

Оптимизация способа заложения анкерной крепи при строительстве сложных подземных сооружений в условиях приближения городской застройки

Викулов В. М.^{1*}, Волков М. Н.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: zmk_osad@mail.ru

Реферат

Введение. Рассматривается строительство подпорного сооружения котлована в условиях значительного перепада высот. В качестве хорошо известного анкерного усиления ограждения используется многоярусная система прядевых анкеров. Вместе с тем для оценки несущей способности восходящей анкерной крепи и с целью повышения эффективности усиления подпорных сооружений с большим перепадом высот применяется комбинированный подход к формированию многоярусной анкерной крепи.

Методика исследования. При моделировании комплексного расчета ограждения котлована задано 5 основных этапов устройства котлована и 4 этапа предварительных ярусных натяжений анкерных тяг. Методической основой расчета на прочность ограждающих конструкций служит численное решение задачи изгиба балки, лежащей на упруго-пластическом основании и удерживаемой анкерными конструкциями в качестве связей. Моделирование восходящей анкерной конструкции реализуется в операционной среде программы GeoWall. На основе оптимизации способа заложения анкерной крепи предусматривается включение в работу системы восходящих анкеров, заменяющих грунтовые анкеры на первых двух ярусах конструктивного усиления подпорного сооружения. Необходимость включения в работу грунтовых прядевых анкеров на третьем и четвертом ярусах вызвана приближением к котловану зданий и сооружений городской постройки.

Результаты, анализ и обсуждение. В результате анализа ограждения котлована многоярусной системой анкеров установлено, что грунтовые анкеры на всех четырех ярусах не способны предотвратить разуплотнение грунта вокруг котлована по причине их податливости и, соответственно, подвижности подпорных сооружений. Проблему надежности решает переход на восходящий способ заложения анкеров первого и второго яруса. Устойчивость подпорного сооружения значительно повышается с увеличением несущей способности восходящих анкеров по грунту благодаря вовлечению в работу массива грунта и увеличению удерживающих сил за счет активного усиления свайного ряда и оптимизации способа заложения анкерной крепи.

Вывод. Анализ теоретических и экспериментальных исследований показал радикальное повышение несущей способности восходящих анкерных конструкций, что коренным образом изменяет схему крепления подпорных сооружений с перепадом высот 15 м и более. В процессе рассмотрения работы конструкции восходящей анкерной крепи установлено, что конструкции опорно-замковых узлов раскрывают определенный запас несущей способности, обусловленный вовлечением в работу массива грунта, расположенного в основании задней грани упорной анкерной плиты. Повышение эффективности анкерных конструкций достижимо за счет высокой технологичности, относительной простоты устройства, оптимальной материалоемкости, открытого способа заложения замка каждого анкера.

Ключевые слова: анкерная крепь; конструкция восходящего анкера; активные анкеры; перемещение ограждающей конструкции; подпорные сооружения; веерный способ заложения; заложение анкерной крепи; структура цементного камня; подземное сооружение.

Введение. Рост численности жителей наших городов и уровень их потребностей в условиях проживания и отдыха непрерывно растет. Город вынужден развиваться и все глубже опускаться под землю. Освоение подземного потенциала позволит более эффективно использовать наземное пространство, сделает систему движения транспорта мобильнее, что приведет к снижению количества вредных выбросов и уровня шума и, как следствие, к обновлению и улучшению качества жизни в мегаполисе [1–3].

В Российской Федерации накоплен значительный опыт проектирования и строительства городских подземных сооружений, возводимых открытым способом, таких как зрелищные сооружения, предприятия торговли и общественного питания, объекты коммунально-бытового обслуживания, а также ряд объектов складского хозяйства, промышленных зданий и сооружений, системы транспортных сооружений. Следует отметить, что многие отечественные идеи и технологии, используемые при освоении подземного пространства, не имеют аналогов за рубежом.

Тем не менее при проектировании ограждений котлованов возникает ряд сложных задач, связанных с поэтапным анализом напряженно-деформированного состояния окружающего массива грунта, оценкой влияния нового строительства на осадки зданий и сооружений окружающей застройки, определением достоверных значений горизонтального давления грунта.

В настоящее время известно множество примеров применения прогрессивных ограждающих и анкерных конструкций при высоких развитых технологиях. Однако их внедрение без детального анализа конкретных условий применения может привести к весьма тяжелым последствиям [1, 4, 5]. Так, например, в процессе вскрытия котлована нового здания Министерства иностранных дел, г. Москва, потеря предварительного напряжения в анкерах в результате длительного перерыва в строительстве привела к значительным перемещениям «стены в грунте», образованию трещин в окружающих зданиях. При строительстве котлована подземной части здания в Юго-Западном округе г. Москвы произошло обрушение части «стены в грунте» с анкерным креплением по причине несоответствия усилий в анкерных конструкциях востребованным значениям вследствие продолжительных и обильных дождей.

Анализ ряда причин, вызвавших аварии при возведении глубоких котлованов, позволил выделить из них, в частности, несоответствие несущей способности анкерных конструкций расчетным значениям, что вполне объясняется неопределенностью статической работы анкерной крепи в зоне заделки анкера.

Анкерная крепь при строительстве подземных сооружений освобождает внутреннее пространство котлованов, тем самым повышает производительность работ открытым способом.

Между тем в случае применения грунтовой анкерной крепи в городском подземном строительстве необходимо учитывать ряд следующих ограничительных факторов:

- неконтролируемый этап инъектирования цементного раствора в корневую часть анкера;
- неопределенность статической работы анкеров, особенно в связных и структурно-неустойчивых грунтах;
- невозможность восполнения потерь усилий предварительного натяжения анкеров;
- невозможность последующего извлечения грунтовых анкеров, препятствующих дальнейшему городскому строительству;
- низкая производительность установки грунтовых анкеров (2–3 шт. в смену) и, как следствие, высокая стоимость производства работ.

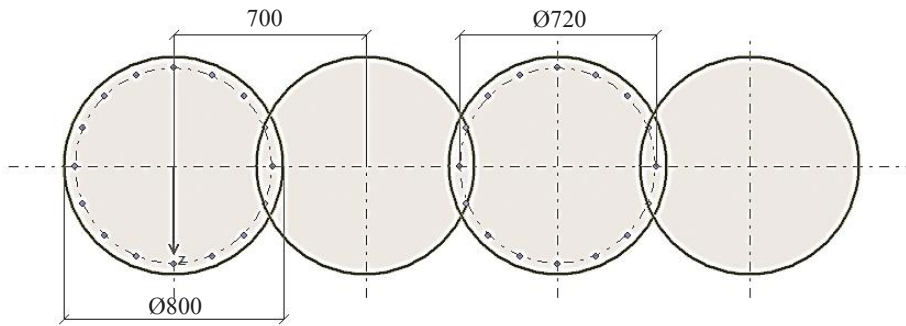


Рисунок 1. Поперечное сечение ограждения котлована
Figure 1. Cross section of the pit shoring

Объект исследования – строительство подпорного сооружения котлована в условиях перепада высоты 15 м.

