

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВОСХОДЯЩЕЙ АНКЕРНОЙ КРЕПИ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДЕНИЙ СТЕН ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

ВИКУЛОВ В. М.¹

¹ Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Цель работы. В контексте развития конструкций анкерной крепи обоснование и доказательство целесообразности применения конструкции восходящих анкеров, рациональность применения которых обусловлена в первую очередь ликвидацией сложных трудоемких процессов по устройству инъекционных анкеров с использованием тяжелого ручного труда.

Актуальность исследований. Повышение устойчивости и несущей способности ограждения, постоянный визуальный контроль состояния узлов крепления каждого анкера, извлекаемость анкерных тяг и неоднократное их использование обеспечивают развитие более эффективных безопасных и высокотехнологичных производственных процессов при возведении городских подземных сооружений открытым способом.

Методические основы исследований. Основополагающим принципом анализа многоярусной восходящей анкерной крепи котлована является построение расчета ограждающей системы. Он основан на численном решении задачи изгиба балки, заземленной одним концом в упруго-пластическом грунте и удерживаемой связями (анкерами), а интенсивность давления нижних концов свай на грунт оценивается с учетом линейно изменяющегося коэффициента постели по глубине заделки. В качестве конструктивных элементов анкерной крепи котлованов исследуются два типа анкеров: активные, или предварительно напрягаемые, с натяжением примерно 30 % и более от расчетной нагрузки, и пассивные, с определенным уровнем натяжения, обеспечивающим центрирование анкера.

Результаты. В процессе исследований устанавливается зависимость угла подъема восходящего анкера от угла внутреннего трения соответствующего слоя грунта, реализуемая в условиях активного усиления свайного ряда, исключая формирование сдвигающих сил на поверхности скольжения призмы обрушения, предотвращающего необратимые деформации ограждений и осадки сооружений, находящихся в непосредственной близости от котлованов.

Ключевые слова: анкерная крепь; конструкция восходящего анкера; активные и пассивные анкеры; ограждающая система; призма обрушения; оптимальное значение угла подъема восходящего анкера.

Цель работы – обоснование эффективности и целесообразности применения восходящей конструкции анкеров, достижения оптимального угла подъема анкерной тяги, при котором значение угла встречи анкера с поверхностью скольжения исключает формирование сдвигающих сил на поверхности скольжения призмы обрушения и предотвращает необратимые деформации ограждающих конструкций котлованов при строительстве городских подземных сооружений.

Актуальность работы. Для повышения эффективности удержания борта котлована в условиях плотной городской застройки, снижения материалоемкости, трудоемкости, стоимости работ по устройству грунтовых анкеров и обеспечения достоверности контроля технического состояния анкерной крепи, предусматривающего возможность своевременного реагирования в период упреждения аварийных ситуаций [1–3], предлагается использовать конструкцию восходящих анкерных тяг. В состав восходящего анкера входят: тяга, оголовок, закрепленный на ограждающей конструкции; узел заделки, располагаемый на поверхности бермы котло-

вана и за пределами возможной призмы обрушения. Особенностью технологии является применение фибerglassовых лент в качестве анкерной тяги [4], размеры сечения и количество которых зависят от величины востребованной несущей способности анкера. При установке восходящих анкерных тяг необходимо предусмотреть особенности монтажа анкеров. Для этого за пределами призмы обрушения грунта с поверхности земли выполняется бурение наклонных скважин, а в случае застройки верхней бермы – искривленных скважин под гибкие анкеры. В пробуренные скважины устанавливаются анкерные тяги – скрепленные хомутами фибerglassовые ленты в количестве 1–3 шт. (в зависимости от требуемой нагрузки). Концы тяг, выходящие на верхнюю берму, закрепляются непосредственно на опорной железобетонной подушке, расположенной на откосе выемки. Для фиксации анкерных тяг используются полусферические шайбы (головки) с запорными клиньями, стальные опорные плиты и при необходимости могут использоваться клиновидные прокладки в соответствии с углом наклона анкера (рис. 1).

