**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 7, № 3, 2016
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2016.3.12

УДК 69.035.2

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ОПОР ЭСТАКАД НА ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНАХ ГОРОДА СОЧИ (КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

Д.В. Лейер

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 13 июня 2016
Принята: 1 июля 2016
Опубликована: 30 сентября 2016

Ключевые слова:

оползень, численный
эксперимент, противооползневое
сооружение, глинистый грунт,
опоры эстакад

АННОТАЦИЯ

В связи с расширением и увеличением транспортной инфраструктуры города Сочи в процессе подготовки к Олимпийским играм 2014 года, а также освоением новых участков земель появилась необходимость строительства в труднодоступных горных районах в сложных инженерно-геологических условиях на оползневых склонах. Часто единственным возможным вариантом строительства автомобильных дорог в горной местности является устройство транспортных эстакад. Однако для обеспечения их безопасной эксплуатации на оползневых склонах необходимо строительство защитных сооружений. При этом мероприятия активной защиты от оползневых деформаций (полностью удерживающие оползневой массив) часто являются очень затратными. Известные методики в силу принятых в них упрощений и допущений определяют значительные погрешности при проектировании противооползневых сооружений. Безопасность и надежность работы таких конструкций при этом обеспечивается принятием высоких коэффициентов запаса. Это приводит к увеличению материалоемкости, трудоемкости возведения защитных сооружений и снижению их экономической эффективности. Для разработки экономически эффективных защитных сооружений на свайном основании разработана расчетная схема обтекаемых конструкций, реализованная в геотехническом программном комплексе Plaxis, а также оптимизирована методика их расчета. Разработка оптимального конструктивного решения обтекаемых защитных сооружений на оползневых склонах проведена из условий непродавливания грунта в межсвайное пространство, одинакового нагружения всех свайных элементов в ряду, снижения давления, приходящегося на конструкцию. Результаты численных экспериментов взаимодействия грунта с обтекаемыми свайными сооружениями были использованы при проектировании защитных конструкций на ответственных геотехнических объектах Краснодарского края. Результаты исследований были отражены в отраслевых дорожных документах ОДМ 218.2.050–2015 и ОДМ 218.2.033–2013.

© ПНИПУ

© Лейер Дарья Валерьевна – магистр, e-mail: dasha_leyer@mail.ru.

Dar'ia V. Leier – Master, e-mail: dasha_leyer@mail.ru.

ENGINEERING PROTECTION OF TRESTLE SUPPORT ON LANDSLIDE SLOPES OF THE CITY OF SOCHI (KRASNODAR REGION)

D.V. Leier

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 13 June 2016
Accepted: 01 July 2016
Published: 30 September 2016

Keywords:

landslide, numerical experiment,
landslide protection structure,
clayey soil, trestle support

ABSTRACT

The need for construction at arduous mountainous areas with difficult engineering-geological conditions on landslide slopes has appeared due to the expansion and increase in transport infrastructure of the city of Sochi in the course of preparation for the 2014 Olympic Games and also with the development of new land sites. The construction of transport trestles is often only possible option of highways building at the mountain areas. However, ensuring their safe operation at landslide slopes requires building the protective constructions. At the same time, the measures of active protection against landslide deformations (which are completely bearing the landslide mass) often are very costly. The known methods determine considerable errors when designing landslide protection constructions owing to the simplifications and assumptions accepted in them. Safety and reliability of work for such designs at the same time is provided by acceptance of high coefficients of an inventory. It leads to increase in a material capacity, labor input of building the protective constructions and decrease in their cost efficiency. The settlement scheme for streamline construction is implemented in the geotechnical program complex Plaxis is developed for building cost-efficient protective constructions on the pile basis and also the methods of their calculation is optimized. The optimal constructive solution of streamline protective constructions on landslide slopes is developed from such conditions: not occurring breakdowns of soil in interpile space, an identical load of all pile elements among the row; the decrease of pressure applied to the construction. Results of numerical experiments for soil interaction with streamline pile constructions have been used in designing protective constructions for essential geotechnical objects of Krasnodar region. Researches results have received display in industry road documents IRD 218.2.050–2015 и IRD 218.2.033–2013.

© PNRPU

Введение

Исследованиями оползневых процессов (рис. 1) [1] в районе Большого Сочи (Краснодарский край) выявлено, что наиболее распространенной формой нарушения устойчивости склонов являются оползни сползания. Их еще называют оползнями течения¹ [2]. Они характеризуются пластической консистенцией грунтов и небольшой глубиной – до 7 м. Причем пластической консистенцией грунтов обладают в основном глинистые грунты. Кроме того, рассматриваемая территория подвержена сейсмическим воздействиям, которые могут привести к изменению физико-механических свойств грунтов.

Чаще всего для стабилизации оползневого массива используют железобетонные фундаменты на свайном основании глубокого заложения [3]. Использование свайных фундаментов позволяет устранить большинство причин, вызывающих оползневые деформации (сдвигающие составляющие гравитационных сил, гидродинамическое давление грунтовых вод, эрозию, абразию), а также защитить склоны и откосы от влияния сейсмических и антропогенных воздействий [1, 4].

