УДК 539.3+624.014

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент

© Е. И. Владимирова, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: v.konyushkov@mail.ru, vladimirova94.94@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-107-113

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© E. I. Vladimirova, undergraduate

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: v.konyushkov@mail.ru, vladimirova94.94@mail.ru

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА В ПРИРОДНОМ СОСТОЯНИИ, НА СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ПЕРИОДЫ

ANALYSIS AND FORECASTING OF THE SLOPE STABILITY IN NATURAL CONDITIONS FOR CONSTRUCTION AND OPERATION PERIODS

Приведен пример определения общей устойчивости склона в природном состоянии, а также на этапах строительного и эксплуатационного периодов. Проанализированы результаты численного моделирования и проверочных аналитических расчетов. Даны рекомендации по обеспечению устойчивости склона на периоды строительства и эксплуатации.

Ключевые слова: общая устойчивость склона, строительный и эксплуатационный периоды.

The article provides an example of assessing the overall stability of the slope in natural condition, as well as at all the stages of construction and operational periods. The results of numerical simulation and testing analytical calculations are analyzed. Recommendations for ensuring the slope stability at all periods of construction and operation are offered.

Keywords: overall stability of the slope, construction and operational periods.

Введение

Существует значительное количество научных исследований, посвященных устойчивости склонов и откосов, методам их расчетов, а также рекомендациям по инженерной защите территорий от склоновых процессов. Однако тема устойчивости склонов и откосов продолжает оставаться актуальной и в настоящее время в связи с огромным разнообразием инженерно-геологических условий и функциональными особенностями проектирования, строительства и эксплуатации линейных объектов в промышленном, гражданском, гидротехническом, автомобильном и железнодорожном строительстве. При разработке конструктивно-технологических решений на территориях с потенциальным развитием склоновых процессов необходимо учитывать следующие основные этапы:

- природное состояние склона;

- строительный период;
- эксплуатационный период.

Учет основных этапов можно выполнить путем анализа инженерно-геологических условий площадки, численного и аналитического определения коэффициента устойчивости склона в природном состоянии, анализа конструктивно-технологического решения и численного моделирования устойчивости склона на строительный и эксплуатационный периоды.

1. Анализ инженерно-геологических условий площадки

Выполним анализ инженерно-геологических условий на примере гидротехнического объекта на территории с потенциальным развитием склоновых процессов.

На площадке строительства на глубину до 25,0 м от планировочной отметки принимают участие техногенные отложения (t_{IV}), аллюви-

альные отложения (a IV), озерно-ледниковые отложения (lg III) и ледниковые отложения (g III).

Особенностями инженерно-геологических условий площадки являются:

1. Насыпной грунт (ИГЭ-1), состоящий из песков, супесей, суглинков с гравием со щебнем, строительным мусором (обломки кирпича, бетона, древесины). Относится к специфическим (структурно неустойчивым) грунтам, неоднороден по составу и свойствам, неравномерно уплотнен, обладает различной сжимаемостью, содержит органику.

2. Суглинки текучие и текучепластичные (ИГЭ-6, ИГЭ-11) являются сильнодеформируемыми грунтами, характеризуются также низкими прочностными свойствами.

3. Насыпные грунты и суглинки текучие ИГЭ-1, ИГЭ-6 расположены в зоне промерзания и относятся к сильнопучинистым грунтам.

Водовмещающими породами являются насыпные грунты, а также прослой и линзы песков в аллювиальных, озерно-ледниковых и ледниковых глинистых грунтах. Питание подземных вод инфильтрационное, за счет атмосферных осадков, дренирование происходит в р. Неву. Максимальный уровень подземных вод на возвышенной части площадки по архивным материалам изысканий можно ожидать на глубинах около 0,5–1,0 м. Территория является сезонно подтапливаемой в случае интенсивного выпадения атмосферных осадков и снеготаяния.

В таблице приведены физико-механические характеристики грунтов по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных в 2016 г.

2. Численное и аналитическое определение коэффициента устойчивости склона в природном состоянии

При численном моделировании устойчивости склона в природном состоянии необходимо выполнять качественный и количественный анализ полученных результатов.