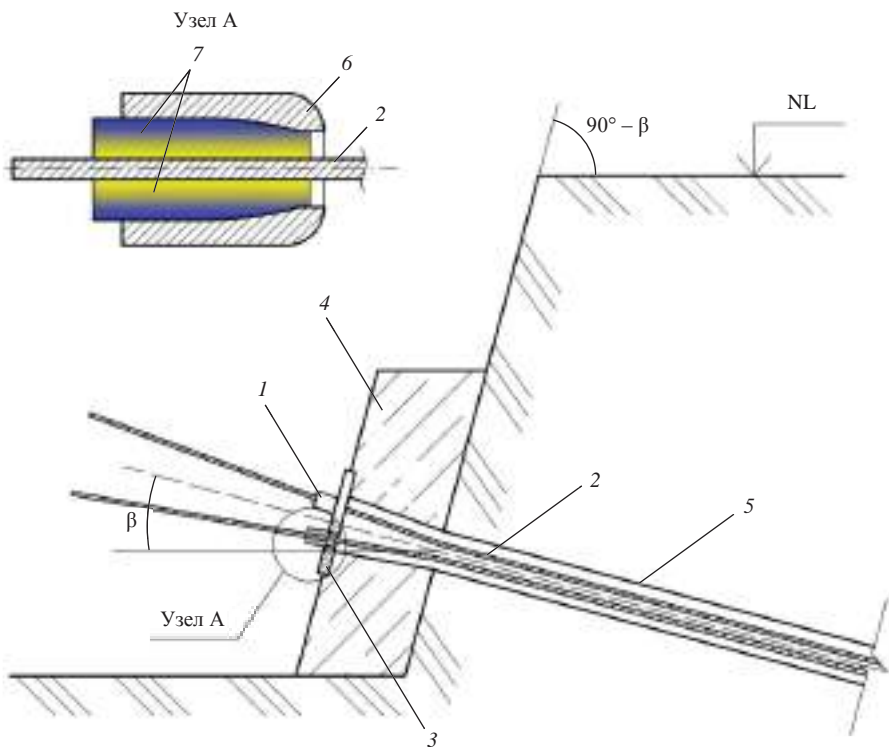


Рис. 1. Конструктивная схема опорного узла крепления восходящего анкера:
1 – зажимная головка; 2 – анкерная тяга; 3 – опорная стальная плита; 4 – железобетонная подушка;
5 – стеклопластиковая обсадная трубка; 6 – полусферическая шайба; 7 – запорные конические клинья

Fig.1. Structural scheme of a supporting node of an ascending anchor support:
1 – clamping head; 2 – anchor bar; 3 – bearing steel plate; 4 – reinforced concrete layer; 5 – fiberglass casing tube; 6 – semispherical washer; 7 – locking conical wedges

Таким образом, тяга анкера через полусферическую зажимную шайбу передает усилие на опорную стальную плиту, которая распределяет передаваемое усилие по железобетонной подушке.

Конструкция нижних оголовков восходящих анкеров определяется конструкцией ограждения стен котлована. При наличии свайных ограждений тяги анкеров из фибerglassовых лент подвергаются натяжению и закрепляются на распределительных поясах с помощью опорных плит, полусферических шайб и запорных клиньев.

Технология восходящего способа установки анкеров имеет благоприятное развитие благодаря уникальным свойствам фибергласса, предлагаемого в качестве материала анкерных тяг:

- небольшой вес при плотности материала, составляющей $1,9 \text{ г/см}^3$, существенно облегчает монтаж анкерной тяги, перенос анкера по строительной площадке и его установку в скважину;
- экономичная материалоемкость анкерной крепи за счет уменьшения потребности в стальных анкерах, подкосах, распорках (расстрелах);
- фиберглассовые ленты поставляются в бухтах по 100 м, что позволяет устанавливать тяги анкеров любой длины без выполнения различного вида соединений, таких как соединительные муфты или сварные швы;
- высокая коррозионная стойкость фиберглассовых тяг позволяет применять их даже в особенно агрессивных средах.

Следует заметить, что исследуемая конструкция восходящих анкеров [3] в определенной степени снимает проблемы, возникающие при устройстве грунтовых анкеров, связанные с отсутствием гарантированных данных о геологическом строении и свойствах грунтов в зоне корневой части анкера и скрытым характером работ по его возведению [5–7]. В то же время применение восходящей (бес-

