УДК 624.9

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

© А. В. Пятница, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: v.konyushkov@mail.ru, pyatnicza.anton@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-100-105

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

© A. V. Pyatnitsa, undergraduate

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: v.konyushkov@mail.ru, pyatnicza.anton@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ ОТ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

NUMERICAL SIMULATION OF THE ALTERNATIVE DESIGN OF TERRITORY ENGINEERING PROTECTION MEASURES AGAINST LANDSLIDE PROCESSES

Приводится пример вариантного проектирования мероприятий по инженерной защите участка автомобильной дороги от склоновых процессов. Расчетное обоснование принятых конструктивно-технологических решений по инженерной защите выполнено с помощью численного моделирования в программном комплексе Plaxis 2D.

Ключевые слова: склоновые процессы, численное моделирование, вариантное проектирование, мероприятия по инженерной защите.

The article gives an example of alternative design of measures on engineering protection of the motor road section against possible landslide processes. The calculation analysis of the accepted design and technological solutions on engineering protection is performed by means of numerical modeling in the Plaxis 2D software complex.

Keywords: landslide processes, numerical modeling, alternative design, engineering protection measures.

Введение

Проектирование и строительство на территориях со сложным рельефом сооружений различного назначения: автомобильных и железных дорог, инженерных сетей и коммуникаций, лыжных трасс, канатных дорог и прочих линейных объектов часто сопряжено с высокой опасностью развития склоновых процессов [1, 2]. Как правило, склоновые процессы выражены оползнями, обвалами и осыпями [3]. Активизацией развития склоновых процессов могут послужить следующие техногенные воздействия: подрезка природных склонов в естественном состоянии, изменение режима стока и фильтрации поверхностных и подземных вод, устройство рыхлых насыпных грунтов без уплотнения в качестве обратной засыпки подпорных стен и искусственных насыпей и многие другие [4]. Для обеспечения устойчивости склонов и откосов разрабатываются специальные мероприятия по инженерной защите территории. Состав и объе-

мы таких мероприятий определяются расчетным обоснованием на основе:

- анализа результатов инженерных изысканий;
- результатов численного моделирования вариантного проектирования мероприятий по инженерной защите [5–8].

Характеристика объекта исследований

Объектом исследования является реконструируемая автомобильная дорога, расположенная в горной системе Большого Кавказа Краснодарского края. Дорога протяженностью более 16 км расположена в областях с низкогорным, среднегорным сложным и сильно расчлененным рельефом. На рис. 1 приведен общий вид на участок реконструируемой автомобильной дороги.

Анализ результатов инженерных изысканий

Состав и объемы работ по инженерным изысканиям должны соответствовать требованиям СП 47.13330.2016. Для проектирования инженер-

Рис. 1. Общий вид на участок реконструируемой автомобильной дороги

ной защиты анализу подлежат преимущественно следующие виды инженерных изысканий:

- гидрометеорологические;
- геологические;
- геодезические.

Согласно результатам геодезических изысканий крутизна склонов изменяется в пределах от 15 до 45°. На территории преобладают склоны средней крутизны от 20 до 30°. Рельеф участка значительно неровный, нарушенный оползневыми, суффозионными и эрозионными процессами с локальным проявлением крипа. По склонам наблюдается активная деятельность постоянных и временных поверхностных вод.

На основании результатов инженерно-геологических изысканий на рассматриваемой территории были выявлены скальные и дисперсные грунты. В пределах выполненных геологических скважин выделены отложения следующего генезиса:

- техногенные (t);
- делювиально-пролювиальные (dp);
- элювиальные (e);
- нижнеюрские ($J1$).