На рис. 1 приведена расчетная схема с напластованиями грунтов и результатами численного моделирования устойчивости склона в природном состоянии. На рис. 2 показан поперечный разрез склона с номерами инженерно-геологических элементов и конструктивно-

Рис. 1. Расчетная схема с напластованиями грунтов (1) и результатами численного моделирования (2) устойчивости склона в природном состоянии ($K_{fem} = 1,15$)

технологическими решениями на строительный и эксплуатационный периоды.

На рис. 2 видно, что склон сложен преимущественно насыпным грунтом ИГЭ-1. В основании склона расположен сильнодеформируемый суглинок текучий (ИГЭ-6). По результатам численного моделирования получена призма скольжения в теле склона (см. рис. 1). Призма скольжения заходит в сильнодеформируемый грунт ИГЭ-6 и выходит за пределы подошвы склона. Качественный анализ результатов численного моделирования соответствует теоретическим положениям о форме и характерных особенностях призмы скольжения для склонов со слабым слоем грунта в основании.

Для выполнения количественного анализа следует выполнять проверочные аналитические расчеты устойчивости склонов. По результатам численного моделирования коэффициент устойчивости склона составил $K_{fem} = 1,15$. Воспользуемся уравнением равноустойчивого откоса профессора Н. Н. Маслова и выполним проверку полученного значения коэффициента устойчивости по формуле [1]:

$$K_{calc1} = \frac{\psi_{st}}{\alpha} = \frac{\arctg\left(\operatorname{tg}\varphi_I + \frac{c_I}{\gamma_I \cdot h}\right)}{\alpha} = \frac{\arctg\left(\operatorname{tg}24^\circ + \frac{1}{20 \cdot 7,3}\right)}{22} = 1,11, \quad (1)$$

Физико-механические характеристики грунтов

Геол. индекс	Номер ИГЭ и наименование грунтов	Характеристика	Число пластичности I_p	Влажность w , д. е.	Плотн. грунта ρ , т/м ³	Коэф. пористости E	Показатель консистенции I_L	Показатели прочности		Модуль деформации E , МПа
								φ , град	c , кПа	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t IV	1. Насыпные грунты: пылеватые пески со строительным мусором	X_H			2,00	0,850		26	2	11
		X_I			2,00			24	1	
		X_{II}			2,00			26	2	
lg III	6. Суглинки тяжелые пылеватые текучие серовато-коричневые ленточные	X_H	0,13	0,38	1,84	1,039	1,11	9	12	6
		X_I			$1,84 \pm 0,02$			7	9	
		X_{II}			$1,84 \pm 0,01$			7	10	
g III	10. Суглинки легкие пылеватые тугопластичные серые с гравием, галькой до 5 % с валунами	X_H	0,08	0,19	2,11	0,525	0,39	21	22	11
		X_I			$2,11 \pm 0,01$			19	14	
		X_{II}			$2,11 \pm 0,01$			20	17	
lg III $l\bar{z}$	11. Суглинки тяжелые пылеватые текучепластичные серовато-коричневые с прослоями песка	X_H	0,12	0,35	1,86	0,977	0,86	9	18	7
		X_I			$1,86 \pm 0,01$			7	15	
		X_{II}			$1,86 \pm 0,01$			8	16	
g III	12. Суглинки легкие пылеватые полутвердые серые с гравием, галькой до 5 % с обломками песчаника	X_H	0,10	0,18	2,13	0,497	0,14	22	44	17
		X_I			$2,13 \pm 0,01$			19	19	
		X_{II}			$2,13 \pm 0,01$			20	29	

где ψ_{st} — значение угла заложения склона в стабилизированном (устойчивом) состоянии, град; α — угол заложения склона, град; φ_1 — значение угла внутреннего трения грунта, град; c_1 — значение сцепления грунта по результатам инженерно-геологических изысканий, кПа; γ_1 — значение удельного веса грунта, кН/м³; h — высота склона, м.

Коэффициент устойчивости склона можно также вычислить по альтернативной формуле [2]:

$$K_{calc2} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{c \cdot l}{G \sin \beta} =$$

$$= \frac{\operatorname{tg} 24^\circ}{\operatorname{tg} 22^\circ} + \frac{1 \cdot 33,7}{146 \cdot 1 \cdot 20 \cdot \sin 33^\circ} = 1,11, \quad (2)$$

где l — длина дуги призмы скольжения, м; $G = Ab\gamma_1$ — вес призмы скольжения, кН; A — площадь призмы скольжения, м²; $b = 1$ м — расчетный погонный участок склона, м; β — преобладающий угол призмы скольжения к горизонтали, град.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования и проверочных аналитических расчетов показывает, что все полученные коэффициенты устойчивости достаточно близки по

Рис. 2. Поперечный разрез склона с номерами инженерно-геологических элементов и конструктивно-технологическими решениями на строительный и эксплуатационный периоды*

* Рабочий проект «Гидротехнические решения. Западная стенка берегоукрепления. Проект усиления анкерной стенки». ООО «ГЕОИЗОЛ». СПб., 2017.