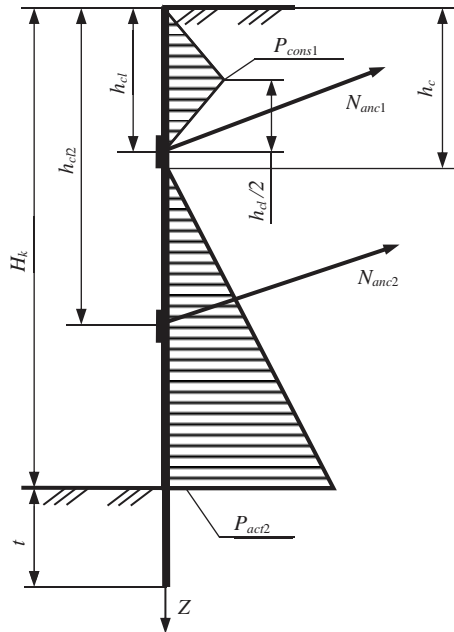


Рис. 2. Расчетная схема свайно-анкерного ограждения котлована при $h_{cl} < h_c$
Fig. 2. Computational scheme of a foundation pit pile-anchor barrier under $h_{cl} < h_c$

корневой) конструкции анкеров исключает необходимость геологических изысканий вне границ площадки строительства.

Простота и высокая надежность статической работы и технологичность установки, обеспеченная постоянным визуальным контролем состояния узлов крепления и зацепления каждого анкера, позволяют восходящей анкерной конструкции найти достаточно широкую сферу применения в качестве безусловно извлекаемой анкерной крепи [8, 9].

В качестве усиливающих элементов крепи котлованов применяются два типа анкеров: *активные*, предварительно натягаемые с натяжением примерно 30 % и более от расчетной нагрузки, и *пассивные*, с определенным уровнем натяжения, обеспечивающим центрирование анкера и выборку ослаблений.

Методика исследований. Геотехнологический анализ надежности параметров восходящей анкерной крепи базируется на методических рекомендациях ЦНИИС [10] и на методических положениях

разработанных на кафедре шахтного строительства УГГУ [11]. Особенности расчета связаны с необходимостью определения ординат активного давления грунта на уровнях каждого яруса анкерной крепи и вычисления усилий в пассивных и активных анкерах (рис. 2).

Основополагающие принципы анализа многоярусной восстающей анкерной крепи котлована представлены в обобщенной форме:

- расчет ограждающей системы в интервале от поверхности грунта до дна котлована реализуется методами строительной механики, основанными на чис-

ленном решении задачи изгиба балки, защемленной одним концом в упруго-пластическом грунте и удерживаемой связями (анкерами);

– изгибающие моменты в сечениях свай ниже уровня дна котлована, а также интенсивность давления нижних концов свай на грунт оцениваются с учетом линейно изменяющегося коэффициента постели по глубине заделки.

Вычисление изгибающих моментов и поперечных сил по высоте сваи от поверхности грунта до уровня первого яруса анкеров h_{cl} выполняется по далее приведенным формулам в соответствии с расчетной схемой (рис. 2).

На участке от нуля до $h_{cl}/2$:

$$Q = -\frac{P_{cons1}Ly^2}{h_{cl}}; \quad M = -\frac{P_{cons1}Ly^3}{3h_{cl}}, \quad (1)$$

где P_{cons1} – ордината расчетного активного давления грунта на глубине $h_{cl}/2$ от верха котлована; L – пролет закладного крепления; y – координата сечения, отсчитываемая по высоте сваи от дна котлована H_k до 0 с шагом 0,1–0,2 м; h_{cl} – высота консольного участка сваи.

На участке от $h_{cl}/2$ до h_{cl} :

$$Q = -P_{cons1}Lh_{cl} \left[0,25 + \left(\frac{y}{h_{cl}} - 0,5 \right) - \left(\frac{y}{h_{cl}} - 0,5 \right)^2 \right];$$

$$M = -0,25P_{cons1}Lh_{cl} \left[0,25 + \left(\frac{y}{h_{cl}} - 0,333 \right) + \left(\frac{y}{h_{cl}} - 0,5 \right)^2 - 4/3 \left(\frac{y}{h_{cl}} - 0,5 \right)^3 \right]. \quad (2)$$

Расчет участка заделки сваи t ниже дна котлована выполняется согласно рекомендациям ЦНИИС [10]. Основные параметры крепи котлована (рис. 3), подлежащие геотехнологическому анализу:

- глубина заделки (погружения) сваи t , м;
- расстояние между сваями и шаг анкеров, м;
- высота яруса (высота расположения обвязочного пояса относительно верхней бровки котлована), м;
- геометрические размеры сечений свай, анкеров и обвязочных поясов крепи котлована.