По определению Л.К. Гинзбурга [3], противооползневые удерживающие конструкции (свайные основания глубокого заложения) имеют ряд преимуществ перед поддерживающими сооружениями на естественном основании:

¹ Противооползневое сооружение для защиты подземных трубопроводов: пат. 2186907 Рос. Федерация / С.Г. Смирнов, К.Ш. Шадунц, С.И. Маций. Заявл. 15.06.2001; опубл. 10.08.2002.

- способствуют стабилизации грунтов только механическим удержанием склона даже при наличии комплекса причин, вызывающих оползень;
- позволяют избежать устройства сложной дренажной системы, так как отдельные свайные элементы не препятствуют естественному движению грунтовых вод;
- дают возможность локального укрепления оползня на какой-либо части склона;
- позволяют выполнить заглубление свай в несмещаемые породы;
- исключают подрезки склонов, так как свайные конструкции изготавливают с поверхности грунта и т.д. [3].

Рис. 1. Формы нарушения устойчивости склонов по классификации Н.Н. Маслова [1]: *а* – вывалы и обвалы; *б* – скольжение; *в* – спływ; *г* – обрушение со срезом и вращением; *д* – оползень-сдвиг; *е* – пластичная деформация; *ж* – скол при осадке; *з* – сползание; *и* – вековая переработка склона
Fig. 1. Forms of violation of stability of slopes on N.N. Maslov's classification: *a* – intrushes and collapses; *b* – sliding; *c* – running off; *d* – collapse with a cut and rotation; *e* – landslide shift; *f* – permanent set; *g* – chip at draft; *h* – slipping; *i* – century processing of a slope

1. Влияние оползневых грунтов на отдельно стоящие объекты

При исследовании рекомендаций нормативных источников² выявлено, что оползневое давление, приходящееся на сооружение, необходимо рассчитывать на 1 пог. м (рис. 2, б). Однако такая схема влияния оползневого склона на конструкцию не всегда является корректной, как, например, в случае точечной защиты отдельно стоящих объектов. При анализе схем влияния смещающихся грунтов на отдельно стоящий объект (см. рис. 2) встает вопрос о корректном определении давления, приходящегося на сооружение, при проектировании.

² СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. – М., 2012; СП 101.13330.2012. Стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. – М., 2012.

На рис. 2, *а* показана одна из схем влияния оползневого склона на конструкцию в виде уплотненного грунтового ядра. В таком случае увеличение оползневого давления происходит до тех пор, пока не образуется грунтовое ядро (в зависимости от вида грунта изменяются параметры ядра [4, 5]), далее следует плавное обтекание грунта по проложенной траектории. На рис. 2, *б* показана стандартная зона влияния смещающегося массива на конструкцию, причем в расчет принимается узкая полоса склона шириной, равной ширине опоры [6]. На рис. 2, *в* показана увеличенная зона влияния смещаемого грунта на конструкцию [6]. Образование такой зоны возможно в случае неоднородности грунта (глыбы и обломки скальных пород).

Рис. 2. Схемы зон влияния оползневого склона на опору: *а* – схема влияния оползневого склона на опору в виде уплотненного грунтового ядра [5, 7]; *б* – схема влияния оползневого давления узкой полосой склона шириной, равной ширине опоры [4]; *в* – схема увеличенной (неравномерной) зоны влияния смещаемого грунта на конструкцию [6]

Fig. 2. Schemes of zones of influence of a landslide slope on a support: *a* – the scheme of influence of a landslide slope on a support in the form of the condensed soil kernel; *b* – scheme of influence of landslide pressure narrow strip of a slope width equal to support width; *c* – the scheme of the increased (uneven) zone of influence of movable soil on a construction

При предварительном (предпроектном) сравнении моделей воздействия оползневого давления можно сделать следующие выводы:

- первая модель достаточно точна, но при расчетах величина давления обтекания получается меньше, чем в двух других моделях;
- вторая модель в силу своей простоты и понятности дает объективные результаты расчетов оползневых давлений, соответствующие действительности, и не требует дополнительных исходных данных и опытов;
- третья модель может применяться для определения величины оползневого давления в грунтах с включениями глыб и обломков, однако требует исследования по определению размеров зоны влияния.

Проблемам развития оползневых подвижек и обеспечения устойчивости склонов и откосов посвящены труды многих зарубежных и отечественных ученых: А.И. Билеуша [4], Л.К. Гинзбурга [3], Н.Н. Маслова [8], С.И. Мация [9, 10], Г.Д. Недри [7], К.Ш. Шадунца [2], К. Виджиани [11], Т. Адаши [12], Т. Ито [13], Т. Мацуи [14], Х.Г. Паулоса [15] и др. [16–22]. Однако в настоящий момент механизм взаимодействия грунта оползней с конструкциями для локальной защиты опор эстакад изучен недостаточно. Анализ нормативной литературы и научных публикаций по проектированию и строительству противооползневых свайных сооружений позволил определить основные направления исследований.