Подпорное сооружение представляет собой ряд грунтоцементных колонн в качестве элементов ограждающих конструкций борта котлована (рис. 1).

В качестве хорошо известного анкерного усиления ограждения рассматривается вариант многоярусной системы анкеров с трубчатой винтовой штангой «Титан».

Вместе с тем для оценки несущей способности восходящей анкерной крепи [6] и с целью повышения эффективности усиления подпорных сооружений с большим перепадом высот используется комбинированный подход к формированию многоярусной анкерной крепи.

При возведении глубоких котлованов особенно важна задача выбора технологии крепления и последовательности устройства котлована, позволяющего снизить деформации ограждающей конструкции и грунтового массива.

Методика исследований. В качестве объекта геотехнологического анализа рассматривается комплексный расчет прочности и устойчивости ограждения котлована и устойчивости грунта в зоне заглубленной части стены.

Расчет ограждения котлована, усиленного системой многоярусной анкерной крепи, основан на численном решении задачи изгиба балки, защемленной нижним концом в упруго-пластичном грунте и удерживаемой анкерами в качестве связей. Конструкция подпорных стен представляет собой ряд секущихся армированных грунтоцементных колонн, возводимых на основе технологии струйной цементации грунтов. Поверхность массива грунта загружается активной нагрузкой 20 кН/м².

В программе GeoWall расчет давления на ограждение производится в соответствии с нормативными правилами и положениями (СП 22.13330.2011. *Основания зданий и сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*)*. М.: Минрегион России, 2016. 160 с.), [7]. Устойчивость грунта вокруг заглубления стены оценивается по предельному состоянию грунта в зоне заделки. Учтено пассивное давление на ограждение со стороны засыпки. Моделирование упругого изгиба стены осуществляется по методу конечных элементов с использованием вариационной постановки Лагранжа с учетом гипотезы плоских сечений (гипотеза Бернулли) [5, 8, 9]. Инженерно-геологические условия представлены в табл. 1 (h – мощность слоя инженерно-геологического элемента (ИГЭ), м; ρ_1 – плотность грунта в естественном состоянии по первой группе предельных состояний, г/см³; ρ_{sat} – плотность грунта при полном водонасыщении по первой группе предельных состояний, г/см³; c_1 – удельное сцепление по первой группе предельных состояний, кПа; ϕ_1 – угол

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов
Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

Тип грунта	h , м	ρ_1 , г/см ³	ρ_{sat1} , г/см ³	c_1 , кПа	ϕ_1 , град	k_{s_s} , кН/м ³	λ_0	E , МПа	ν
Песок дресвянистый	2,5	1,95	2,04	8,0	32,0	995	0,54	19,0	0,35
Суглинок тугопластичный	7,2	1,92	2,05	37,0	28,0	1665	0,43	32,0	0,30
Габрро-диорит пониженной прочности	3,5	2,23	2,25	17,0	35,0	4000	0,33	40,0	0,25
Гранодиорит-порфир средней прочности	10,0	2,30	2,35	19,0	36,0	5000	0,25	50,0	0,20

Таблица 2. Параметры анкерных связей с шагом установки 1,5 м
Table 2. Parameters of anchor ties with an installation pitch of 1.5 m

Этап	Глубина установки, м	Жесткость связи, кН/мм	Сила натяжения, кН
2	3,0	19,4	40
3	6,0	19,4	50
4	9,0	20,6	110
5	12,0	18,9	150

внутреннего трения по первой группе предельных состояний, град; k_s – коэффициент постели, кН/м³; λ_0 – коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя; E – модуль деформации, МПа; ν – коэффициент Пуассона), параметры ограждения – в табл. 2, 3.

Расчетная схема ограждения, усиленного многоярусной системой грунтовых анкеров, представлена на рис. 2 (программа GeoWall).

Работа ограждения котлована рассматривается в условиях обильных дождей, образовавших временные скопления подземных вод в верхнем слое песка. Подпорная стена воспринимает значительное давление воды. В этих условиях рекомендуется применять предварительное водопонижение, активный дренаж и струйную цементацию [8, 10, 11].

Результаты расчета в целом следует признать неудовлетворительными. Активная нагрузка, воспринимаемая активными грунтовыми анкерами, не обеспечивает надежность ограждения по следующим условиям: коэффициенты устойчивости по грунту для второго, третьего и четвертого ярусов анкеров демонстрируют значения ниже предельно допустимых. Горизонтальные перемещения развиваются по всей высоте свай и достигают максимального значения на уровне 4-го яруса, следовательно, анкерные связи не способны предотвратить разуплотнение удерживаемого массива грунта по причине несоответствия несущей способности анкерных конструкций расчетным значениям, что объясняется неопределенностью статической работы анкерной крепи в области заделки анкера.

На основе оптимизации способа заложения анкерной крепи предусматривается включение в работу системы восходящих анкеров, заменяющих грунтовые анкеры на первых двух ярусах конструктивного усиления подпорного сооружения. Необходимость включения в работу грунтовых прядевых анкеров на 3-м и 4-м ярусах

Таблица 3. Параметры конструкции ограждения
Table 3. Shoring design parameters

<i>Параметры ограждающей конструкции</i>	
Глубина котлована.....	15 м
Длина ограждения.....	18 м
Глубина заделки.....	4 м
Тип ограждения.....	Jet свай
<i>Параметры пионерного котлована</i>	
Отступ.....	1 м
Глубина.....	1 м
Угол наклона.....	45 град
<i>Параметры поперечного сечения ограждения</i>	
Количество рядов.....	1
Шаг свай в ряду.....	700 мм
Размер каркаса.....	920 мм
Количество стержней.....	16
Площадь сечения арматурных стержней.....	78,540 см ²
Момент инерции.....	83 125,810 см ⁴
Модуль упругости.....	200 000 МПа
Прочность на растяжение.....	435 МПа
Армирование (ряд № 1).....	50 %

вызвана приближением к котловану зданий и сооружений городской постройки. Одновременное применение восходящего и нисходящего способа заложения анкерной крепи представляет собой веерный способ анкерования ограждения котлована. На верхних двух ярусах устанавливаются восходящие анкера, тогда как на нижних ярусах – нисходящие грунтовые анкера. За счет этого первые два ряда опорных анкерных плит за бровкой котлована не будут занимать значительное пространство вокруг котлована. Параметры анкерных конструкций и грунтобетонных свай – табл. 4, 5, 6.

В процессе моделирования комплексного расчета ограждения котлована назначено 9 основных этапов строительства котлована, включая 4 этапа поярусной установки активных анкеров и 5 этапов экскавации котлована.