Существуют определенные особенности вычисления усилий в анкерах и ординат активного давления в уровнях установки анкеров на ограждении, которые согласно расчетным схемам (рис. 3) отражаются в следующем.

Эпюра изгибающих моментов ниже дна котлована формируется по формуле:

$$M = \alpha^2 EJ u'' = \alpha^2 EJ [c_1 f_1''(\xi) + c_2 f_2''(\xi) + c_3 f_3''(\xi) + c_4 f_4''(\xi)].$$

Проверка прочности сваи на действие изгибающего момента в наиболее критическом сечении M_{\max}/W :

$$\sigma_t = \frac{M_{\max}}{W} \leq R_{\text{изгиба}},$$

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент, определяемый по эпюре изгибающих моментов; W – осевой момент сопротивления.

В условиях двухъярусного анкерного нагружения, усилия в пассивных анкерах T_{anc1} , T_{anc2} определяются по формулам:

$$T_{anc1} = [1,1LP_{act1}((h_{cl} - h_c) + 0,5(h_{cl2} - h_{cl}))] / \cos(\omega);$$

$$T_{anc2} [1,1LP_{act2}(0,5(h_{cl2} - h_{cl}) + 0,5(H_k - h_{cl2}))] / \cos(\omega),$$

где h_c – высота незагруженного участка сваи.

Ординаты активного давления грунтов в уровнях первого и второго ярусов анкеров P_{act1} , P_{act2} :

$$P_{act1} = k_n h_{cl} \gamma \lambda_{act} - P_c^n;$$

$$P_{act2} = k_n h_{cl2} \gamma \lambda_{act} - P_c^n,$$

где k_n – коэффициент надежности по нагрузке; P_c^n – нормативная величина уменьшения активного давления за счет сцепления грунта; λ_{act} – коэффициент активного давления; h_{cl} , h_{cl2} – уровни установки первого и второго яруса анкеров; γ – удельный вес грунта.

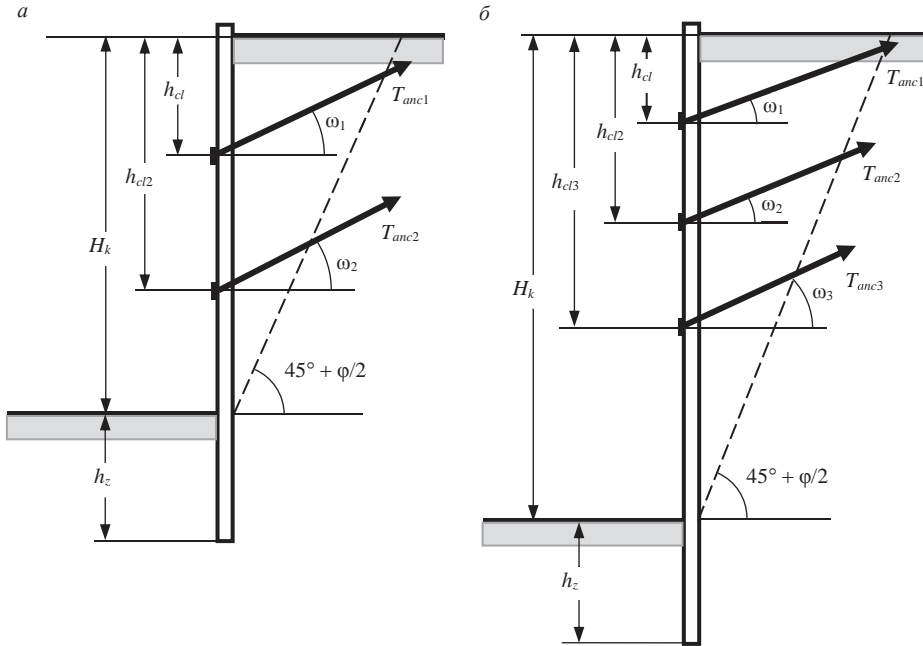


Рис. 3. Конструктивные схемы свайно-анкерных ограждений:
 а – с двумя ярусами восходящих анкеров; б – с тремя ярусами восходящих анкеров
 Fig. 3. Structural schemes of a foundation pit pile-anchor barriers:
 а – with two layers of ascending anchors; б – with three layers of ascending anchors

Усилия пассивных анкеров в горизонтальных проекциях R_1 , R_2 :
 $R_1 = T_{anc1} \cos(\omega)$; $R_2 = T_{anc2} \cos(\omega)$, где ω – угол наклона анкеров относительно горизонтали.