2. Описание разработанной расчетной схемы исследования

Для защиты отдельно стоящих объектов, располагаемых на оползневых склонах, иногда достаточно перенаправить вектор движения оползневых масс, а не полностью удерживать смещающийся массив. Для эффективной защиты опор эстакад от оползневого давления грунта, а также рационального расположения свайных элементов защитного сооружения проведена серия численных экспериментов, реализованных в программном комплексе Plaxis. Исследование по рациональному расположению свайных элементов, расположенных перпендикулярно вектору смещения оползня, а также определение расстояний до границ расчетной схемы приведены в [1]. Оптимизированная согласно [1, 6, 7] расчетная схема линейного сооружения, а также сооружения, расположенного клином относительно вектора смещения оползня, включает в себя следующий ряд параметров (рис. 3, 4): диаметр свай $D = 1,0$ м; шаг свай в ряду $2,0 \text{ м} \leq L \leq 6,0 \text{ м}$; угол встречи $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Прочностные характеристики грунта приняты согласно [23, 24] и приведены в табл. 1. Величина выдвигки средней сваи относительно оси сооружения определялась в зависимости от шага свай, а также исследуемого угла встречи. Моделирование взаимодействия глинисто-пластичной породы как наиболее распространенной в районе строительства (Большой Сочи) с защитным сооружением осуществлялось методом конечных элементов с помощью геотехнического программного комплекса Plaxis. Нагружение в каждом численном эксперименте проводилось ступенями (автоматическое пошаговое нагружение) до образования пластического течения грунта, вплоть до разрушения грунтового тела вокруг сооружения [1, 5, 6].

Исследование взаимодействия глинистых оползневых грунтов со сваями однорядного сооружения точечной защиты опор эстакад включает в себя ряд задач:

- выявление закономерностей распределения оползневого давления как вокруг каждой сваи, так и между сваями в зависимости от шага элементов;
- анализ особенностей процесса деформирования грунтов при взаимодействии с защитными сооружениями;
- изучение образования пластических деформаций грунтов вокруг сооружений при точечной защите опор;

– определение наиболее эффективного шага свай в противооползневом сооружении при обтекании грунтом.

Рис. 3. Расчетная схема задачи обтекания грунта вокруг линейного сооружения
Fig. 3. The scheme of calculation of a problem of a flow of soil around linear construction

Рис. 4. Расчетная схема задачи обтекания грунта вокруг сооружения, расположенного клином, с учетом смещения средней свай
Fig. 4. The scheme of calculation of a problem of a flow of soil around the construction located a wedge with the shift of an average pile

Таблица 1

Прочностные характеристики исследуемого грунта

Table 1

Strength characteristics of soil of researches

Изменяемый параметр	Условное обозначение	Единицы измерения	Величина
Удельное сцепление	c	кПа	25,0
Угол внутреннего трения	φ	град	4,0
Модуль деформации	E	МПа	2,5

Таблица 2

Исследуемые варианты расположения свай в ряду относительно оси сооружения
(величина выдвиги H , м)

Table 2

Researches options of an arrangement of piles concerning a axis of construction (size shift H , m)

Угол встречи α , град	Относительный шаг свай в ряду L/D , м								
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
75	0,536	0,670	0,804	0,938	1,072	1,206	1,34	1,474	1,608
60	1,155	1,443	1,732	2,021	2,309	2,598	2,887	3,175	3,464
45	2,000	2,500	3,000	3,50	4,000	4,500	5,000	5,500	6,000
30	3,464	4,330	5,196	6,062	6,928	7,794	8,660	9,526	10,392

Для минимизации влияния границ расчетной области на результаты вычислений размеры расчетной схемы как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно оползневых смещений вдоль оси сооружения приняты равными $10,0D$ от оси крайней сваи. Расстояние до границ расчетной схемы получено с помощью анализа полей продольных перемещений грунта при малых нагрузках при шаге свай $L = 2,0D$ и $L = 6,0D$ [1, 5, 6].

3. Характер взаимодействия линейного обтекаемого сооружения со сдвигающимся глинистым грунтом

При исследовании характера взаимодействия оползневого грунта с линейным «обтекаемым» сооружением разработана расчетная схема, приведенная на рис. 3. При постепенном нагружении расчетной схемы выявлено, что при незначительных оползневых нагрузках на некотором удалении от свай ($\approx 3D$) выше сооружения по склону грунт уплотняется практически равномерно по всему фронту конструкции. Такой результат достигается за счет развития уплотнений между сваями, т.е. арочного эффекта, в связи с чем не происходит продавливания, при этом образуется практически сплошное свайно-грунтовое сооружение переменной жесткости. В начальной стадии нагружения за счет бокового давления нормальные напряжения на крайних сваях больше, чем на средней, так же как касательные (рис. 5, а, б). Это происходит из-за образования клина уплотненного грунта, в результате чего давление в средней части сооружения частично воспринимается грунтом. В процессе увеличения оползневого давления до предельного значения при взаимодействии грунтов (независимо от прочностных характеристик) со свайными элементами защитной конструкции выделяются три стадии развития пластических деформаций: уплотнение пород, местные сдвиги, прогрессирующие деформации.