Уровень временных грунтовых вод расположен на глубине 3 м от поверхности. Уровень водоупора расположен на кровле суглинистого слоя грунта, на глубине 7 м. Применяется предварительное водопонижение и активный дренаж.

Расчетная схема ограждения котлована, усиленного веерной системой анкерной крепи, с применением анкерования ограждения грунтовыми нисходящими и восходящими анкерами, представлена на рис. 3.

Проблему надежности ограждающей системы решает переход на применение восходящего способа заложения анкеров 1-го и 2-го ярусов [12, 13] с сохранением анкерования нижних ярусов грунтовыми анкерами.

Результаты расчета в целом следует признать положительными. Активная нагрузка, воспринимаемая восходящими анкерами, обеспечивает надежность ограждения по следующим условиям: коэффициенты устойчивости анкерной крепи по грунту достигают высоких значений, действие предварительного натяжения анкеров радикально снижает горизонтальные перемещения и предотвращает разуплотнение грунта вокруг котлована. Работа грунтовых анкеров 3-го и 4-го ярусов указывает на достаточный уровень обеспечения несущей способности по грунту (табл. 7).

Результаты. Анализ и обсуждение. Результаты расчета ограждения котлована приведены в табл. 7.

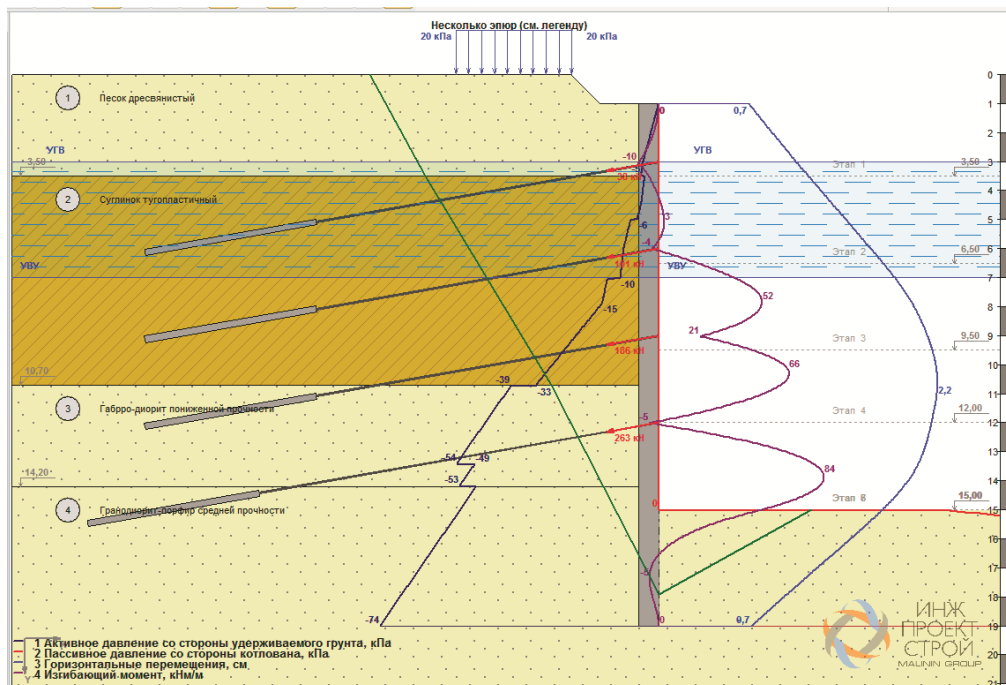


Рисунок 2. Расчетная схема ограждения котлована, включая очертания эпюр активного давления со стороны удерживаемого грунта, кПа, пассивного давления со стороны котлована, кПа, изгибающих моментов, $\text{kN} \cdot \text{м/м}$, и горизонтальных перемещений призмы сдвига грунта для 8-го этапа вскрытия котлована (программа GeoWall)

Figure 2. The design scheme of the pit shoring, including the outlines of the diagrams of active pressure from the retained soil, kPa, passive pressure from the pit, kPa, bending moments, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$, and horizontal displacements of the soil shear prism for the 8th stage of pit excavation (GeoWall program)

В результате анализа ограждения котлована, усиленного многоярусной системой анкеров, установлено, что грунтовые анкеры на всех четырех ярусах не способны предотвратить разуплотнение грунта вокруг котлована по причине их податливости и, соответственно, подвижности подпорных сооружений. Вместе с тем расчетные усилия активных грунтовых анкеров не могут быть реализованы из-за ограниченной несущей способности по грунту.

Практика исследований показывает, что максимальное давление опрессовки заделки анкера, которое возможно получить в песчаных грунтах, составляет 2,1 МПа, а в глинистых грунтах оно не превышает 0,8 МПа.

Кроме того, получить поперечное сечение корня анкера (диаметром более 250 мм) в слоях суглинка не представляется возможным в силу того, что в глинистых грунтах структура цементного камня получается пористой, с включением неперемешанных частиц грунта, прочность раствора не превышает 8 МПа. Тогда как в песчаных, трещиноватых скальных грунтах происходит интенсивное отфильтровывание жидкой фазы в массив [14–16].

Таким образом, развитие горизонтальных перемещений ограждения в период вскрытия котлована позволяет сделать вывод о ползучести корней анкеров при значительно меньших усилиях по сравнению с расчетными. Возникает высокая вероятность опрокидывания сооружения при разрушении анкерной крепи по причине ее недостаточной несущей способности по грунту.

Таблица 4. Параметры грунтовых трубчатых анкеров (диаметр скважины 210 мм, модуль упругости тяги 210 000 МПа, предел прочности тяги 580 МПа)
Table 4. Parameters of soil tubular anchors (borehole diameter is 210 mm, traction modulus is 210,000 MPa, tensile strength is 580 MPa)

Параметр	Ярус 1	Ярус 2	Ярус 3	Ярус 4
Свободная длина, м	10,5	16,0	12,0	14,0
Длина корня, м	1,0	1,1	6,0	6,0
Полная длина анкера, м	11,5	17,1	18,0	20,0
Размеры сторон анкерной плиты/диаметр корня, мм	1000	1100	230	230
Площадь сечения анкера, мм ²	1810,0	1810,0	1476,0	1476,0

Таблица 5. Параметры связей (тип связи – анкер, шаг установки – 1,5 м)
Table 5. Tie parameters (tie type is anchor, installation pitch is 1.5 m)

Этап	Глубина установки, м	Жесткость связи, кН/мм	Угол установки, град	Сила натяжения, кН
2	3,0	33,0	–14,0	140
3	6,0	25,0	–20,0	170
4	9,0	20,6	10,0	110
5	12,0	18,9	10,0	150

Таблица 6. Параметры грунтобетонной сваи в зависимости от слоя грунта (диаметр сваи – 1000 мм)
Table 6. Parameters of soil-concrete pile depending on the soil layer (pile diameter is 1000 mm)

Номер слоя	Тип грунта	Модуль упругости, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
1	Песок дресвянистый	2700	24,4	1,7
2	Суглинок тугопластичный	2700	24,4	1,7
3	Габбро-диорит пониженной прочности	2700	25,0	1,7
4	Гранодиорит-порфир средней прочности	3000	30,0	2,0

Исходная начальная нагрузка, активизируемая грунтовыми анкерами, не обеспечивает надежность ограждения по условиям: изгибающий момент ниже дна котлована, интенсивность давления на сваю на глубине заделки, минимальный коэффициент запаса в бетоне и арматуре, развитие длительных незатухающих перемещений ограждающих конструкций (табл. 7).