Следует заметить, что ненапрягаемые анкеры не позволяют предотвратить разуплотнение грунта вокруг котлована по причине некоторой податливости и деформируемости конструкций ограждений всех известных видов [12].

Тогда как полученные в результате коррекции первичных значений R_1 , R_2 , R_3 активированные усилия $R_{1к}$, $R_{2к}$, $R_{3к}$, реализованные в условиях активного усиления

ния свайного ряда, предотвращают необратимые деформации ограждений и осадку сооружений, находящихся вблизи котлованов. Между тем в условиях пассивного усиления свай активированные усилия $R_{1к}, R_{2к}, R_{3к}$ не будут реализованы и не гарантируют безопасную эксплуатацию ограждающей конструкции. Усилия натяжения предварительно напрягаемых (активных) анкеров (рис. 4) создают дополнительные удерживающие силы для призмы обрушения, компенсируя действие сдвигающих сил. Для оценки устойчивости призмы обрушения вводится коэффициент запаса устойчивости призмы обрушения k_s , вычисляемый по формуле:

$$k_s = (Y_\varphi + Y_c + P_d) / Y_t, \quad (3)$$

где k_s – коэффициент запаса устойчивости призмы обрушения; Y_φ – удерживающие силы трения, $Y_\varphi = V \cos(45^\circ + 0,5\varphi) \operatorname{tg}\varphi$; Y_c – удерживающие силы сцепления, $Y_c = H_k c / \cos(45^\circ - 0,5\varphi)$; P_d – дополнительные удерживающие силы, возникающие за счет действия активных анкеров,

$$P_d = n_{sk} L Y_t - Y_\varphi - Y_c,$$

где n_{sk} – коэффициент запаса на сдвиг призмы обрушения по поверхности скольжения; L – шаг свай; Y_t – сдвигающие силы, образующиеся от веса возможной призмы обрушения (рис. 4),

$$Y_t = V \sin(45^\circ + 0,5\varphi),$$

где V – вес призмы обрушения, $V = 0,5L\gamma H_k^2 \operatorname{tg}(45^\circ - 0,5\varphi)$.

Удерживающее усилие одного анкера $N_{anc} = P_d / n$, где n – число анкеров.

Усилия натяжения от одного анкера $T_{anc} = N_{anc} (\sin\delta \operatorname{tg}\varphi + \cos\delta)^{-1}$, где δ – угол встречи анкера с поверхностью скольжения,

$$\delta = 45^\circ + 0,5\varphi - \omega, \quad (4)$$

здесь ω – угол склонения анкера относительно горизонтали.

Наиболее эффективное значение угла δ достигается решением уравнения:

$$\partial(T_{anc}) / \partial\delta = \cos\delta \operatorname{tg}\varphi - \sin\delta = 0. \quad (5)$$

Отсюда следует, что оптимальным значением угла наклона анкера по отношению к поверхности скольжения является величина угла внутреннего трения соответствующего слоя грунта, как видно из уравнения:

$$\delta_{\text{опт}} = \varphi. \quad (6)$$

Следует отметить, что при наиболее распространенном интервале значений угла внутреннего трения $\varphi = 15^\circ - 40^\circ$ обеспечивается целесообразность установки восходящей анкерной конструкции, при которой значение угла встречи активного анкера с поверхностью скольжения обеспечивает снижение величин сдвигающих сил на поверхности скольжения призмы обрушения.

Таким образом, исходя из условия обеспечения наиболее эффективного значения угла встречи анкера с поверхностью скольжения (6) и преобразуя уравнение (4), устанавливаем оптимальное значение угла подъема восходящего анкера:

$$\omega_{\text{опт}} = (45^\circ + 0,5\varphi) - \varphi = (45^\circ - 0,5\varphi).$$

Результаты исследований. Анализ свайной крепи с двумя ярусами восходящих анкеров реализуется в прикладной программе инженерно-аналитического моделирования, предусматривающей вариативное проектирование геотехнологической ситуации на основе традиционных детерминированных решений. В результате многократного использования программы моделирования для различных геологических условий получены графики зависимости коэффициентов запаса на сдвиг от угла внутреннего трения (рис. 4).

