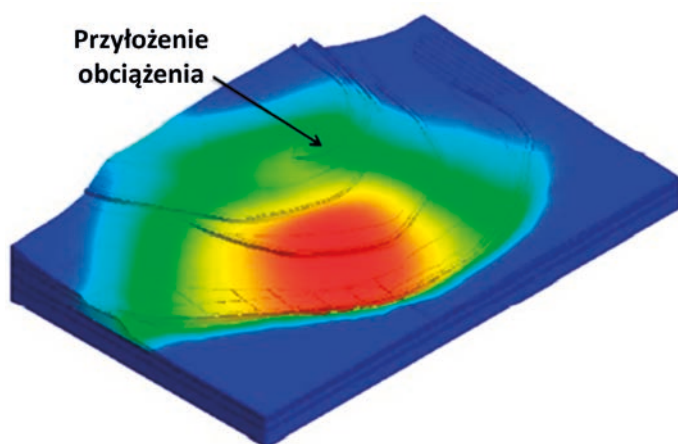
Analizując otrzymane wyniki, zauważono ich niespójność z wizualnym i instrumentalnym badaniem tego zbocza, które przeprowadzono przed obliczeniami. Celem badania było wykrycie naruszeń integralności masywu gruntowego, identyfikacja „podcięć” i przesunięć „sztywnych konstrukcji” (ogrodzeń, granic, schodów, ścian i fundamentów budynków, słupów itp.) znajdujących się na skraju zbocza. W wyniku badania wszelkich uszkodzeń, które mogłyby wskazywać na ruch zbocza znajdującego się na terytorium greckiego (księżycowego) parku, nie stwierdzono tego.



Rys. 5. Średnice osadnictwa z zaznaczonymi perspektywicznymi liniami poślizgu: a) cel rozliczenia 1-1; b) cel rozliczenia 2-2; c) cel rozliczenia 3-3

Biorąc pod uwagę publikację [4, 5] oraz fakt, że we wskazanych sekcjach konstrukcyjnych 1-1, 2-2 i 3-3 współczynniki stateczności znacznie się od siebie różnią, postanowiono określić „ogólny” współczynnik stateczności, na podstawie którego można by ocenić wiarygodnie stateczność zbocza w tym obszarze i określić możliwe granice korpusu osuwiska. W rozpatrywanym przypadku należy wziąć pod uwagę przestrzenną pracę zbocza, gdy obiekt ten sąsiaduje z odcinkami o bardziej znaczącym stopniu stateczności.

Ogólny widok schematu przestrzennego istniejącego nachylenia projektowego z granicami korpusu osuwiska pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Ogólny widok układu przestrzennego zbocza na terenie greckiego (księżycowego) parku w Odessie

W obliczeniach uwzględniono: topografię zbocza, niejednorodność gruntów stwierdzoną w ramach badań geologicznych, poziomy wód gruntowych różniących się w przestrzeni oraz istniejące konstrukcje znajdujące się na krawędzi zbocza i wzdłuż jego stoku.

W wyniku obliczenia stanu naprężenie-odkształcenie otrzymano strefy maksymalnych naprężeń stycznych wzdłuż gruntu o zaburzonej strukturze oraz wartość współczynnika stateczności uzyskaną metodą redukcji (obniżenia charakterystyk wytrzymałościowych), która wyniosła 1,064.

Wykonywanie obliczeń stateczności zbocza położonego w greckim (księżycowym) parku w Odessie w układzie przestrzennym daje wynik zbliżony do istniejącego stanu nachylenia zbocza, w przeciwieństwie do wyników uzyskanych za pomocą płaskich schematów.

Uzyskany współczynnik stateczności w układzie przestrzennym wskazuje, że normowa stateczność zbocza nie jest zapewniona. Zbocze znajduje się w stanie równowagi granicznej.

Podobne wyniki, w zakresie obliczeń współczynnika stateczności dla dwuwymiarowego i trójwymiarowego układu, uzyskano przez przeprowadzenie szeregu obliczeniowych analiz stateczności nachylenia zbocza niebezpiecznego dla osuwisk [14, 15].

Należy zauważyć, że stosunek wartości współczynników stateczności uzyskanych w schematach płaskich i przestrzennych nie jest wartością stałą. Jego znaczenie zależy od wielu czynników, w tym od form osuwiska.

WNIOSKI I PERSPEKTYWY DALSZYCH BADAŃ

Na podstawie analizy szeregu prac nad dwuwymiarowym i trójwymiarowym modelowaniem zboczy gruntowych wykazano, że ocena stateczności zboczy osuwiskowych jest złożonym, odpowiedzialnym i niedostatecznie zbadanym problemem.