Проблему надежности решает переход на восходящий способ заложения анкеров 1-го и 2-го ярусов. Устойчивость подпорного сооружения значительно повышается с увеличением несущей способности восходящих анкеров по грунту благодаря вовлечению в работу массива грунта и увеличению удерживающих сил за счет активного усиления свайного ряда и оптимизации способа заложения анкерной крепи. Стабильность значений расчетных усилий активных анкеров на протяжении всех этапов вскрытия котлована обусловлена приемлемым усилием предварительного натяжения и оптимальным способом заложения восходящей анкерной крепи.

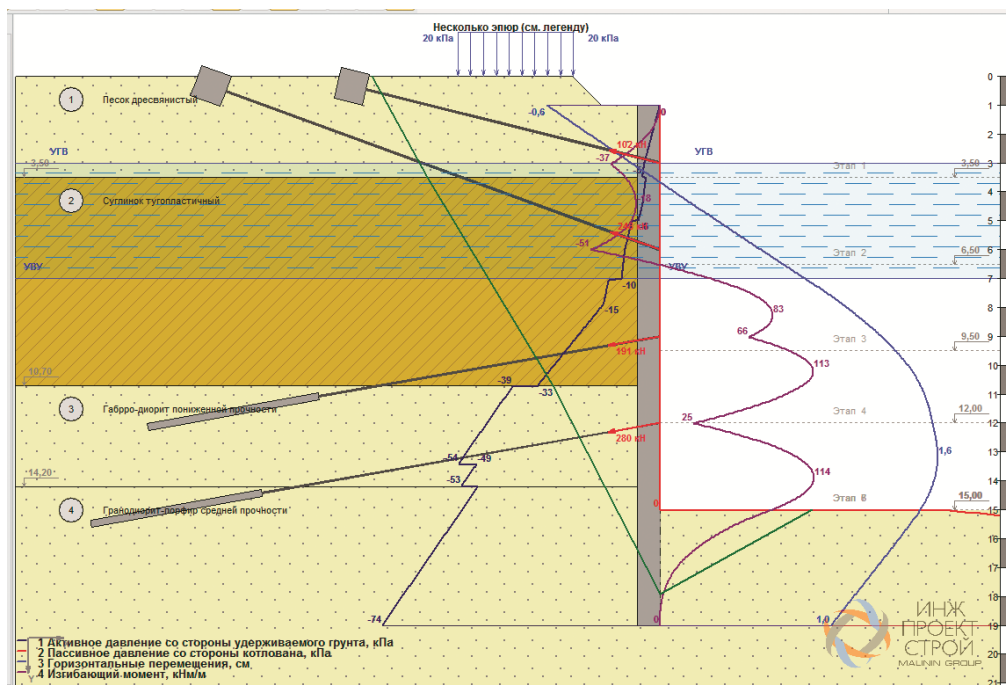


Рисунок 3. Расчетная схема ограждения котлована, включая очертания эпюр активного давления со стороны удерживаемого грунта, кПа, пассивного давления со стороны котлована, кПа, изгибающих моментов, $\text{kN} \cdot \text{м/м}$, и горизонтальных перемещений призмы сдвига грунта для 9-го этапа вскрытия котлована

Figure 3. Calculation scheme of the pit shoring, including the outlines of diagrams of active pressure from the retained soil, kPa, passive pressure from the pit, kPa, bending moments, $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ and horizontal displacements of the soil shear prism for the 9th stage of pit excavation

Несущая способность нисходящих грунтовых анкеров создается силой трения по боковой поверхности корня, тогда как несущая способность анкерных конструкций восходящего типа обеспечивается как за счет сил трения по боковой поверхности анкерной плиты, так и за счет реактивного, лобового отпора грунта в основании задней грани опорной анкерной плиты.

Повышение эффективности восходящей анкерной крепи достижимо за счет высокой технологичности, оптимальной материалоемкости, высокой степени механизации работ, что ведет к значительному сокращению сроков строительства и снижению стоимости производства работ.

Особенностью оценки устойчивости удерживаемого массива грунта является сопоставление его напряженно-деформированного состояния с предельно возможным [2, 7, 8].

Инженерный метод оценки устойчивости удерживаемого массива грунта основан на понятии коэффициента устойчивости K_{st} , который в общем виде можно представить как отношение удерживающих и сдвигающих сил. Анализ устойчивости производится на основе теории предельного равновесия для призм с круглоцилиндрической поверхностью скольжения. Оптимальное положение каждого из анкеров, т. е. зону заложения, размеры и устойчивое положение заделки анкера подбираем при расчете на потерю общей устойчивости системы «ограждение–анкер–грунт»

Таблица 7. Результаты расчета ограждения котлована
Table 7. The results of pit shoring calculation

Исследуемый параметр	Нисходящая система анкеров	Верная система анкеров
Глубина котлована, м	15,0	15,0
Количество ярусов	4	4
Глубина заделки сваи t , м	4,0	4,0
Шаг анкеров в плане L , м	1,50	1.50
Расчетные усилия в анкерах, кН	30; 101; 186; 263	102; 248; 191; 280
<i>Максимальные значения внутренних усилий и перемещений</i>		
Максимальный изгибающий момент в свае, кН · м/м	141 (3-й этап)	206 (3-й этап)
Максимальная перерезывающая сила в грунтобетонной колонне, кН	92 (3-й этап)	135 (3-й этап)
Максимальное горизонтальное перемещение, см	2,2	1,6
<i>Характеристики сечения свай (тип Jet)</i>		
Расчетное сопротивление грунтобетона по ИГЭ, см ³	24; 24; 25; 30	24; 24; 25; 30
Жесткость армокаркаса EA, МН	2678	2678
<i>Коэффициенты запаса расчетных компонентов для всех ярусов (9-й этап экскавации)</i>		
Минимальный коэффициент запаса в бетоне свай	17,8	2,5
Минимальный коэффициент запаса в металле армокаркаса	4,8	3,2
Коэффициент запаса анкера по грунту	2,10; 1,70; 1,80; 1,70	5,20; 2,90; 2,10; 2,10
Коэффициент запаса анкера по материалу	13,2; 6,5; 4,5; 3,3	6,0; 4,0; 4,0; 3,1

исходя из условия, что наиболее опасная поверхность скольжения произвольной геометрии проходит через низ анкеруемого сооружения [3, 9].