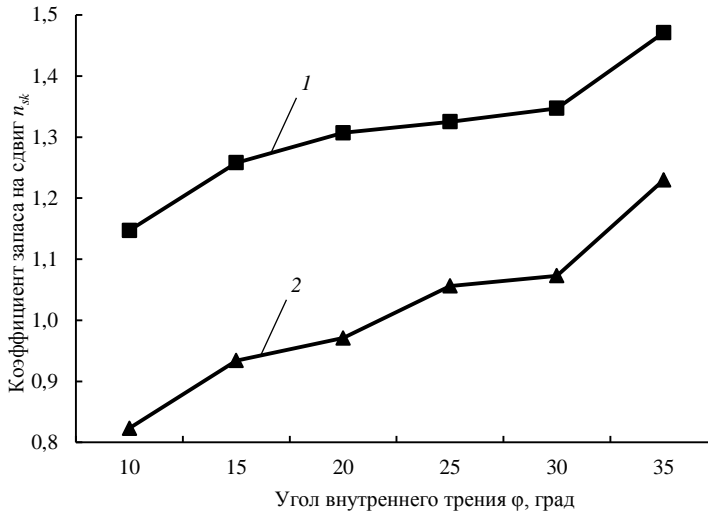


Рис. 4. Графики зависимости коэффициентов запаса на сдвиг призм обрушения по поверхностям скольжения от переменных значений угла внутреннего трения при удельном сцеплении грунта $c = 20^\circ$:

1 – для конструкций восходящих анкеров; 2 – для традиционных конструкций грунтовых нисходящих анкеров

Fig. 4. Dependency diagrams of the factors of safety for the shear of sliding triangles along the slipping surfaces and the variables of internal friction angle under specific cohesion $c = 20^\circ$:

1 – for ascending anchor structures; 2 – for traditional structures of underground descending anchors

Выводы. Результаты расчетов демонстрируют повышенные значения коэффициентов запаса на сдвиг призм обрушения для конструкций восходящих анкеров.

Таким образом, опираясь на материалы проведенных исследований, сформулировано следующее положение: оптимальное значение угла подъема восходящего анкера относительно горизонта находится в прямой зависимости от угла внутреннего трения соответствующего массива грунта и определяется зависимостью $\omega_{\text{опт}} = (45^\circ - 0,5\varphi)$.

Приведенная зависимость реализуется в условиях активного усиления свайного ряда, исключаяющего формирование сдвигающих сил на поверхности скольжения призм обрушения и предотвращающего необратимые деформации ограждений и осадку сооружений, находящихся в непосредственной близости от котлованов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петрухин В. П., Колыбин И. В., Разводовский Д. Е. Ограждение конструкций котлованов, методы строительства подземных сооружений. М.: НИИОСП, 2012. 17 с.
2. Колыбин И. В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях. М.: НИИОСП, 2012. 72 с.
3. Emblemvag J., Kjolstag L. E. Qualitative risk analysis: some problems and remedies. Management and remedies. Management Decision. 2006. Vol. 44. No. 3. P. 395–406.

4. Малинин А. Г., Малинин Д. А. Применение фиберглассовых анкеров в подземном строительстве. М.: ИнжПроектСтрой, 2016. 8 с.
5. Маковский Л. В., Сула Н. А. Строительство автодорожных и городских тоннелей: уч. пособие. М.: РИОР; ИНФРА-М, 2014. 397 с.
6. Маковский Л. В., Сула Н. А. Расчет крепи котлованов при строительстве подземных сооружений фиберглассовых анкеров в подземном строительстве: уч. пособие. М.: МАДИ, 2011. 88 с.
7. Taghavi S., Miranda E. Seismic performance and loss assessment of nonstructural building components // Proceedings of 7th National Conference on Earthquake Engineering, Boston, 2002.
8. Викулов В. М., Корнилков М. В., Зотеев О. В. Повышение эффективности конструкций анкерной крепи котлованов при строительстве подземных сооружений // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 1. С. 62–70.
9. Викулов В. М., Корнилков М. В., Половов Б. Д. Оценка геотехнических рисков при проектировании анкерной крепи котлована // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 33–40.
10. Методические рекомендации по проектированию свайной крепи в котлованах метрополитенов. М.: ЦНИИС, 1986. 87 с.
11. Половов Б. Д., Корнилков М. В. Геомеханическое обеспечение шахтного и подземного строительства: электронный учебник. Екатеринбург: УГГУ, 2017. 998 с.
12. Lampros Koutas Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP Conference Paper. June, 2012. P. 168.

