УДК 624.137

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-108-115

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech, Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ В ПРОГРАММЕ PLAXIS С АНАЛИТИЧЕСКИМИ РАСЧЕТАМИ ПО УПРОЩЕННОМУ МЕТОДУ

COMPARING THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF SLOPE STABILITY IN THE PLAXIS PROGRAM WITH ANALYTICAL CALCULATIONS USING THE SIMPLIFIED METHOD

Предложены способы упрощения аналитического метода расчета устойчивости откосов. Упрощенный метод основан на известном классическом решении расчета устойчивости откосов с круглоцилиндрической поверхностью скольжения. Предлагаемый метод не требует значительных трудозатрат во времени и позволяет учитывать различные внешние нагрузки на откос и их сочетания. Выполнены многовариантные сравнительные расчеты устойчивости откосов в программе Plaxis и с помощью упрощенного аналитического метода. В расчетных схемах были применены дисперсные грунты: пески, супеси, суглинки и глины с различными свойствами, и наиболее распространенные в строительной практике углы заложения откосов. Выполненный анализ расчетов показал хорошую сходимость результатов численного моделирования с результатами аналитических расчетов. Метод рекомендуется применять для предварительных экспресс-расчетов или для дополнительной альтернативной проверки устойчивости откосов.

Ключевые слова: численный расчет устойчивости откосов, аналитический расчет устойчивости откосов, гидродинамическое давление, внешняя нагрузка на бровку откоса, сейсмическое воздействие.

The article purposes some ways of simplifying the analytical method for calculating slope stability. The simplified method is based on the well-known classical solution for calculating the stability of slopes with a round-cylindrical slickensided surface. The proposed method does not require significant labor costs in time and allows taking into account various external loads and their combinations on the slope. There have been performed multivariate comparative calculations of slope stability in the Plaxis program and using a simplified analytical method. In the design schemes, there were considered dispersed soils such as sands, sandy loams, loams and clays with different properties and the most common slope angles used in construction practice. The performed analysis of calculations has shown a good convergence of the numerical modeling results with the results of analytical calculations. This method is recommended for preliminary express calculations or for additional alternative verification of slope stability.

Keywords: numerical calculation of slope stability, analytical calculation of slope stability, hydrodynamic pressure, external load on the slope edge, seismic impact.

Введение

У современного инженера-геотехника для расчетной оценки устойчивости откосов существует множество возможностей: классические теоретические решения, полуаналитические программы-калькуляторы, программные комплексы, основанные на методе конечных элементов, и т. д. Однако у каждого метода есть свои

ограничения и недостатки, например классические методы являются достаточно трудоемкими. Полуаналитические программы с уже построенным алгоритмом расчета не учитывают всех возможных факторов, влияющих на устойчивость откоса. Численное моделирование является эффективным и наглядным расчетным инструментом, но вследствие своей обманчивой простоты

и красочности рассеивает внимание и ограничивает инженера в детальном аналитическом исследовании напряженного состояния откоса. Для полноценного анализа устойчивости откосов рекомендуется применять различные методы расчетов и затем сравнивать их результаты. Ниже приведен пример такого сравнительного анализа результатов численного моделирования устойчивости откосов в программе Plaxis и результатов расчетов по упрощенному аналитическому методу.

Постановка граничных условий исследования

В программном комплексе Plaxis было выполнено многовариантное численное моделирование откосов с различными свойствами грунтов и углами заложения. В качестве грунтов откосов были приняты пески различной крупности, супеси, суглинки и глины с нормативными свойствами из таблиц А.1, А.2 СП 22.13330.2016. Было принято пять откосов с различным отношением высоты к заложению H/l : 1:2 ($\alpha = 27^\circ$); 1:1,75 ($\alpha = 30^\circ$); 1:1,5 ($\alpha = 34^\circ$); 1:1,25 ($\alpha = 39^\circ$); 1:1 ($\alpha = 45^\circ$).

В табл. 1 приведены основные свойства грунтов, принятые при многовариантном численном моделировании.