Расчет коэффициента устойчивости выполняется на основе теории предельного равновесия и реализуется для призм с круглоцилиндрической поверхностью скольжения по методам: касательных сил, Феллениуса, Янбу, Бишопа, Моргенштерна–Прайса, Шахунянца. Анализ устойчивости основан на методе операционного перебора огибающих поверхностей скольжения для призм сдвижения, характеризующихся коэффициентами устойчивости. Предельное значение реакции ограждения вычисляется как минимальное из трех величин:

- прочность стены на изгиб;
- прочность стены на срез;
- предельное сопротивление заделки стены.

Геологические условия удерживаемого массива грунта, параметры анкерных связей и параметры конструкций ограждения представлены в табл. 1, 2, 3. Основные силовые факторы отсеков призмы: i – порядковый номер отсека (нумерация с нуля); G_i – вес i -го отсека, $G_i = A_i \gamma_i$, кН/м; T_i – касательная проекция равнодействующей активных сил к основанию i -го отсека, в простейшем случае $T_i = G_i \sin(\alpha_i)$, кН/м; N_i – проекция равнодействующей активных сил на нормаль

Таблица 8. Расчет силовых факторов и коэффициента устойчивости с учетом влияния грунтовых анкеров по методу Шахунянца

Table 8. Calculation of the force factors and stability coefficient including soil anchors influence, according to the Shakhuniantz method

i	$T_{\text{акт } i} \text{ (сдвиг),}$ кН/М	$T_{\text{акт } i} \text{ (удерж),}$ кН/М	$N_i \text{tg}\varphi_i +$ $+ c_i l_i, \text{ кН/М}$	$N_{\text{арм } i} \text{tg}\varphi_i +$ $+ T_{\text{арм } i}, \text{ кН/М}$	$T_{\text{реакт } i},$ кН/М	λ_i	$T_{\text{акт } i} \text{ (сдвиг)} \times$ $\times \lambda_i, \text{ кН/М}$	$T_{\text{реакт } i} \lambda_i,$ кН/М
0	11,5	0,0	21,4	0,0	21,4	1,39	15,9	29,6
1	20,3	0,0	12,2	0,0	12,2	1,20	24,4	14,7
2	24,7	0,0	11,8	0,0	11,8	1,13	27,9	13,3
3	28,0	0,0	12,3	0,0	12,3	1,08	30,2	13,3
4	30,6	0,0	13,3	0,0	13,3	1,04	31,9	13,8
5	32,7	0,0	14,3	0,0	14,3	1,01	33,1	14,5
6	34,4	0,0	15,5	0,0	15,5	0,99	34,0	15,3
7	35,9	0,0	16,7	0,0	16,7	0,97	34,7	16,2
8	37,1	0,0	17,9	0,0	17,9	0,95	35,3	17,0
9	38,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,94	35,7	17,9
10	38,9	0,0	20,4	0,0	20,4	0,92	35,9	18,8
11	39,6	0,0	21,6	0,0	21,6	0,91	36,1	19,7
12	40,1	0,0	22,8	0,0	22,8	0,90	36,2	20,6
13	40,5	0,0	24,0	0,0	24,0	0,89	36,2	21,5
14	40,7	0,0	25,2	0,0	25,2	0,89	36,1	22,3
15	40,9	0,0	26,3	0,0	26,3	0,88	36,0	23,2
16	40,9	0,0	27,5	0,0	27,5	0,87	35,8	24,0
17	40,9	0,0	28,6	0,0	28,6	0,87	35,6	24,9
18	40,8	0,0	29,7	0,0	29,7	0,87	35,3	25,7
19	40,6	0,0	30,7	0,0	30,7	0,86	35,0	26,5
20	40,3	0,0	31,8	0,0	31,8	0,86	34,6	27,3
21	40,0	0,0	32,8	0,0	32,8	0,86	34,2	28,1
22	39,6	0,0	33,8	0,0	33,8	0,85	33,8	28,9
23	39,1	0,0	34,8	0,0	34,8	0,85	33,3	29,6
24	38,6	0,0	35,7	0,0	35,7	0,85	32,8	30,4
25	37,5	0,0	36,2	0,0	36,2	0,85	31,8	30,7
26	33,3	0,0	33,7	0,0	33,7	0,85	28,3	28,6
27	32,1	0,0	33,8	0,0	33,8	0,85	27,2	28,7
28	30,9	0,0	33,9	0,0	33,9	0,85	26,2	28,8
29	0,0	229,5	171,5	1,5	402,5	0,85	0,0	341,5
Итого:	1028,3	229,5	889,3	1,5	1120,3	–	943,7	995,4

к основанию i -го отсека, в простейшем случае $N_i = G_i \cos(\alpha_i)$, кН/м; S_i – нормальная реакция основания i -го отсека, в простейшем случае, при отсутствии армирующих элементов и сил взаимодействия между отсеками $S_i = -N_i$, кН/м; $N_i \text{tg}\varphi_i$ – величина условной осредненной силы трения по основанию i -го отсека, кН/м; $c_i l_i$ – величина силы сцепления по основанию i -го отсека, кН/м; $N_i \text{tg}\varphi_i + c_i l_i$ – касательная реакция основания i -го отсека; это предельная величина силы сопротивления сдвигу грунта по поверхности скольжения i -го отсека без учета влияния армирующих элементов, кН/м; $T_{\text{акт } i} \text{ (сдвиг)}$ – касательная проекция равнодействующей активных сил к основанию i -го отсека, направление которой совпадает с общим направлением

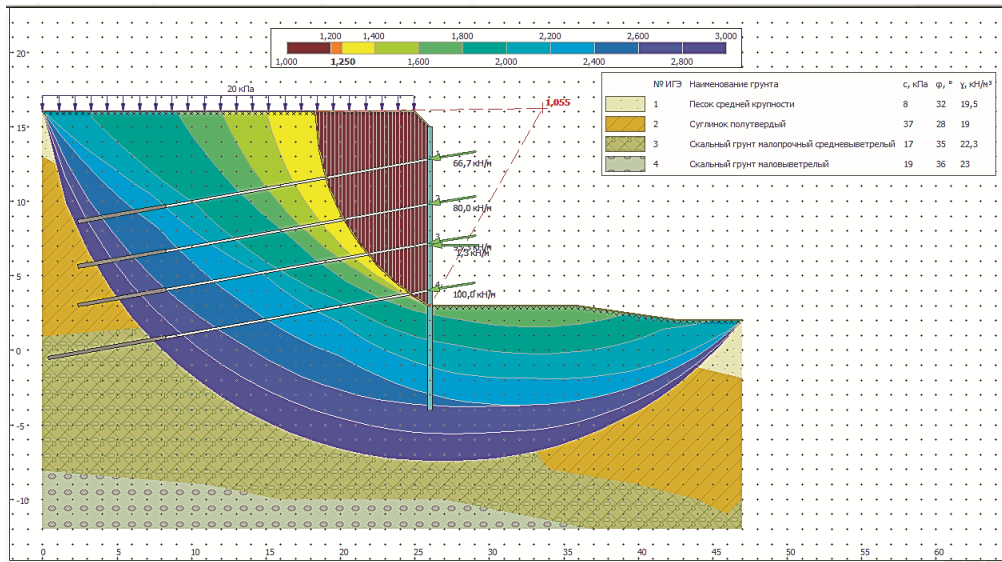


Рисунок 4. Анализ устойчивости на сдвиг ограждения котлована по методу Шахунянца в условиях сложного геологического строения удерживаемого массива грунта при заложении грунтовых анкеров в удаленные и глубоко расположенные слои грунта