Поступила в редакцию 11 мая 2018 года

Викулов В. М. Обоснование эффективности конструкций восходящей анкерной крепи и оценка устойчивости ограждений стен глубоких котлованов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 28–36.

Сведения об авторах:

Викулов Владимир Михайлович – старший преподаватель кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: zmk_osad@mail.ru

SUBSTANTIATION OF ASCENDING ANCHOR SUPPORT EFFECTIVENESS AND THE ESTIMATION OF DEEP FOUNDATION PIT WALL BARRIERS STABILITY

Vikulov V. M.¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Research aim. Within the context of developing anchor support structure, substantiation and justification of ascending anchors application which applying rationality is conditioned firstly on the elimination of complex laborious processes on the arrangement of injection anchors with the use of hard manual labour.

Research relevance. Increase in the stability and bearing capacity of barriers, constant visual control over the state of attachment points of every anchor, anchor ties recoverability and their multiple use will ensure the development of more effective secure and high-technology industrial processes under urban underground opencast construction.

Methodological fundamentals of the research. Basic analysis principle of multi-layer ascending anchor support of a foundation pit is the creation of enclosing structure calculation. It is based on the numerical solution of the problem of a beam bending, one of the ends of which is fixed in elastoplastic soil and held by contacts (anchors), when the intensity of the lower poles ends pressure on the ground is estimated with the account of linearly changing modulus of subgrade reaction in depth of fixing. In the quality of foundation pits anchor support structural elements, two types of anchors are examined: active, or preliminary tensioned about 30% and more from the designed load, and passive, with definite level of tension ensuring anchor centering.

Results. In the course of research, dependence is set between ascending anchor ascent angle and the internal friction angle of a corresponding soil layer actualized in the conditions of active strengthening of a pile row excluding the formation of shearing forces on the sliding triangle slipping surface preventing from irreversible deformations of barriers in the immediate vicinity of foundation pits.

Key words: anchor support; ascending anchor structure; active and passive anchors; enclosing structure; sliding triangle; optimum value of an ascending anchor ascent angle.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-28-36

REFERENCES

1. Petrukhin V. P., Kolybin I. V., Razvodovskii D. E. [Enclosing foundation pit structures, underground structures construction methods]. Moscow, NIIOSP Publ., 2012. 17 p.
2. Kolybin I. V. [Emergency lessons at the construction of foundation pits within the urban conditions]. Moscow, NIIOSP Publ., 2012. 72 p.

3. Emblemsvag J., Kjolstag L. E. Qualitative risk analysis: some problems and remedies. *Management and Remedies. Management Decision*, 2006, vol. 44, no. 3, pp. 395–406.
4. Malinin A. G., Malinin D. A. [The use of fiberglass anchors in underground construction]. Moscow, InzhProektStroi Publ., 2016. 8 p.
5. Makovskii L. V., Sula N. A. [School book "Construction of highway tunnels and urban tunnels"]. Moscow, RIOR; INFRA-M Publ., 2014. 397 p.
6. Makovskii L. V., Sula N. A. [School book "Foundation pit support calculation under the construction of underground structures of fiberglass anchors in underground construction"]. Moscow, MADI Publ., 2011. 88 p.
7. Taghavi S., Miranda E. Seismic performance and loss assessment of nonstructural building components. Proceedings of 7th National Conference on Earthquake Engineering, Boston, 2002.
8. Vikulov V. M., Kornilkov M. V., Zoteev O. V. [Foundation pit anchor support design efficiency improvement under the construction of subsoil constructions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 1, pp. 62–70. (In Russ.)
9. Vikulov V. M., Kornilkov M. V., Polovov B. D. [Estimation of geotechnical risks when designing anchor support of a foundation ditch]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 4, pp. 33–40. (In Russ.)
10. Methodological recommendations on the design of a pile support in foundation pits of metropolitan railways. Moscow, TSNIIS Publ., 1986. 87 p. (In Russ.)
11. Polovov B. D., Kornilkov M. V. [Geomechanical supply of shaft and underground construction]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2017. 998 p.
12. Lampros Koutas Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP Conference Paper. June. 2012. p. 168.

Information about authors

Vikulov Vladimir Mikhailovich – senior lecturer of the Department of Mine Construction, Ural State Mining University. E-mail: zmk_osad@mail.ru