Основной задачей выполненных исследований стало определение оптимального шага свай в линейном обтекаемом сооружении. Это может быть достигнуто путем обеспечения непродавливания грунта в межсвайное пространство, а также равномерным загрузением всех свай в ряду. В результате численных расчетов установлено, что большое влияние на поведение свайно-грунтовой системы при продавливании и обтекании оказывают параметры свайного ряда: диаметр элементов и их шаг.

Рис. 5. Распределение касательных (а) и нормальных (б) напряжений по контактному интерфейсу (начальная стадия нагружения, $L = 2D$)

Fig. 5. Distribution of tangents and normal stresses on the contact interface (initial stage of loading, $L = 2D$)

Зависимость оптимального шага свай (L/D) от удельного сцепления грунта c при постоянном угле внутреннего трения $\varphi = 10^\circ$ приведена на рис. 6. Зависимость оптимального шага свай (L/D) от угла внутреннего трения φ при постоянном удельном сцеплении грунта $c = 10$ кПа приведена на рис. 7. Зависимости оптимального шага свай от удельного сцепления грунта c и угла внутреннего трения φ представлены формулами в виде показательных функций:

$$L/D = 2,1894 \cdot 1,0429^\phi, \quad (1)$$

$$L/D = 3,3569 \cdot 1,0066^c, \quad (2)$$

где L – расстояние между осями свай в ряду, м; D – диаметр свай, м; ϕ – угол внутреннего трения грунта; c – удельное сцепление грунта.

В связи с тем что для глинистых пород характерны низкое значение удельного сцепления грунта c и довольно большой диапазон значения угла внутреннего трения ϕ , при проектировании обтекаемых противооползневых сооружений рекомендуется пользоваться формулой (1).

Рис. 6. Зависимость оптимального шага свай (L/D) от удельного сцепления грунта c при угле внутреннего трения $\phi = 10^\circ$
Fig. 6. Dependence of an optimum step of piles (L/D) on specific coupling of soil c of at internal friction $\phi = 10^\circ$

Рис. 7. Зависимость оптимального шага свай (L/D) от угла внутреннего трения ϕ при удельном сцеплении грунта $c = 10$ кПа
Fig. 7. Dependence of an optimum step of piles (L/D) on internal friction ϕ of at specific coupling of soil $c = 10$ kPa

4. Характер взаимодействия обтекаемого сооружения, расположенного клином относительно вектора смещения оползневых масс, с глинистым грунтом

Для определения наиболее рационального расположения свай в однорядном удерживающем сооружении, расположенном клином относительно вектора смещения оползня, проведено исследование напряженно-деформированного состояния. Рассмотрено расположение свай в ряду от самого тесного ($L = 2,0D$ в осях) до редкого ($L = 6,0D$ в осях). Выдвижка H средней сваи (из трех) относительно оси сооружения изменяется от шага свай в ряду в зависимости от угла встречи α относительно вектора смещения оползневых масс (см. рис. 1). Исследуемые варианты расположения свай в ряду относительно оси сооружения приведены в табл. 2.

На рис. 8 приведены наиболее характерные результаты расчетов развития пластических деформаций при изменении величины выдвижки H средней сваи (из трех). Анализ развития пластических деформаций при шаге свай $L = 2,0D$ – $4,5D$ в осях показал следующее:

1. При угле встречи $\alpha = 90^\circ$ оползневое давление практически равномерно воспринимают все сваи сооружения. При этом развиваются пластические деформации в виде лепе-

стков на краях сооружения, что говорит о процессе обтекания смещающимися породами вокруг сооружения.

2. При выдвигке свай в диапазоне $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ перед конструкцией увеличивается зона уплотнения грунта как выше сооружения, так и в стороны от него. При такой расстановке свай не происходит продавливания грунта между сваями, а только обтекание пород. Зоны пластических деформаций перед каждой сваей смыкаются в общее уплотненное грунтовое ядро. Такой результат показывает, что полезная работа сооружения повысилась за счет увеличения зоны влияния конструкции.

3. При выдвигке свай $30^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ происходит неравномерное нагружение сооружения. «Лепестковые» зоны пластических деформаций грунта развиваются перед каждой сваей индивидуально, а также происходит продавливание грунта между сваями. В этом случае максимальную нагрузку воспринимает средняя свая.