Figure 4. Analysis of pit shoring shear stability according to the Shakhuniants method under a complex geological structure of the retained soil mass when laying soil anchors in remote and deep soil layers

сдвига, кН/м; $T_{акт\ i\ (удерж)}$ – касательная проекция равнодействующей активных сил к основанию i -го отсека, направленная противоположно общему направлению сдвига, кН/м; $N_i \text{tg}\phi_i + c_i l_i$ – касательная реакция основания i -го отсека; это предельная величина силы сопротивления сдвигу грунта по поверхности скольжения i -го отсека без учета влияния армирующих элементов, кН/м; $N_{арм\ i} \text{tg}\phi_i + T_{арм\ i} N_{арм\ i}$, $T_{арм\ i}$ – нормальная и касательная проекции равнодействующей усилий в арматуре, кН/м; $T_{реакт\ i} = (N_i \text{tg}\phi_i + c_i l_i) + (N_{арм\ i} \text{tg}\phi_i + T_{арм\ i})$, кН/м; λ_i – числовой коэффициент $\lambda_i = \cos(\phi_i) / \cos(\alpha_i - \phi_i)$.

Расчет силовых факторов и коэффициента устойчивости с учетом влияния грунтовых анкеров представлен в табл. 8.

Коэффициент устойчивости:

$$K_{st} = \sum T_{реакт\ i} \cdot \lambda_i / \sum T_{акт\ i\ (сдвиг)} \cdot \lambda_i = 995,4 / 943,7 = 1,055.$$

Устойчивость на сдвиг ограждения котлована при заложении грунтовых анкеров в удаленные и глубоко расположенные слои грунта оценивается перебором областей сформированных призм сдвига по методу Шахунянца (рис. 4).

Анализ устойчивости ограждения котлована по результатам перебора огибающих поверхностей скольжения с целью поиска опасной круглоцилиндрической линии скольжения показал существование контура сформированной призмы сдвига с коэффициентом устойчивости $k_{st} = 1,055$, ниже нормативного предельно допустимого значения $[k_{st}] = 1,250$.

Расчет силовых факторов и коэффициента устойчивости для верного способа заложения анкерной крепи представлен в табл. 9.

Таблица 9. Расчет силовых факторов и коэффициента устойчивости для веерного способа заложения анкерной крепи по методу Шахунянца

Table 9. Calculation of force factors and stability coefficient for the fan method of laying anchor support according to the Shakhunians method

i	$T_{\text{акт } i} \text{ (сдвиг)},$ кН/М	$T_{\text{акт } i} \text{ (удерж)},$ кН/М	$N_i \text{tg}\varphi_i +$ $+ c_i/l_i, \text{ кН/М}$	$N_{\text{арм } i} \text{tg}\varphi_i +$ $+ T_{\text{арм } i}, \text{ кН/М}$	$T_{\text{реакт } i},$ кН/М	λ_i	$T_{\text{акт } i} \text{ (сдвиг)} \times$ $\times \lambda_i, \text{ кН/М}$	$T_{\text{реакт } i} \lambda_i,$ кН/М
0	11,5	0,0	21,4	0,0	21,4	1,39	15,9	29,6
1	20,3	0,0	12,2	0,0	12,2	1,20	24,4	14,7
2	24,7	0,0	11,8	0,0	11,8	1,13	27,9	13,3
3	28,0	0,0	12,3	0,0	12,3	1,08	30,2	13,3
4	30,6	0,0	13,3	0,0	13,3	1,04	31,9	13,8
5	32,7	0,0	14,3	0,0	14,3	1,01	33,1	14,5
6	34,4	0,0	15,5	0,0	15,5	0,99	34,0	15,3
7	35,9	0,0	16,7	0,0	16,7	0,97	34,7	16,2
8	37,1	0,0	17,9	0,0	17,9	0,95	35,3	17,0
9	38,1	0,0	19,1	0,0	19,1	0,94	35,7	17,9
10	38,9	0,0	20,4	0,0	20,4	0,92	35,9	18,8
11	39,6	0,0	21,6	0,0	21,6	0,91	36,1	19,7
12	40,1	0,0	22,8	0,0	22,8	0,90	36,2	20,6
13	40,5	0,0	24,0	0,0	24,0	0,89	36,2	21,5
14	40,7	0,0	25,2	0,0	25,2	0,89	36,1	22,3
15	40,9	0,0	26,3	0,0	26,3	0,88	36,0	23,2
16	40,9	0,0	27,5	0,0	27,5	0,87	35,8	24,0
17	40,9	0,0	28,6	0,0	28,6	0,87	35,6	24,9
18	40,8	0,0	29,7	0,0	29,7	0,87	35,3	25,7
19	40,6	0,0	30,7	0,0	30,7	0,86	35,0	26,5
20	40,3	0,0	31,8	0,0	31,8	0,86	34,6	27,3
21	40,0	0,0	32,8	0,0	32,8	0,86	34,2	28,1
22	39,6	0,0	33,8	0,0	33,8	0,85	33,8	28,9
23	39,1	0,0	34,8	0,0	34,8	0,85	33,3	29,6
24	38,6	0,0	35,7	0,0	35,7	0,85	32,8	30,4
25	37,5	0,0	36,2	0,0	36,2	0,85	31,8	30,7
26	33,3	0,0	33,7	0,0	33,7	0,85	28,3	28,6
27	32,1	0,0	33,8	0,0	33,8	0,85	27,2	28,7
28	30,9	0,0	33,9	0,0	33,9	0,85	26,2	28,8
29	0,0	627,1	209,0	442,0	1278,1	0,85	0,0	1084,3
Итого:	1028,3	627,1	926,7	442,0	1995,8	–	943,7	1738,3

Коэффициент устойчивости:

$$K_{\text{ст}} = \sum T_{\text{реакт } i} / \sum T_{\text{акт } i \text{ (сдвиг)}} \cdot \lambda_i = 1738,3 / 943,7 = 1,842.$$

Повышение устойчивости подпорного сооружения обусловлено вовлечением в работу массива грунта, расположенного в основании задних граней опорных анкерных плит восходящей анкерной крепи.