В рамках настоящей статьи привести все результаты моделирования не представляется возможным, поэтому приведем только краткие основные результаты для характерного откоса с углом заложения $\alpha = 30^\circ$, состоящего из пылеватого песка со следующими свойствами:

- удельный вес $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$;
- угол внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$;
- удельное сцепление $c = 4 \text{ кПа}$.

Численное моделирование устойчивости характерного откоса в программе Plaxis выполнялось при следующих сочетаниях нагрузок:

- от собственного веса грунтовой призмы скольжения;
- от собственного веса и при гидродинамическом давлении в результате фильтрации воды через песчаный откос;
- от собственного веса, гидродинамического давления и внешней нагрузки на бровку откоса $q = 10 \text{ кПа}$;
- от собственного веса, гидродинамического давления, внешней нагрузки на бровку откоса $q = 10 \text{ кПа}$ и сейсмического воздействия земле-

трясения интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64 (псевдостатический расчет в долях ускорения свободного падения).

На рис. 1 приведена призма скольжения при расчете устойчивости характерного откоса без внешних нагрузок (только от собственного веса грунтовой призмы).

На рис. 2, 3 приведены результаты численного моделирования гидродинамического давления в песчаном грунте при фильтрации воды через тело откоса.

На рис. 4 приведена призма скольжения в грунтовом откосе с учетом собственного веса грунта и гидродинамического давления воды.

На рис. 5 приведена призма скольжения в грунтовом откосе с учетом собственного веса грунта, гидродинамического давления воды и внешней нагрузки.

На рис. 6 приведена призма скольжения в грунтовом откосе с учетом совместного воздействия собственного веса грунта, фильтрации воды, внешней нагрузки ($q = 10 \text{ кПа}$) и сейсмического воздействия (7 баллов по шкале MSK-64).

Как видно на рис. 1–6, призмы скольжения в грунте с добавлением внешних нагрузок увеличиваются. Значения коэффициентов устойчиво-

Таблица 1

Нормативные свойства грунтов, принятых для численного моделирования устойчивости откосов, из таблиц А.1, А.2 СП 22.13330.2016, при углах заложения откосов $\alpha = 27; 30; 34; 39; 45^\circ$ и удельном весе $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$

Наименование грунта	Угол внутреннего трения $\varphi, ^\circ$	Удельное сцепление $c, \text{ кПа}$
Песок гравелистый и крупный	38	0
Песок средней крупности	35	1
Мелкий песок	32	2
Пылеватый песок	30	4
Супесь	18	9
Суглинок	12	12
Глина	7	29

Рис. 1. Призма скольжения в откосе от собственного веса грунтовой призмы ($K_{st1} = 1,61$)

Рис. 2. Векторное отображение фильтрационного движения воды в песчаном откосе

сти с увеличением сочетаний нагрузок при этом, естественно, уменьшаются.

На рис. 6 получена наибольшая призма скольжения и наименьшее значение коэффициента устойчивости $K_{st1} = 1,01$. Устойчивость откоса обеспечивается, но он находится в предельном напряженном состоянии. Здесь еще раз необходимо отметить, что в последней расчетной схеме задано суммарное сочетание всех вышеописанных нагрузок. В проектных расчетах необходимо учитывать вероятность совместного воздействия всех нагрузок. Например, гидродинамическое давление воды носит сезонный характер при резком повышении уровня воды в откосе (на периоды интенсивного снеготаяния, выпадения атмосферных осадков, подтопления поверхностными водами и т. д.). Сейсмическое воздействие разделяется на проектное землетрясение (ПЗ — вероятность землетрясения один раз в 100 лет) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ — вероятность землетрясения один раз в 500 лет).

Для альтернативной оценки устойчивости характерного откоса были выполнены дополнительные расчеты с помощью упрощенного аналитического метода, который основан на известном методе расчета устойчивости откосов с круглоцилиндрической поверхностью скольжения [1–3]. На рис. 7 приведена расчетная схема грунтового откоса на прочном основании при отсутствии внешних нагрузок и с однородным сухим грунтом. При этих условиях устойчивость откоса будет обеспечиваться углом внутреннего трения, а также удельным сцеплением, распределенным по длине дуги скольжения.