Рис. 8. «Пластические точки» Кулона–Мора (красные) и растяжения (черные), шаг свай $L = 3,5D$: a – угол встречи $\alpha = 60^\circ$; b – угол встречи $\alpha = 30^\circ$
Fig. 8. “Plastic points” of the Coulomb–Mora (red) and stretchings (black), step of piles $L = 3,5D$: a – meeting corner $\alpha = 60^\circ$; b – meeting corner $\alpha = 30^\circ$

При исследовании развития пластических деформаций перед сооружением при шаге свай $L = 5,0D$ – $6,5D$ при различных углах встречи α (от 90° до 30°) наблюдается индивидуальная работа каждой сваи. Происходят продавливание грунта между сваями и обтекание по сторонам сооружения одновременно. В этом случае каждая свая работает как отдельно стоящий элемент, т.е. сооружение не ограничивает движение оползневых масс. Таким образом, с изменением шага свай L и величины выдвигки H средней сваи в ряду (из трех) изменяется характер взаимодействия оползневого грунта с удерживающими сооружениями. При тесном шаге свай ($2,0D \leq L \leq 4,5D$) и угле встречи сооружения с вектором смещения оползневых масс $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ наблюдается наиболее эффективная работа свайно-грунтовой системы. При такой конфигурации сооружения обтекание происходит раньше продавливания грунта между сваями.

При редком расположении свай ($L \geq 5,0D$), а также при любом шаге свай с выдвигкой средней сваи до $\alpha < 45^\circ$ зоны пластических деформаций разрываются и приобретают локальный характер, преимущественно на фронтальной поверхности свай относительно приложенной оползневой нагрузки. Давление обтекания вокруг сооружения сопоставимо с давлением продавливания между сваями, в связи с тем что сваи работают как отдельно стоящие элементы. Наилучшим вариантом конструктивного решения противооползневого сооружения с точки зрения его обтекания, а также продавливания между сваями является тесное расположение свай в ряду до $L = 4,5D$ с углом встречи $\alpha \geq 45^\circ$ [6].

Исследование предельного оползневого давления до момента пластического разрушения грунта в связи с развитием обтекания вокруг сооружения показало следующее:

- изменение угла встречи α в пределах $90\text{--}45^\circ$ приводит к увеличению предельного оползневого давления, воспринимаемого сооружением;
- при угле встречи $30^\circ < \alpha < 45^\circ$ наблюдается понижение воспринимаемого оползневого давления, в связи с тем что сваи начинают работать как отдельно стоящие элементы.

Рис. 9. Распределение оползневого давления, приходящегося на сооружение, состоящее из трех свай, при $L/D = 3,5$ в зависимости от угла встречи α

Fig. 9. Distribution of the landslide pressure falling on a construction consisting of three piles at $L/D = 3,5$ depending on a meeting corner α

5. Предлагаемая оптимизированная методика расчета защитного сооружения на свайном основании, обтекаемого оползневыми глинистыми грунтами

Основными принципами проектирования свайных противооползневых сооружений инженерной защиты объектов являются:

- надежность конструкции;
- максимальная скорость возведения;
- экономическая эффективность;
- обеспечение безопасной эксплуатации защищаемого точечного объекта, в частности опор эстакад.

Основными проблемами строительства сооружений на оползневых и оползнеопасных территориях являются нестабильность грунтов при изменении уровня грунтовых вод [1, 6], а также пригрузка склона строительной техникой. Для защитных конструкций, отклоняющих смещение оползневых масс от объекта, должны быть обеспечены:

- общая устойчивость склона с учетом свайного сооружения;
- локальная устойчивость склона ниже защитного сооружения;
- техническая возможность подъезда строительной техники без нарушения устойчивости оползневого склона;
- прочность проектируемых свайных элементов.

В результате проведенных исследований и анализа нормативной литературы был разработан оптимизированный алгоритм расчета свайного обтекаемого сооружения, при-

веденный на рис. 10. Предельное давление обтекания $P_{\text{пред}}$ для глинистых пород, согласно проведенным исследованиям, рекомендуется определять по формуле

$$P_{\text{пред}} = 0,347 \cdot e^{c \cdot 0,0536} + 4,847 \cdot e^{c \cdot 0,06211} \cdot \frac{L}{D}, \quad (3)$$

где c – удельное сцепление грунта, кПа; e – число Эйлера, равное 2,7183...; L – шаг свайных элементов в ряду, м; D – ширина призматической или диаметр круглой сваи, м.

Рис. 10. Блок-схема расчета свайного защитного сооружения, обтекаемого глинистыми грунтами
Fig. 10. The flowchart of calculation of a pile protective construction around which clay soil flows

Оценку степени устойчивости рекомендуется выполнять минимум по двум расчетным сечениям. Оценку устойчивости склона следует выполнять как для общей поверхности скольжения (существующей и прогнозной), так и для локальной (для предотвращения отрыва грунта от защитного сооружения). С целью снижения давления обтекания защит-

ные сооружения следует устраивать под углом к вектору смещения оползневых грунтов или клином. Согласно результатам проведенных исследований можно сказать, что:

- оптимальный угол встречи вектора смещения оползневых масс с осью сооружения с точки зрения равномерного нагружения всех элементов варьируется в диапазоне $70^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ$;
- рекомендуемый угол встречи с точки зрения уменьшения действующего оползневого давления изменяется в пределах $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;
- не рекомендуется выполнять клин с углом встречи $\alpha < 45^\circ$.