В строении рассматриваемого геологического разреза (рис. 2) выделены семь инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- ИГЭ-1а. Насыпной грунт — дресвяный с суглинистым твердым заполнителем. Вскрытая мощность слоя изменяется в пределах от 0,5 до 6,0 м;

- ИГЭ-1б. Насыпной грунт — суглинок дресвяный твердый, неоднородный. Вскрытая мощность слоя изменяется в пределах от 0,5 до 9,5 м;

- ИГЭ-5а. Суглинок легкий пылеватый дресвяный твердый. Вскрытая мощность слоя изменяется в пределах от 1,5 до 30,0 м;

- ИГЭ-93г. Щебенистый грунт средней степени водонасыщения, средней прочности, неоднородный. В слое грунта присутствуют отдельные блочные включения аргиллита, линзы дресвяного и суглинистого твердого грунтов. Максимальная вскрытая мощность слоя составила 29,0 м;

- ИГЭ-95г. Суглинок легкий пылеватый дресвяный твердый. Максимальная вскрытая мощность слоя составила 17,5 м;

- ИГЭ-9а. Аргиллит низкой прочности, средней плотности, среднепористый, сильновыветрелый, размягчаемый. Максимальная вскрытая мощность слоя составила 22,0 м;

- ИГЭ-9г. Аргиллит средней прочности, очень плотный, слабопористый, размягчаемый [9].

Грунтовые воды на рассматриваемой территории распределены неравномерно, в четвертичных отложениях и трещиноватых зонах коренных горных пород. В крупнообломочных грунтах наблюдается спорадический характер распространения поровых вод. Наиболее высокие уровни подземных вод устанавливаются в весенний паводковый период, связанный с таянием снега и ливневыми осадками. Локально установившийся уровень грунтовых вод зафиксирован от 1,5 до 21,0 м.

Строительная площадка расположена в сейсмически опасном районе. Расчетная сейсмичность, согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах», составляет 9 баллов.

Согласно результатам гидрометеорологических изысканий климатические условия территории отличаются исключительно высокой пространственно-временной изменчивостью. Данный район характеризуется практически наибольшим количеством выпадения атмосферных осадков в Российской Федерации (до 2700 мм/год). Это значительно влияет на активизацию и развитие опасных склоновых процессов.

В табл. 1 приведены физико-механические характеристики грунтов участка изысканий.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов участка изысканий

Нормативные значения	Наименование характеристики		1а	1б	5а	93г	95г	9а	9г
	Метод сдвига целика	Плотность грунта ρ , г/см ³	2,13	2,04	2,07	2,38	2,17	2,11	2,66
		Сцепление C , МПа	0,01	0,017	0,033	–	–	–	–
		Угол внутреннего трения φ , град	27	24,5	18	–	–	–	–
	Метод ДальНИИС	Сцепление C , МПа	0,022	0,036	0,040	0,018	0,031	–	–
		Угол внутреннего трения φ , град	20	20	20	20	20	–	–
	Модуль деформации (ДальНИИС) E , МПа		31,0	27,6	23,6	46,3	23,5	–	–
	Предел прочности на одноосное сжатие в сухом состоянии $R_c(d)$, МПа		–	–	–	–	–	2,1	70,3
Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии $R_c(w)$, МПа		–	–	–	–	–	1,1	35,9	
Расчетные значения	$\alpha = 0,95$	Плотность грунта ρ , г/см ³	1,97	1,96	2,02	2,23	2,10	2,09	2,63
		Удельное сцепление C , МПа	0,015	0,024	0,022	0,012	0,021	0,03	0,05
		Угол внутреннего трения φ , град	17,4	17,4	15,6	17,4	17,4	26,6	28,8
	$\alpha = 0,85$	Плотность грунта ρ , г/см ³	2,04	1,99	2,04	2,29	2,13	2,10	2,64
		Сцепление C , МПа	0,022	0,036	0,033	0,018	0,031	0,038	0,062
		Угол внутреннего трения φ , град	20	20	18	20	20	32,0	34,5

Конструктивно-технологические решения по инженерной защите

На рис. 2 пунктирной линией показан контур рельефа естественного сложения до подрезки природного склона для строительства автомобильной дороги. Для обеспечения устойчивости массива грунта и предотвращения развития оползневых процессов на объекте были рассмотрены следующие варианты инженерной защиты:

1. Подпорные стены на естественном основании.
2. Подпорные стены на свайном фундаменте.
3. Подпорные стены на свайном фундаменте совместно с устройством грунтовых анкерных свай.
4. Подпорные стены на свайном фундаменте совместно с устройством грунтовых анкерных свай и нагельным креплением природного склона.