Рис. 3. Изолинии гидродинамического давления воды при ее фильтрации через песчаный откос

Рис. 4. Призма скольжения в откосе от собственного веса грунтовой призмы и гидродинамического давления воды ($K_{st1} = 1,25$)

На рис. 7 показана методика Н. Н. Маслова [2, 3] по определению центра вращения призмы скольжения. Вначале находится точка 1 по вертикали на глубине $2H$ от бровки откоса и по горизонтали на расстоянии $4,5H$ от подошвы откоса.

Рис. 5. Призма скольжения в откосе от собственного веса грунтов, гидродинамического давления воды и внешней нагрузки $q = 10$ кПа ($K_{st} = 1,13$)

Рис. 6. Призма скольжения в откосе от собственного веса грунтов, гидродинамического давления воды, внешней нагрузки $q = 10$ кПа и сейсмического воздействия 7 баллов по шкале MSK-64 ($K_{st} = 1,01$)

Затем из точки 1 проводится наклонная прямая, проходящая через бровку откоса до пересечения с вертикальной прямой, расположенной на расстоянии l/H от подошвы откоса. Точка 2 является центром вращения, относительно которого строится дуга скольжения длиной L . При неоднородных водонасыщенных грунтах, слагающих тело откоса, и слабых грунтах в его основании, призма скольжения может определяться другими, альтернативными методами.

Исходя из расчетной схемы на рис. 7, рекомендуется упрощенный аналитический метод расчета коэффициента устойчивости откоса:

$$K_{st} = \frac{\left(\operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{Lc}{G \cos \theta} \right) \right)}{\operatorname{tg} \theta}, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — тангенс угла внутреннего трения грунта откоса, град; L — длина дуги призмы сколь-

Рис. 7. Расчетная схема откоса с последовательностью определения призмы скольжения (случай однородного сухого откоса на прочном основании без внешних нагрузок и воздействий)

жения, м; c — сцепление грунта откоса, кПа; $G = A\gamma$ — собственный вес призмы скольжения на один погонный метр в поперечном направлении, кН/м; A — площадь призмы скольжения, м²; γ — удельный вес грунта призмы скольжения, кН/м³; θ — угол, получаемый путем построения прямой от центра (половины) дуги скольжения до пересечения с центром вращения призмы, град. В случае если у песчаных грунтов удельное сцепление $c = 0$, $\operatorname{tg} \theta$ принимается равным $\operatorname{tg} \alpha$.

Формула (1) может быть использована для расчета устойчивости откосов, сложенных крупнообломочными, песчаными или глинистыми грунтами с однородным строением. В случае неоднородного напластования грунтов и значительного отличия их свойств необходимо прочностные характеристики грунтов приводить к осредненным значениям или определять коэффициент устойчивости откоса более сложными методами.

Согласно исследованиям многих авторов [4–12], в случае песчаного откоса с фильтрационным потоком воды необходимо учитывать гидродинамическое давление. На рис. 8 приведена расчетная схема для этого случая. Для учета влияния гидродинамического воздействия воды и расчета коэффициента устойчивости предлагается формула

$$K_{st} = \frac{\left(\operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{Lc}{G \cos \theta} \right) \right)}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \omega}, \quad (2)$$

где ω — угол, эквивалентный гидродинамическому давлению воды при ее фильтрации через тело

откоса. Угол ω откладывается от поверхности откоса против часовой стрелки и определяется по формуле

$$\omega = \varphi - \arctg\left(\frac{\gamma_w \operatorname{tg} \varphi}{\gamma_w n + \gamma_{sb}}\right), \quad (3)$$

где γ_w — удельный вес воды, кН/м³; n — пористость грунта; γ_{sb} — удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды, кН/м³.

Значения угла ω находятся в следующей зависимости от угла внутреннего трения песчаного грунта:

$\omega \approx 6^\circ$ при $\varphi \approx 20 \dots 25^\circ$;

$\omega \approx 7^\circ$ при $\varphi \approx 25 \dots 30^\circ$;

$\omega \approx 8^\circ$ при $\varphi \approx 30 \dots 35^\circ$;

$\omega \approx 9^\circ$ при $\varphi \approx 35 \dots 40^\circ$.