значениям $K_{fem} = 1,15 \approx K_{calc1} = 1,11 = K_{calc2} = 1,11$. Количественный анализ показывает достоверность полученного значения коэффициента устойчивости.

3. Анализ конструктивно-технологического решения по укреплению склона на строительный и эксплуатационный периоды

Согласно проектному решению сооружение по функциональному назначению является гидротехническим объектом, на котором предусмотрена следующая последовательность работ:

- устройство грунтозащитной стенки у подошвы природного склона;
- устройство лицевой и анкерной стенки со стальными тяжами;
- выполнение грунтовых анкеров;
- подрезка профиля склона на период строительства;

- обратная засыпка и формирование проектного профиля склона на период эксплуатации.

На рис. 2 приведен поперечный разрез склона с номерами инженерно-геологических элементов и конструктивно-технологическими решениями на строительный и эксплуатационный периоды.

После устройства грунтозащитной стенки выполнялись работы по разработке грунта у подошвы склона, при этом не были своевременно выполнены удерживающие грунтовые анкеры. Это привело к образованию поверхностного оползня и значительным перемещениям шпунтового ограждения. На рис. 3 приведена фотофиксация поверхностного оползня, образовавшегося в результате подрезки подошвы склона на строительный период без устройства удерживающих грунтовых анкеров. Данный пример показывает необходимость выполнения каждого этапа производства работ с учетом заранее предусмотре-

Рис. 3. Фотофиксация поверхностного оползня, образовавшегося в строительный период при подрезке склона

тренных защитных мероприятий. Производство работ в условиях холмистого или предгорного рельефа с резким изменением природного состояния (земляные работы с подрезкой склона, временные нагрузки от складирования материалов и техники и т. д.) может приводить к серьезным и необратимым последствиям.

4. Критерий общей устойчивости склона и численное моделирование строительного и эксплуатационного периодов

Критерием общей устойчивости склона является коэффициент устойчивости, определяемый в соответствии с п. 5.2 СП 116.13330.2012 по формуле

$$K_s \geq \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c}, \quad (3)$$

где γ_n — коэффициент надежности по ответственности, принимаемый при расчетах по предельным состояниям первой группы в зависимости от уровня ответственности сооружения. Согласно ГОСТ 27751–2014 для данного гидротехнического сооружения $\gamma_n = 1,15$; γ_{lc} — коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый для строительного периода $\gamma_{lc} = 0,95$, для эксплуатационного периода $\gamma_{lc} = 1,0$; γ_c — коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы. Устанавливается в диапазоне $0,75 \leq \gamma_c \leq 1,00$ по специальным нормам проектирования для каждого типа соору-

жения индивидуально. В соответствии с табл. 6 из СП 23.13330.2011 для естественных склонов и откосов значение γ_c принимается равным 1,0.

Подставив в формулу (3) вышеприведенные коэффициенты, требуемые значения коэффициентов устойчивости должны быть не менее:

- на строительный период $K_s = 1,09$;
- на эксплуатационный период $K_s = 1,15$.

По конструктивно-технологическим решениям и последовательности производства работ, заложенным в проектом решении, было выполнено численное моделирование. Согласно его результатам получены следующие значения коэффициентов устойчивости склона на строительный и эксплуатационный периоды:

- строительный период $K_{calc1} = 1,11 > K_s = 1,09$;
- эксплуатационный период $K_{calc2} = 1,16 > K_s = 1,15$.

Таким образом, общая устойчивость данного склона обеспечивается на все периоды при строгом соблюдении последовательности производства работ и применении конструктивно-технологических решений, предусмотренных в проектной документации.

На рис. 4 приведены призмы скольжения в грунтовом массиве склона на строительный и эксплуатационный периоды.

Заключение

Анализ общей устойчивости склона необходимо выполнять с учетом следующих основных этапов (которые могут быть разделены на промежуточные этапы):

- природное состояние;
- строительный период;
- эксплуатационный период.