6. Внедрение результатов проведенных исследований

Результаты исследований взаимодействия грунта с защитным сооружением с учетом шага свай были использованы при проектировании защитных сооружений на ответственных геотехнических объектах Краснодарского края по устройству мероприятий инженерной защиты (рис. 11) опор эстакады № 3 на объекте «Дублер Курортного проспекта».

Рис. 11. Обтекаемое защитное сооружение опоры № 46 («Дублер Курортного проспекта» в г. Сочи): а – оползневой склон до строительства эстакады; б – построенное защитное сооружение опоры

Fig. 11. Streamline protective construction of a support № 46 (“The Doubler of Kurortny avenue” in Sochi): а – landslide a slope before construction of a platform; б – the constructed protective construction of a support

По результатам выполненной работы были получены три акта внедрения данных исследований. Результаты исследований также были отражены в отраслевых дорожных документах ОДМ 218.2.050–2015 «Методические рекомендации по расчету и проектированию свайных противооползневых сооружений инженерной защиты автомобильных дорог» и ОДМ 218.2.033–2013 «Методические рекомендации по выполнению инженерно-геологических изысканий на оползневых склонах и откосах автомобильных дорог». По результатам технико-экономического сравнения вариантов защитных сооружений, запроектированных по предложенной методике с существующими решениями, экономический эффект составил 15,6 %.

Заключение

Методика расчета противооползневого свайного сооружения, предназначенного для защиты локальных объектов, является перспективной, так как учитывает обтекание конструкции грунтом. При учете эффекта обтекания (при перенаправлении движения оползня) давление, приходящееся на сооружение, значительно меньше, чем при полном ограничении движения оползня. Это приводит к повышению экономической эффективности.

Результаты численных экспериментов показали, что работа свайного обтекаемого сооружения совместно с грунтом обеспечена только при шаге свай $2,0D \leq L \leq 4,5D$ за счет образования уплотненного грунтового ядра выше по склону. При увеличении шага до $5,0D \leq L \leq 6,0D$ сваи работают как отдельно стоящие элементы.

При шаге свай $2,0D \leq L < 3,5D$ давление от оползневых масс распределяется неравномерно. Средняя свая (из трех) является наиболее нагруженной. При шаге свай $3,5D \leq L \leq 4,0D$ графики распределения давления на среднюю сваю и крайние пересекаются, что указывает на равномерное распределение давления в сооружении.

При шаге свай в ряду $L = 4,5D$ графики распределения давления на крайние и среднюю сваи расходятся (не пересекаются), что говорит о неравномерном нагружении сооружения.

При шаге свай $5,5D \leq L \leq 6,0D$ выявлено пересечение графиков распределения давления. Однако при исследовании развития пластических деформаций грунта установлено, что каждая свая работает обособленно (как отдельно стоящий элемент). Применять такую расстановку свай при проектировании противооползневых защитных обтекаемых сооружений не рекомендуется.

Характер распределения напряжений указывает на то, что при увеличении выдвиги H средней сваи на угол встречи $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ разница в давлении, приходящемся на среднюю и крайние сваи, увеличивается на 7–11 %. При изменении угла встречи $30^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ наблюдается уменьшение разницы давлений, приходящихся на среднюю и крайние сваи (из трех), на 7–9 %.

Согласно результатам расчетов оптимальным углом встречи является диапазон $70^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ$. При уменьшении угла встречи α наблюдается неравномерное нагружение сооружения (средняя свая более нагружена по сравнению с крайними). Максимальная разница между давлениями, приходящимися на среднюю и крайние сваи, выявлена при угле встречи $\alpha = 45^\circ$ и составляет 18–22 %.

Зависимости оптимального шага свай от удельного сцепления грунта c и угла внутреннего трения ϕ представлены в формулах в виде показательных функций $L/D = 2,1894 \cdot 1,0429^{\phi}$ и $L/D = 3,3569 \cdot 1,0066^c$.

Предельное давление обтекания $P_{\text{пред}}$ для глинистых пород рекомендуется определять по формуле $P_{\text{пред}} = 0,347 \cdot e^{c \cdot 0,0536} + 4,847 \cdot e^{c \cdot 0,06211} \cdot (L/D)$.

По результатам проведенных исследований разработана методика расчета и проектирования свайных обтекаемых защитных сооружений, располагаемых в глинистых грунтах на оползневых склонах. Результаты исследований отражены в отраслевых дорожных документах ОДМ 218.2.050–2015 и ОДМ 218.2.033–2013. По результатам выполненной работы получены акты внедрения результатов исследований при проектировании противооползневой защиты на ответственных объектах Краснодарского края.

Предлагаемая методика расчета и проектирования свайных фундаментов защитных сооружений отдельно стоящих объектов позволяет проектировать экономически целесообразные конструкции.