В случае если на бровку откоса действует дополнительная внешняя нагрузка, то ее также можно учесть эквивалентным углом. На рис. 9 приведена расчетная схема по учету внешней нагрузки путем построения эквивалентного угла к поверхности откоса (см. формулу (4)). Из формулы (5) можно увидеть, как определить угол, эквивалентный воздействию внешней нагрузки:

$$K_{st} = \frac{\left(\operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{Lc}{G \cos \theta}\right)\right)}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \eta}; \quad (4)$$

$$\eta = \arccos\left(\frac{l}{\sqrt{(H+h)^2 + l^2}}\right) - \alpha, \quad (5)$$

где $h = \frac{q}{\gamma}$ — приведенная высота откоса, м; q — внешняя нагрузка, действующая на бровку откоса, кН/м².

Характерные значения угла η для интервала внешних нагрузок на бровку откоса 10...40 кПа:

$\eta \approx 3^\circ$ при $q \approx 10$ кПа;

$\eta \approx 5^\circ$ при $q \approx 20$ кПа;

$\eta \approx 8^\circ$ при $q \approx 30$ кПа;

$\eta \approx 10^\circ$ при $q \approx 40$ кПа.

Еще одной значительной внешней нагрузкой на откос является сейсмическое воздействие. На рис. 10 приведена расчетная схема по учету сейсмического воздействия путем построения эквивалентного угла δ (см. формулу (6)). Определить эквивалентный угол δ можно по формуле (7):

$$K_{st} = \frac{\left(\operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{Lc}{G \cos \theta}\right)\right)}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \delta}; \quad (6)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{a}{g}\right), \quad (7)$$

где $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; a — сейсмическое ускорение, принимаемое в зависимости от интенсивности землетрясения по шкале MSK-64:

$a = 0,1 \dots 0,25$ м/с² при 7 баллах;

$a = 0,25 \dots 0,5$ м/с² при 8 баллах;

$a = 0,5 \dots 1,0$ м/с² при 9 баллах;

$a = 1,0 \dots 2,5$ м/с² при 10 баллах.

Значения углов сеймики δ , как правило, составляют следующие величины в зависимости от интенсивности землетрясения по шкале MSK-64:

$\delta \approx 2^\circ$ при 7 баллах;

$\delta \approx 3^\circ$ при 8 баллах;

$\delta \approx 6^\circ$ при 9 баллах;

$\delta \approx 14^\circ$ при 10 баллах.

В практике расчета устойчивости откосов иногда складываются сочетания, при которых необходимо учитывать совместное воздействие всех вышеприведенных нагрузок. Для этого определяются расчетные значения нагрузок с учетом требований нормативных документов. При высоком значении вероятности совмест-

Рис. 8. Расчетная схема откоса с эквивалентным углом, учитывающим гидродинамическое давление воды в песчаных грунтах

Рис. 9. Расчетная схема откоса с эквивалентным углом, учитывающим внешнюю нагрузку на бровку откоса

Рис. 10. Расчетная схема откоса с эквивалентным углом, учитывающим сейсмическое воздействие при землетрясении

ного воздействия собственного веса грунтовой призмы, гидродинамического давления воды, внешней и сейсмической нагрузок предлагается следующая формула:

$$K_{st} = \frac{\left(\operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{Lc}{G \cos \theta} \right) \right)}{\operatorname{tg} \theta + \operatorname{tg} \omega + \operatorname{tg} \eta + \operatorname{tg} \delta}. \quad (8)$$

На рис. 11 приведена расчетная схема откоса с эквивалентными углами, учитывающими последовательно в сумме: собственный вес грунтовой призмы, гидродинамическое давление воды, временную нагрузку на бровку и сейсмическое воздействие при землетрясении. С учетом последовательного суммарного воздействия выше-

приведенных нагрузок приведены соответствующие значения коэффициентов устойчивости.