Анализ устойчивости ограждения котлована по результатам перебора огибающих поверхностей скольжения с целью поиска опасной круглоцилиндрической

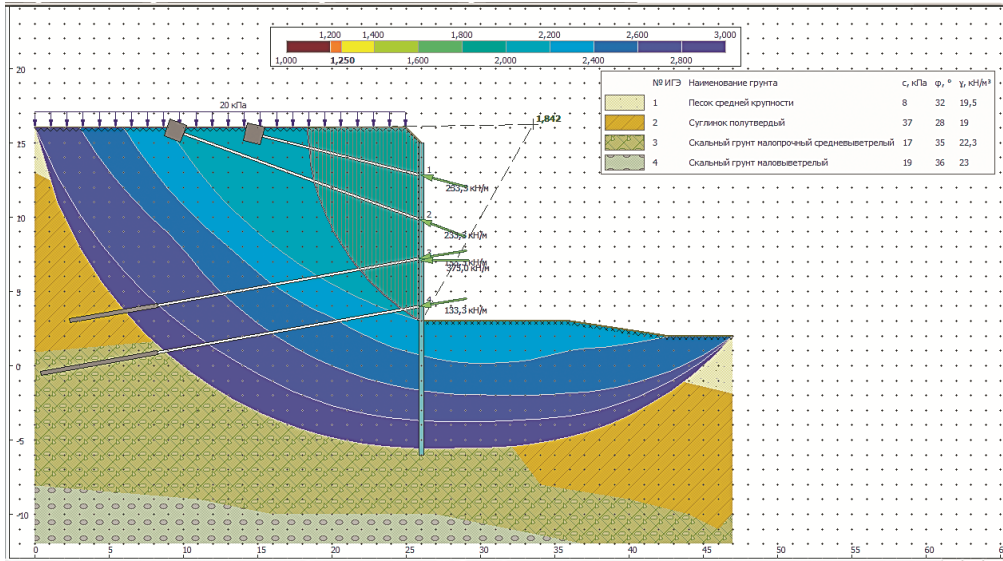


Рисунок 5. Анализ устойчивости ограждения котлована по методу Шахунянца в условиях сложного геологического строения удерживаемого массива грунта при заложении восходящих анкеров на 1-м и 2-м ярусах за пределы возможной призмы сдвига

Figure 5. Analysis of pit shoring stability according to the Shakhuniant's method under a complex geological structure of the retained soil mass when laying ascending anchors on the 1st and 2nd tiers beyond the possible shear prism

Таблица 10. Результаты оценки устойчивости ограждения и удерживаемого массива грунта

Table 10. Results of shoring and retained soil mass stability analysis

Метод расчета	Значения коэффициента устойчивости	
	Заложение грунтовых анкеров	Заложение веерным способом
Метод Феллениуса	0,839	1,774
Метод Бишопа	1,185	1,925
Метод Янбу	1,148	2,296
Метод Моргенштерна–Прайса	1,190	2,023
Метод Шахунянца	1,055	1,842
Метод касательных сил	1,172	3,208

призмы сдвига выявил контур сформированной призмы с коэффициентом устойчивости $k_{st} = 1,842$, выше нормативного предельно допустимого значения $[k_{st}] = 1,250$.

В результате назначения оптимального положения каждого анкера относительно областей сформированных призм, уточнения зоны заложения каждого яруса анкеров, а также размеров и устойчивого положения опорных анкерных плит устойчивость удерживаемого массива грунта и ограждения котлована обеспечена (рис. 5).

Результаты оценки устойчивости подпорного сооружения на основе поиска наиболее опасной круглоцилиндрической призмы сдвига приведены в табл. 10.

Проблему достижения устойчивости решает переход на веерный способ заложения анкеров. Устойчивость подпорного сооружения значительно повышается

с увеличением несущей способности восходящих анкеров по грунту благодаря вовлечению в работу массива грунта, значительному росту удерживающих сил за счет активного усиления свайного ряда.

Выводы. Практическим результатом работы является радикальное изменение схемы крепления подпорных стен с перепадом высот от 15 м и более благодаря включению в работу системы восходящей анкерной крепи. Рациональность такой схемы заключается в повышении несущей способности анкерной крепи по грунту, увеличении прочности закрепления верхних ярусов анкеров, снижении затрат труда. Ее применение дает возможность визуального контроля над состоянием узлов заделки и извлечения анкерных тяг, достижения высокого уровня технологичности, безопасности проведения работ и сохранности окружающей застройки, что обеспечивает наиболее эффективные, экономически результативные и высокотехнологичные производственные процессы при возведении городских подземных сооружений открытым способом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скупов Б. А. Все глубже, глубже и глубже. Стратегия инновационного развития подземного городского пространства // Интернет-портал «Строительный эксперт». URL: <https://ardexpert.ru/article/4137> (дата обращения: 23.01.2023).
2. Половов Б. Д., Корнилов М. В. Геомеханическое обеспечение шахтного и подземного строительства. Екатеринбург: УГГУ, 2017. 998 с.
3. Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C. Ground anchors and anchored systems. Washington, DC: FHWA–IF–99–015, Federal Highway Administration, 1999. 16 p.
4. Викулов В. М. Анализ свайной крепи котлована с тремя ярусами восходящих анкеров и вертикальной нагрузкой на призме обрушения в режиме вероятностного статистического моделирования // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: тр. VI Междунар. конф. 10–11 апреля 2019 г. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2019. С. 109–124.
5. Малинин А. Г., Салмин И. А. Расчет предельных нагрузок для грунтовых анкеров «Атлант» // Жилищное строительство. 2020. № 9. С. 3–8.
6. Викулов В. М., Волков М. Н. Влияние оптимизации предварительного натяжения восходящих анкеров на упреждение обвалоопасных перемещений ограждений котлованов // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 5–9.
7. Салмин И. А. Мониторинг ограждающей конструкции глубокого котлована // Жилищное строительство. 2017. № 9. С. 29–34.
8. Малинин П. А., Струнин П. В. Опыт строительства глубокого котлована с использованием технологии струйной цементации грунтов // Геотехника. 2013. № 2. С. 4–13.
9. Rimélel A., Gamache M., Dimitrakopoulos R. Open pit stochastic optimization with in-pit tailings storage // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. 2017. P. 9.17–9.25.
10. Newman A. M., Rubio E., Caro R., Weintraub A., Eureka K. A Review of operations research in mine planning // Interfaces (Providence). Jun. 2010. Vol. 40. No. 3. P. 222–245.
11. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining // Mining Engineering. 1987. Vol. 39. No. 2. P. 119–123.
12. Викулов В. М. Обоснование эффективности конструкций восходящей анкерной крепи и оценка устойчивости ограждений стен глубоких котлованов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 28–37.
13. Дмитриенко В. А. Исследование работоспособности грунтовых анкеров. Шахты: Шахтинский институт Южно-Российского государственного технического университета, 2004. С. 217–219.
14. Маковский Л. В., Сула Н. А. Строительство автодорожных и городских тоннелей. М.: РИОР; Инфра-М, 2014. 397 с.
15. Сорочан Е. А. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения // под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М: Стройиздат, 2011. 470 с.
16. Hutchinson D. J., Diederichs M. S. Cablebolting in underground mines. Published by BiTech Publishers Ltd.; 1996.