Библиографический список

1. Лейер Д.В., Маций С.И. Исследование взаимодействия оползневого грунта с защитными сооружениями опор эстакад // Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 49–53.
2. Шадунц К.Ш. Оползни-потоки. – М.: Недра, 1983. – 120 с.
3. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1979. – 81 с.
4. Билеуш А.И. Оползни и противооползневые мероприятия. – Киев: Наукова думка, 2009.
5. Лейер Д.В. Оптимизация методики расчета защитного сооружения на свайном основании, «обтекаемого» оползневыми глинистыми грунтами [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электрон. науч. журнал Кубан. гос. аграр. ун-та. – 2016. – № 5 (119). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/83.pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
6. Лейер Д.В. Маций С.И., Кужель В.Н. Опоры эстакад, обтекаемые оползневыми массами // Материалы V Междунар. конф. по геотехнике / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2010. – С. 228–234.
7. Недря Г.Д. Фундаменты, обтекаемые оползневыми массами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1988.
8. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства: учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1977.
9. Маций С.И., Деревенец Ф.Н. Применение метода конечных элементов для исследования взаимодействия грунтов оползня со сваями // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – № 4. – С. 8–12.
10. Маций С.И. Взаимодействие свайных рядов с грунтом оползней: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1991.
11. Viggiani C. Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides // Soil. Mech. and Found. Eng., Proc. 10 Int. Conf., Stockholm, 15–19 June, 1981. – Rotterdam, 1981. – Vol. 3. – P. 555–560.
12. Adashi T., Kimura M., Tada S. Model tests on the preventive mechanism of landslide stabilizing piles // Proc. JSCE. – 1988. – № 400. – P. 243–252.
13. Ito T., Matsui T., Hong W.P. Design method for stabilizing piles against landslide – one row of piles // Soils and Foundations. – 1981. – Vol. 21, № 1. – P. 21–37.

14. Ito T., Matsui T. Methods to estimate lateral force action on stabilizing piles // *Soils and foundations*. – 1975. – Vol. 15, № 4. – P. 43–59.
15. Poulos H.G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement // *Journal SMFD, ASCE*. – 1973. – Vol. 99, № SM 5. – P. 391–406.
16. Причины активизации оползня на федеральной автомобильной дороге г. Сочи и мероприятия по его стабилизации / А.Н. Богомолов [и др.] // *Вестник Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*. – 2012. – № 29 (48). – С. 6–14.
17. Рябухин А.К., Маций С.И., Безуглова Е.В. Исследование диапазона допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай противооползневых сооружений // *Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та*. – 2013. – № 41. – С. 160–163.
18. Рябухин А.К., Маций С.И., Безуглова Е.В. Исследование диапазона допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай противооползневых сооружений // *Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 279–283.
19. Стабилизация оползня на участке строительства железной дороги в г. Сочи / А.Н. Богомолов [и др.] // *Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*. – 2012. – № 29 (48). – С. 15–25.
20. Steiakakis C., Agioutantis Z., Apostolou E. Slope stability evaluation of stiff fissured clays and shales for different failure conditions // *Engineering Geology for Society and Territory*. – 2015. – Vol. 2. – P. 1507–1511.
21. Wang Y.-Z. Distribution of earth pressure on retaining wall // *Geotechnique*. – 2000. – Vol. 50, № 1. – P. 83–88.
22. Winter H., Schwarz W., Gudehus G. Stabilization of clay slopes by piles // *Impruv. Ground. Proc. 8 Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 23–26 May, 1983*. – Rotterdam, 1983. – Vol. 2. – P. 545–550.
23. Исследование взаимодействия глинистых грунтов с противооползневыми сооружениями инженерной защиты опор эстакад [Электронный ресурс] / С.И. Маций [и др.] // *Наукоедение*. – 2014. – Вып. 5 (24). – URL: <http://naukovedenie.ru> (дата обращения: 13.04.2016).
24. Analysis of the portalet landslide using finite element method / G. Bru, J.A. Fernández-Merodo, J.C. García-Davalillo, G. Herrera // *Engineering Geology for Society and Territory*. – 2015. – Vol. 2. – P. 1519–1524.
25. Клименко В.И., Безруков В.Ф. Количественная оценка сложности инженерно-геологических условий Черноморского побережья Кавказа: метод. рекомендации / Адлерская гидрогеологическая лаборатория ПНИИИС Госстроя СССР. – Сочи, 1978.

References

1. Leier D.V., Matsii S.I. Issledovanie vzaimodeistviia opolzneвого grunta s zashchitnymi sooruzheniiami opor estakad [Research of the interaction between landslide soil with protective structures of the supports of the overpasses]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 49–53.
2. Shadunts K.Sh. Opolzni-potoki [Landslides-flows]. Moscow: Nedra, 1983. 120 p.
3. Ginzburg L.K. Protivoopolznevyie uderzhivaiushchie konstruktsii [Landslide retaining structures]. Moscow, 1979. 81 p.
4. Bileush A.I. Opolzni i protivoopolznevyie meropriiatiia [Landslides and landslide events]. Kiev, 2009.