Основные результаты

В табл. 2 приведены значения коэффициентов устойчивости по результатам моделирования в программе Plaxis (по характерному примеру, приведенному на рис. 1–6) и по результатам упрощенного аналитического метода (изложен-

Рис. 11. Расчетная схема откоса с эквивалентными углами, учитывающими последовательно в сумме: собственный вес грунтовой призмы, гидродинамическое давление воды, временную нагрузку на бровку и сейсмическое воздействие при землетрясении ($K_{st1} = 1,56$; $K_{st2} = 1,24$; $K_{st2} = 1,14$; $K_{st2} = 1,08$)

Таблица 2

Сравнение результатов численного моделирования и упрощенного аналитического расчета по характерному примеру откоса, приведенному на рис. 1–11

Расчетные сочетания нагрузок	K_{st1} (Plaxis)	K_{st2} (аналитические расчеты)	Отношение K_{st1} / K_{st2}	Относительная разница $\frac{K_{st \max} - K_{st \min}}{K_{st \max}} 100 \%$
Собственный вес грунтовой призмы	1,61	1,56	1,03	3,1
Собственный вес призмы и гидродинамическое давление воды ($\omega = 7^\circ$)	1,25	1,24	1,01	0,8
Собственный вес призмы, гидродинамическое давление воды ($\omega = 7^\circ$) и временная нагрузка на бровку $q = 10$ кПа ($\eta = 3^\circ$)	1,13	1,14	0,99	0,9
Собственный вес призмы, гидродинамическое давление воды ($\omega = 7^\circ$), временная нагрузка на бровку $q = 10$ кПа ($\eta = 3^\circ$) и сейсмическое воздействие 7 баллов по шкале MSK-64 ($\delta = 2^\circ$)	1,01	1,08	0,94	6,5

ного на рис. 7–11). По результатам численного моделирования и упрощенного аналитического расчета коэффициенты устойчивости при различных сочетаниях нагрузок имеют относительную разницу до 7 % (см. табл. 2).

Для более наглядного отображения достоверности упрощенного метода была выполнена серия многовариантного моделирования и аналитических расчетов с получением свыше 100 значений коэффициентов устойчивости для различных свойств грунтов и углов заложения откосов (см. табл. 1). По всем рассчитанным значениям коэффициентов устойчивости был построен сравнительный график зависимости (рис. 12). По этому графику получена зависимость

$$K_{st1} \approx 0,9 \dots 1,1 K_{st2}, \quad (9)$$

где K_{st1} — коэффициент устойчивости, полученный при моделировании в программе Plaxis; K_{st2} — коэффициент устойчивости, полученный при расчете по упрощенному методу.

Заключение

Сравнительный анализ более 100 коэффициентов устойчивости, полученных численным моделированием в программе Plaxis и рассчитанных по упрощенному аналитическому методу, показал, что значения коэффициентов устойчивости в большинстве случаев могут отличаться от 0,9 до 1,1 раза. Получить лучшую сходимость достаточно сложно, так как расчеты основаны на различных методах. В Plaxis применяется метод снижения прочностных свойств грунта, в ана-

литическом расчете — упрощенный метод круглоцилиндрической поверхности скольжения. Различие результатов расчетов связано в первую очередь с расхождениями в определении центра вращения, длины дуги, угла и площади призмы скольжения. Тем не менее, предлагаемый автором метод позволяет с достаточной точностью вычислить коэффициент устойчивости откоса с учетом различных нагрузок и их сочетаний. Данный метод рекомендуется проектировщикам и другим специалистам для сравнения с результатами численного моделирования и других целей (для выполнения предварительных или альтернативных расчетов и т. д.).