Сведения об авторах:

Викулов Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: zmk_osad@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2460-1766>

Волков Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой шахтного строительства Уральского государственного горного университета E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1875-2302>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-104-119

Optimizing the method of laying anchor support when building complex underground structures in the vicinity of urban areas

Vladimir M. Vikulov¹, Maksim N. Volkov¹¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The article considers the construction of a pit retaining structure with a significant difference in elevation. A multi-tiered system of strand anchors is a well-known method of anchor reinforcement of shoring. To assess the bearing capacity of the ascending anchor support and improve the reinforcement efficiency of retaining structures with a large difference in elevation, a combined approach to the formation of a multi-tiered anchor support is used.

Methods of research. When modeling the complex calculation of a pit shoring, 5 main stages of pit excavation and 4 stages of preliminary tiered tensions of anchor rods are specified. The method of shoring strength calculation is based on the numerical solution of the problem of bending a beam lying on an elastic-plastic foundation and held by anchor structures as ties. The ascending anchor structure is modeled in the GeoWall program operating environment. To optimize the anchor support laying method, it is planned to involve the system of ascending anchors that take the place of soil anchors on the first two tiers of the retaining structure reinforcement. The need to involve soil strand anchors on the third and fourth tiers is due to the vicinity of urban area.

Results, analysis and discussion. The analysis of pit shoring with a multi-tiered system of anchors showed that the soil anchors on all four tiers cannot prevent soil softening around the pit due to their pliability and retaining structures mobility. Soil anchors reliability is improved by applying the ascending method of laying anchors of the first and second tiers. Retaining structure stability increases significantly with the growth of the soil bearing capacity of ascending anchors due to the soil mass involvement and retention forces increase by means of the active pile row strengthening and anchor support laying method optimization.

Conclusion. The analysis of theoretical and experimental studies showed a dramatic increase in the bearing capacity of ascending anchor structures, which radically changes the attachment scheme for retaining structures with a difference in elevation of 15 m or more. When studying the operation of the ascending anchor support structure, it was found that the support-and-lock unit designs have a certain reserve of bearing capacity opened up due to the involvement of the soil mass located at the base of the rear face of the anchor bearing plate. It is possible to improve the efficiency of anchor structures through high workability, relative simplicity of the mechanism, optimal material consumption, and open method of laying the lock of each anchor.

Keywords: anchor support; ascending anchor design; active anchors; displacement of shoring; retaining structures; fan method of laying; anchor support laying; structure of cement stone; underground structure.

REFERENCES

1. Skupov B. A. Deeper and deeper. The innovative development strategy for the underground urban space. *Building expert web portal*. Available from: <https://ardexpert.ru/article/4137> [Accessed 23 January 2023].
2. Polovov B. D., Kornilkov M. V. *Geomechanical support of mine and underground construction*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2017. (In Russ.)
3. Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C. *Soil anchors and anchored systems*. Washington, DC: FHWA–IF–99–015, Federal Highway Administration, 1999.

4. Vikulov V. M. Analyzing the pile support of a pit with three tiers of ascending anchors and vertical load on the failure wedge in the mode of probabilistic statistical modelling. In: *Design, construction and maintenance of underground facilities: Proceedings of 7th Internat. conf. 10–11 April 2019. Ural State Mining University. Ekaterinburg*: 2019. p. 109–124. (In Russ.)
5. Malinin A. G., Salmin I. A. Calculation of limit loads for soil anchors “Atlant”. *Zhilishchnoe stroitelstvo = Housing Construction*. 2020; 9: 3–8. (In Russ.)
6. Vikulov V. M., Volkov M. N. The influence of bottom-up anchors pre-tension optimization on the prediction of pit walls rockfall displacements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 5–9. (In Russ.)
7. Salmin I. A. Monitoring of the enclosing structure of a deep pit. *Zhilishchnoe stroitelstvo = Housing Construction*. 2017; 9: 29–34. (In Russ.)
8. Malinin P. A., Strunin P. V. A deep excavation construction experience using the jet grouting technology. *Geotekhnika = Geotechnics*. 2013; 2: 4–13. (In Russ.)
9. Rimé1el A., Gamache M., Dimitrakopoulos R. Open pit stochastic optimization with in-pit tailings storage. *Application of computers and operations research in the mineral industry*. 2017. p. 9.17–9.25.
10. Newman A. M., Rubio E., Caro R., Weintraub A., Eurek K. A review of operations research in mine planning. *Interfaces (Providence)*. Jun. 2010. Vol. 40. No. 3. p. 222–245.
11. Hustrulid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining. *Mining Engineering*. 1987; 39(2): 119–123.
12. Vikulov V. M. Substantiation of ascending anchor support effectiveness and the estimation of deep foundation pit wall barriers stability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 7: 28–37. (In Russ.)
13. Dmitrienko V. A. *Study of soil anchor performance*. Shakhty: Shakhty institute of Platov South-Russian Polytechnic University Publishing; 2004. 217–219. (In Russ.)
14. Makovskii L. V., Sula N. A. *Motorway and city tunnels construction: manual*. Moscow: RIOR; Infra-M Publishing; 2014. (In Russ.)
15. Sorochan E. A. *Design engineer’s reference guide. Bases, foundations and underground structures*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 2011. (In Russ.)
16. Hutchinson D. J., Diederichs M. S. *Cablebolting in underground mines*. Richmond, British Columbia Canada: BiTech Publishers Ltd.; 1996.

Received 17 February 2023

Information about the authors:

Vladimir M. Vikulov – PhD (Engineering), Associate Professor, Mine Construction Department, Ural State Mining University. E-mail: zmk_osad@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2460-1766>

Maksim N. Volkov – PhD (Engineering), Head of Mine Construction Department, Ural State Mining University. E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1875-2302>

Для цитирования: Викулов В. М., Волков М. Н. Оптимизация способа заложения анкерной крепи при строительстве сложных подземных сооружений в условиях приближения городской застройки // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 104–119. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-104-119

For citation: Vikulov V. M., Volkov M. N. Optimizing the method of laying anchor support when building complex underground structures in the vicinity of urban areas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 104–119 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-104-119