Выбор мероприятий по инженерной защите обосновывается проверкой условий общей и местной устойчивости склона.

На период эксплуатации объекта на некоторых участках автомобильной дороги по горизонтальным смещениям секций подпорных стен и раскрытию ширины температурно-осадочных деформационных швов была определена недостаточность ранее выполненных мероприятий

по инженерной защите. Эти дефекты свидетельствовали о неравномерных деформациях подпорных стен, связанных с осадкой основания, а также воздействием склоновых процессов. Для нормальной эксплуатации существующих подпорных стен было принято решение об их усилении с помощью грунтовых анкерных и нагельных свай совместно с системой противоэрозионной защиты.

Численное моделирование мероприятий по инженерной защите

Численное моделирование мероприятий по инженерной защите было выполнено в программном комплексе Plaxis 2D. Возможности программы позволяют по стадиям анализировать изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

На рис. 3, 4 приведены этапность и результаты численного моделирования мероприятий по инженерной защите.

Этап 1 — естественное природное состояние. Расчетное значение коэффициента устойчивости составляет $1,11 < 1,15$. Нормативный коэффициент запаса устойчивости на основное сочетание нагрузок не обеспечивается.

Этап 2 — произведена подрезка склона для устройства подпорной стены. Нарушены условия естественного сложения склона. В качестве

Рис. 2. Характерный инженерно-геологический разрез участка автомобильной дороги: 1 — автомобильная дорога; 2 — реконструируемая подпорная стена $H = 8$ м, $B = 5$ м; 3 — противоэрозийная защита; 4 — геологические выработки; 5 — грунтовые анкера Geoizol MP 40/18 18 м с шагом 2×2 м; 6 — БНС 1020-20 шаг 3 м; 7 — грунтовые анкера Geoizol MP 105/78 30 м с шагом 3 м; 8 — уровень грунтовых вод (УГВ)

полезной нагрузки был принят вес буровой техники. Расчетное значение коэффициента устойчивости составляет $1,09 < 1,15$. Нормативный коэффициент запаса устойчивости на основное сочетание нагрузок не обеспечивается, но на период производства работ значение коэффициента больше единицы, что является достаточным для обеспечения устойчивости.

Выполняем вариантное проектирование мероприятий по инженерной защите.

Этап 3 — устройство уголкового подпорной стены на естественном основании. Ввиду того что поверхность обрушения в грунтовом массиве откоса располагается на глубине, данное решение неприменимо. Расчетное значение коэффициента устойчивости составляет $1,08 < 1,15$. Нормативный коэффициент запаса устойчивости на основное сочетание нагрузок не обеспечивается.

Этап 4 — устройство уголкового подпорной стены на свайном основании. Длина свай обеспечивает достаточную глубину заделки в несущий слой грунта, выходящий за пределы поверхности скольжения. Условие устойчивости на основное сочетание нагрузок выполняется. Значение расчетного коэффициента устойчивости на особое

(сейсмическое) сочетание нагрузок меньше нормативного: $1,03 < 1,05$.

Этап 5 — усиление существующей конструкции устройством одного ряда анкерных свай. При этом призма скольжения образуется ниже подпорной стены. Нормативный коэффициент запаса устойчивости на особое сочетание нагрузок обеспечивается $1,05 \approx 1,05$. Однако склон ниже подпорной стены находится в предельном напряженном состоянии.

Этап 6 — устройство нагельного поля ниже подпорной стены. Данные мероприятия перераспределяют напряжения от движения оползневого массива ниже подпорной стены. Общая и местная устойчивость склона обеспечиваются с запасом $1,18 \gg 1,05$.

В табл. 2 приведены сводные результаты численного моделирования вариантного проектирования мероприятий по инженерной защите.

Выводы

1. Результаты инженерных изысканий в районах развития склоновых процессов необходимо выполнять и анализировать таким образом, чтобы уже на предпроектной стадии была возможность определить основной перечень меро-

Рис. 3. Расчетные схемы вариантного проектирования мероприятий по инженерной защите

приятий по инженерной защите (до выполнения аналитических и численных расчетов).