5. Leier D.V. Optimizatsiia metodiki rascheta zashchitnogo sooruzheniia na svainom osnovanii, "obtekaemogo" opolznevyimi glinistymi gruntami [Optimization of methods of calculation of protective structures on pile foundation, "streamlined" landslide clay soils]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016. no. 5 (119), available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/83.pdf> (accessed 10 March 2016).
6. Leier D.V. Matsii S.I., Kuzhel' V.N. Opory estakad, obtekaemye opolznevyimi massami [Trestle supports, streamlined landslide masses]. *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii po geotekhnike*. Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2010, pp. 228-234.
7. Nedria G.D. Fundamenty, obtekaemye opolznevyimi massami [Foundations, streamlined the landslide masses]. Kiev, 1988.
8. Maslov N.N. Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva [Soil mechanics in construction]. Moscow: Stroiizdat, 1977.
9. Matsii S.I., Derevenets F.N. Primenenie metoda konechnykh elementov dlia issledovaniia vzaimodeistviia gruntov opolznia so svaiami [Application of the finite element method to study the interaction of soil landslide with piles]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2005, no. 4, pp. 8-12.
10. Matsii S.I. Vzaimodeistvie svainykh riadov s gruntom opolznei [The interaction between the pile rows with soil landslides]. Saint Petersburg, 1991.
11. Viggiani C. Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides. *Soil. Mech. And Found. Eng., Proc. 10 Int. Conf., Stockholm*, 15-19 June, 1981. Rotterdam, 1981, vol. 3, pp. 555-560.
12. Adashi T., Kimura M., Tada S. Model tests on the preventive mechanism of landslide stabilizing piles. *Proc. JSCE*, 1988, no. 400, pp. 243-252.
13. Ito T., Matsui T., Hong W.P. Design method for stabilizing piles against landslide – one row of piles. *Soils and Foundations*, 1981, vol. 21, no. 1, pp. 21-37.
14. Ito T., Matsui T. Methods to estimate lateral force action on stabilizing piles. *Soils and foundations*, 1975, vol. 15, no. 4, pp. 43-59.
15. Poulos H.G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement. *Journal SMFD, ASCE*, 1973, vol. 99, no. SM 5, pp. 391-406.
16. Bogomolov A.N. [et al.]. Prichiny aktivizatsii opolznia na federal'noi avtomobil'noi doroge goroda Sochi i meropriiatiia po ego stabilizatsii [The reasons of activation of the landslide at the Federal highway Sochi and measures for its stabilization]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 29 (48), pp. 6-14.
17. Riabukhin A.K., Matsii S.I., Bezuglova E.V. Issledovanie diapazona dopustimykh gorizonta'nykh peremeshchenii buronabivnykh svai protivopolznevykh sooruzhenii [Research of the range of valid horizontal displacements of bored piles against landslide constructions]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 41, pp. 160-163.
18. Riabukhin A.K., Matsii S.I., Bezuglova E.V. Issledovanie diapazona dopustimykh gorizonta'nykh peremeshchenii buronabivnykh svai protivopolznevykh sooruzhenii [Research of the range of valid horizontal displacements of bored piles against landslide constructions]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 31-2 (50), pp. 279-283.

19. Bogomolov A.N. [et al.]. Stabilizatsiia opolznia na uchastke stroitel'stva zheleznoi dorogi v gorode Sochi [Stabilization of landslide at the construction of the railway in Sochi]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 29 (48), pp. 15-25.
20. Steiakakis C., Agioutantis Z., Apostolou E. Slope stability evaluation of stiff fissured clays and shales for different failure conditions. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, vol. 2, pp. 1507-1511.
21. Wang Y.-Z. Distribution of earth pressure on retaining wall. *Geotechnique*, 2000, vol. 50, no. 1, pp. 83-88.
22. Winter H., Schwarz W., Gudehus G. Stabilization of clay slopes by piles. *Impruv. Ground. Proc. 8 Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki*, 23-26 May, 1983. Rotterdam, 1983, vol. 2, pp. 545-550.
23. Matsii S.I. [et al.]. Issledovanie vzaimodeistviia glinistyykh gruntov s protivopopolznevymi sooruzheniyami inzhenernoi zashchity opor estakad [Research of interaction between clay soils and landslide facilities of engineering protection of the supports of the overpasses]. *Naukovedenie*, 2014, iss. 5 (24), available at: <http://naukovedenie.ru> (accessed 13 April 2016).
24. Bru G., Fernández-Merodo J.A., García-Davalillo J.C., Herrera G. Analysis of the portalet landslide using finite element method. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, vol. 2, pp. 1519-1524.
25. Klimenko V.I., Bezrukov V.F. Kolichestvennaia otsenka slozhnosti inzhenerno-geologicheskikh uslovii Chernomorskogo poberezh'ia Kavkaza [Quantitative evaluation of complexity of engineering-geological conditions of the black sea coast of the Caucasus]. Sochi, 1978.