Библиографический список

1. Безуглова Е. В., Маций С. И., Подтелков В. В. Оползневой риск транспортных природно-технических систем. Краснодар: КубГАУ, 2015. 239 с.
2. Добров Э. М. Механика грунтов. 2-е изд., перераб. М.: Академия, 2013. 255 с.
3. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2016. 1031 с.
4. Конюшков В. В., Владимирова Е. И. Анализ и прогноз устойчивости склона в природном состоянии, на строительный и эксплуатационный периоды // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 107–113.
5. Конюшков В. В., Пятница А. В. Численное моделирование вариантного проектирования инженерной защиты территории от склоновых процессов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 100–105.
6. Конюшков В. В., Веселов А. А., Кондратьева Л. Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 11. С. 111–125.
7. Конюшков В. В. Инженерная защита территорий от склоновых процессов с учетом природных условий и техногенных воздействий // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 137–142.
8. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.; СПб.: АСВ, 2016. 256 с.
9. Пендин В. В., Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: Ленанд, 2015. 320 с.

Рис. 12. Сравнительный график зависимости значений коэффициентов устойчивости откосов, полученных в программе Plaxis (K_{st1}), и величин коэффициентов устойчивости, полученных упрощенным аналитическим методом (K_{st2})

10. Kok-Kwang Phoon, Jianye Ching. Risk and Reliability in geotechnical engineering. London; New York: CRC Press, 2015. 624 p.

11. Kun Song, Gongda Lu, Guodong Zhang, Yiliang Liu. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long-term stability of reservoir landslides // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. Vol. 3. Pp. 901–908.

12. Failmezger R. A., Bullock P. J., Handy R. L. Site variability, risk and beta // Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization / da Fonseca A. V., Mayne P. W. (eds.). Rotterdam: Millpress, 2004. Pp. 913–920.

References

1. Bezuglova E. V., Matsiy S. I., Podtelkov V. V. Opolznevoy risk transportnykh prirodno-tekhnicheskikh sistem [Landslide risk of transport natural-technical systems]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2015, 239 p.

2. Dobrov E. M. Mekhanika gruntov [Soil Mechanics]. 2-nd ed., revised. Moscow, Akademiya Publ., 2013, 255 p.

3. Il'ichev V. A., et al. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya [Handbook of geotechnical engineering. Bases, foundations and underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2016, 1031 p.

4. Konyushkov V. V., Vladimirova E. I. Analiz i prognoz ustoychivosti sklona v prirodnom sostoyanii, na stroitel'nyy i ekspluatatsionnyy periody [Analysis and forecasting of the slope stability in natural conditions for construction and operation periods]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2017, no. 6 (65), pp. 107–113.

5. Konyushkov V. V., Pyatnitsa A. V. Chislennoe modelirovanie variantnogo proektirovaniya inzhenernoy zashchity territorii ot sklonovykh protsessov [Numerical simulation of the alternative design of territory engineering protection measures against landslide processes]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2018, no. 2 (67), pp. 100–105.

6. Konyushkov V. V., Veselov A. A., Kondrat'eva L. N. Kompleksniy analiz rezul'tatov inzhenernykh izyskaniy dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii sooruzheniy na territoriyakh so sklonovymi protsessami [Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for design, construction and operation of structures in the areas with landslide processes]. Izvestiya Tomskogo politekhn. un-ta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-resources engineering, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125.

7. Konyushkov V. V. Inzhenernaya zashchita territoriy ot sklonovykh protsessov s uchetom prirodnikh usloviy i tekhnogennykh vozdeystviy [Engineering protection of areas from erosion processes taking into account natural conditions and anthropogenic influences]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2017, no. 2 (61), pp. 137–142.

8. Mangushev R. A., et al. Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh [Design and construction of underground structures in open pits]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2016, 256 p.

9. Pendin V. V., Fomenko I. K. Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti [The methodology of evaluation and forecasting of landslide risk possibility]. Moscow, Lenand Publ., 2015, 320 p.

10. Kok-Kwang Phoon, Jianye Ching. Risk and Reliability in geotechnical engineering. London; New York, CRC Press Publ., 2015, 624 p.

11. Kun Song, Gongda Lu, Guodong Zhang, Yiliang Liu. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long-term stability of reservoir landslides. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, vol. 3, pp. 901–908.

12. Failmezger R. A., Bullock P. J., Handy R. L. Site variability, risk and beta. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Da Fonseca A. V., Mayne P. W. (eds.). Rotterdam, Millpress Publ., 2004, pp. 913–920.