2. По результатам анализа инженерных изысканий выполняется вариантное проектирование мероприятий по инженерной защите. Численное моделирование совместной работы при-

Рис. 4. Призмы скольжения в грунтовом массиве

родного склона с различными конструктивно-технологическими решениями позволяет объективно выбрать наиболее оптимальный вариант инженерной защиты.

3. Как показано в настоящей статье, состав и объемы работ по инженерной защите обосновываются результатами численного моделирова-

Таблица 2

Сводные результаты численного моделирования вариантного проектирования мероприятий по инженерной защите

Этап моделирования	Характеристика этапа	Коэффициент устойчивости Plaxis 2D		Примечание
		Статика	Сеймика	
1	Естественное состояние	1,11	—	Склон устойчив. Нормативный коэффициент запаса устойчивости не обеспечен
2	Подрезка склона. Период производства работ	1,09		Временная устойчивость на период производства работ обеспечена
3	Угловая подпорная стена на естественном основании	1,08		Решение неэффективно. Условия общей и местной устойчивости не выполняются
4	Угловая подпорная стена на свайном основании	1,32	1,03	Условие устойчивости на основное сочетание нагрузок выполняется. При учете сейсмического воздействия условие устойчивости не выполняется
5	Устройство грунтового анкера	1,34	1,05	Общая устойчивость склона обеспечена. Ниже подпорной стены склон находится в предельном напряженном состоянии
6	Устройство нагельного поля	1,44	1,18	Условия устойчивости всей конструкции на основное и особое сочетание нагрузок выполняются

ния (с учетом этапности производства работ) и особенностями условий эксплуатации сооружений (воздействие основного и особого сочетаний нагрузок).

Библиографический список

1. Гинзбург Л. К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости и оползневой нагрузки. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 122 с.
2. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 80 с.
3. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
4. Тихвин И. О. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. М.: Стройиздат, 1984. 66 с.
5. 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.
6. Конюшков В. В. Научно-техническое сопровождение вертикальной планировки территории при строительстве Конгрессно-выставочного центра // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 83–91.
7. 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.
8. 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., СПб.: АСВ, 2010. 240 с.
9. 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 политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 11. С. 111–125.

References

1. Ginzburg L. K. *Rekomendatsii po izboru metodov rascheta koefitsienta ustoychivosti i opolznevo*

davleniya [Recommendations on selecting the methods for calculating the stability coefficient and landslide pressure factor]. Moscow, TsBNTI Publ., 1986, 122 p.

2. Ginzburg L. K. *Protivoopolznevye uderzhivayushchie konstruksii* [Landslide prevention structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 80 p.

3. Maslov N. N. *Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi)* [Soil mechanics in construction practice (landslide processes and prevention measures)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977, 320 p.

4. Tikhvin I. O. *Rekomendatsii po kolichestvennoy otsenke ustoychivosti opolznevyykh sklonov* [Recommendations on quantitative assessment of landslide slope stability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 66 p.

5. Konyushkov V. V. *Inzhenernaya zashchita territoriy ot sklonovykh protsessov s uchetom prirodnikh usloviy i tekhnogennykh vozdeystviy* [Engineering protection of territories from 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.

6. Konyushkov V. V. *Nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie vertikal'noy planirovki territorii pri stroitel'stve Kongressno-vystavochnoy tsentra* [Scientific and technical support of vertical planning of the territory during construction of the Congress and Exhibition Center]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 83–91.

7. Konyushkov V. V., Vladimirova E. I. *Analiz i prognoz ustoychivosti sklona v prirodnom sostoyanii, na stroitel'nyy i ehkspluatatsionnyy 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.

8. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh. Ucheb. posobie* [Design and layout of underground structures in open pits. Teaching manual]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2010, 240 p.

9. Konyushkov V. V., Veselov A. A., Kondrat'eva L. N. *Kompleksnyy analiz rezul'tatov inzhenernykh izyskaniy dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ehkspluatatsii sooruzheniy na territoriyakh so sklonovymi protsessami* [Complex analysis of engineering research results for design, construction and operation of structures in territories with slope shift processes]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo un-ta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125.