Природное состояние склона необходимо оценивать по результатам инженерно-геологических изысканий, в которых следует отмечать характерные особенности напластований грунтов, их физико-механические характеристики и гидрогеологические условия территории.

После анализа результатов изысканий выполняется численное моделирование природного состояния склона, результаты которого проверяются с помощью теоретического качественного анализа и количественных проверочных аналитических расчетов. При близком совпадении результатов численных и аналитических расчетов выполняется разработка конструктивно-

Рис. 4. Призмы скольжения в грунтовом массиве склона:
1 — строительный период ($K_{calc1} = 1,11 > K_s = 1,09$); 2 —
эксплуатационный период ($K_{calc2} = 1,16 > K_s = 1,15$)

технологических решений. При значительном несоответствии результатов расчетов выполняются дополнительные исследования по уточнению исходных данных, применяемой расчетной модели, граничных условий и т. д.

В строительный период необходимо обеспечивать строгое соответствие конструктивно-технологических решений и последовательности этапов производства работ указанным в проектной документации. Отклонения могут привести к серьезным и необратимым аварийным ситуациям.

На весь период эксплуатации склонов и откосов необходимо проводить периодическое визуальное обследование (не реже одного раза в пять лет) грунтового массива и расположенных в зоне его влияния сооружений для своевременного выявления возможного нарушения их работоспособного состояния.

Библиографический список

1. Добров Э. М. Механика грунтов. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 266 с.
2. Предложения по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок. М.: СоюзДорНИИ, 1966. 68 с.
3. Мангушев Р. А., Усманов Р. А., Ланько С. В., Конюшков В. В. Методы подготовки и устройства искус-

ственных оснований: учеб. пособие. М.: АСВ, 2014. 284 с.

4. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах: учеб. пособие. М.: АСВ, 2016. 256 с.

5. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Сапин Д. А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 47–54.

6. Мангушев Р. А., Ильичев В. А., Конюшков В. В., Чунюк Д. Ю., Болдырев Г. Г. Справочник геотехника. Основания, фундаменты, подземные сооружения. М.: АСВ, 2016. С. 851–875.

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. Конюшков В. В., Веселов А. А., Белый А. А. Инженерное освоение и благоустройство территории на зольных грунтах для расширения контейнерного терминала морского порта в Санкт-Петербурге // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 70–76.

References

1. Dobrov Eh. M. *Mekhanika gruntov* [Mechanics of soil]. Moscow, Akademiya Publ., 2013, 266 p.
2. *Predlozheniya po raschetu ustoychivosti otkosov vysokikh nasypey i glubokikh vyemok* [Proposals on stability calculation of high embankment slopes and deep excavation]. Moscow, SoyuzDorNII Publ., 1966, 68 p.
3. Mangushev R. A., Usmanov R. A., Lan'ko S. V., Konyushkov V. V. *Metody podgotovki i ustroystva iskusstvennykh osnovaniy. Ucheb. posobie* [Methods of preparation and building of the artificial bases. Teaching manual]. Moscow, ASV Publ., 2014, 284 p.
4. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh. Ucheb. posobie* [Design and construction of underground structures in open construction pits. Teaching manual]. Moscow, ASV Publ., 2016, 256 p.
5. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., Sapin D. A. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya pri stroitel'stve i rekonstruktsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Engineering and geotechnical survey work at construction and reconstruction in the conditions of the dense urban development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 5, pp. 47–54.
6. Mangushev R. A., et al. *Spravochnik geotekhnika* [Reference book in geo-engineering]. *Osnovaniya, fundamente, podzemnye sooruzheniya* [Bases, foundations,

underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2016, pp. 851–875.

7. Konyushkov V. V. *Inzhenernaya zashchita territoriy ot sklonovykh protsessov s uchetom prirodnikh usloviy i tekhnogennykh vozdeystviy* [Engineering protection of the territories against slope shift processes taking into account natural conditions and technogenic loads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 137–142.

8. Konyushkov V. V., Veselov A. A., Belyy A. A. *Inzhenernoe osvoenie i blagoustroystvo territorii na zol'nykh gruntakh dlya rasshireniya konteynernogo terminala morskogo porta v Sankt-Peterburge* [Engineering development and landscaping of the territory on the ash soils for extension of the container terminal at the sea port in Saint Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 70–76.