Wykonywanie obliczeń nachyleń zbocza w trójwymiarowym układzie daje wyniki zbliżone do rzeczywistości, w przeciwieństwie do wyników uzyskanych ogólnie przyjętymi i powszechnie znanymi metodami inżynierskimi w płaskich schematach obliczeniowych. Wynika to z faktu, że zadanie przestrzenne uwzględnienia zmiany warunków inżynierskich i geologicznych całego zbocza. Trójwymiarowe modelowanie zboczy pozwala również wziąć pod uwagę czynniki, które mają znaczący wpływ na stateczność, a których nie można uwzględnić w modelowaniu dwuwymiarowym (cechy topografii, obecność podcinania zboczy, wąwozów, sprężyn, punktowych konstrukcji budowlanych itp.).

Jedną z ważnych zalet przestrzennej oceny stateczności zbocza jest to, że takie obliczenia pozwalają przewidzieć rozwój procesu osuwiska nie tylko na głębokości badanego odcinka masywu, ale także w planie.

Kierunek dalszych badań obejmuje stworzenie metody obliczeniowej opartej na inżynierskich metodach obliczeniowych, które mogą uwzględniać wpływ form terenu bez użycia uciążliwego i kosztownego oprogramowania oraz znacznych zasobów obliczeniowych. Aby to zrobić, na następnym etapie konieczne jest przeprowadzenie pewnej klasyfikacji (unifikacji) form reliefowych, dla których w przyszłości będą przeprowadzone obliczenia metodami inżynierskimi do obliczenia stabilności zbocza gruntu. Korekta istniejącej metody polega na wprowadzeniu do wzoru obliczeniowego współczynnika korygującego w postaci funkcji, której wartość odpowiada parametrowi wybranemu w zależności od sytuacji geomorfologicznej badanej formy reliefowej.

LITERATURA

1. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Основные положения: ДБН В.1.1-46:2017 [действительный от 01.11.2017]. – Киев: Минстрой Украины, 2017.
2. Руководство по инженерной защите территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов: ДСТУ-Н Б В.1.1-37:2016 [действительный от 01.04.2017]. – Киев: Минстрой Украины, 2017.

3. Гидротехнические сооружения. Основные положения: ДБН В.2.4-3:2010. – [действительный с 2011-01-01]. – Киев: Минстрой Украины, 2011.
4. C. Zhang, Yingbin, et al. Effects of geometries on three-dimensional slope stability // Canadian Geotechnical Journal, vol. 50, no. 3, 2013, 233-239.
5. Kalatehjari, Roohollah i inni: Determination of three-dimensional shape of failure in soil slopes// Canadian Geotechnical Journal, vol. 52, no. 9, 2015, 1283-1291.
6. Gitirana G.(Jr.), Santos M. A., Fredlund M.: Three-dimensional analysis of the Lodalenlandslide. Proceedings of the GeoCongress'2008. New Orleans, 9-12 March 2008.
7. Stark T., Eid H. Performance of Three-Dimensional Slope Stability Methods in Practice // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 11, 1998. 1049-1060.
8. Фоменко И. К. Общая классификационная схема методов расчета устойчивости склонов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012». Одесса: КУПРИЕНКО. 2012. Т. 35. № 3. 75-81.
9. Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12:2014. – [действительный с 2014-01-10]. – Киев: Минстрой Украины, 2014.
10. Плотины из грунтовых материалов. Основные положения (Проект, окончательная редакция): ДБН В.2.4-20:2014. – Киев: Минстрой Украины, 2014.
11. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог: ОДМ 218.2.006-2010 [действительный от 01.04.2011]. – Москва: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2010.
12. Отчет «Расчет устойчивости склона на территории Греческого (Лунного) парка в пределах границ улиц: Военного спуска, Приморского бульвара, ул. Приморской, Потемкинской лестницы в г. Одесса», 2016 г.
13. Технический отчет о инженерно-геологических условиях участка проектирования благоустройства Греческого парка в пределах улиц: Военный спуск, Приморский бульвар, ул. Приморская, Потемкинская лестница в г. Одесса, 2016 г.
14. Отчет «Расчет устойчивости склона на участке строительства многопрофильного курортного комплекса с апарт-отелем по адресу: г. Одесса, ул. Французский бульвар, 85, 85/1, 2019 г.
15. Отчет «Расчет устойчивости склона в естественном состоянии под зданием Старой биржи на площади Думской, 1 в г. Одессе, 2017 г.