

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ В ГРУППЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОТЛОВАНА ПОД ЗАЩИТОЙ ОГРАЖДЕНИЯ В ВИДЕ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ»

## RESEARCH OF GROUP SOIL ANCHORS DURING THE DEVELOPMENT OF THE PIT WITH 'WALL IN TRENCH'

Р. И. ЧЕРНОВ

В. А. КИТАЙКИН

Р. И. КОНОВАЛОВ

Е. В. ЧЕЛИКОВА

*Рассмотрены актуальные вопросы сохранения устойчивости и прочности конструкции ограждения котлована при разрушении одного из элементов крепления. Получено соотношение усилий в конструктивных элементах ограждения котлована при его нормальной работе и при возникновении аварийной ситуации, сделан вывод о степени влияния выхода из строя одного из элементов крепления на общую устойчивость ограждения котлована и необходимость учета этого фактора при проектировании.*

### Ключевые слова:

*Аварийная ситуация, анкерное крепление, захваты, ограждение котлована, основное сочетание нагрузок, особое сочетание нагрузок, подпорное сооружение, прогрессирующее обрушение, распорная система, специальные технические условия, «стена в грунте», численное моделирование.*

*Topical issues of preserving the stability and strength of the cofferdam construction when one of the fastening elements are destroyed. As a result of the work done, the correlation of efforts in the structural elements of the cofferdam during its normal operation and in the event of an emergency situation is given. Conclusion on the degree of influence on the overall stability of the cofferdam when one of the fastening elements is failure and the need to take this factor in the design is made.*

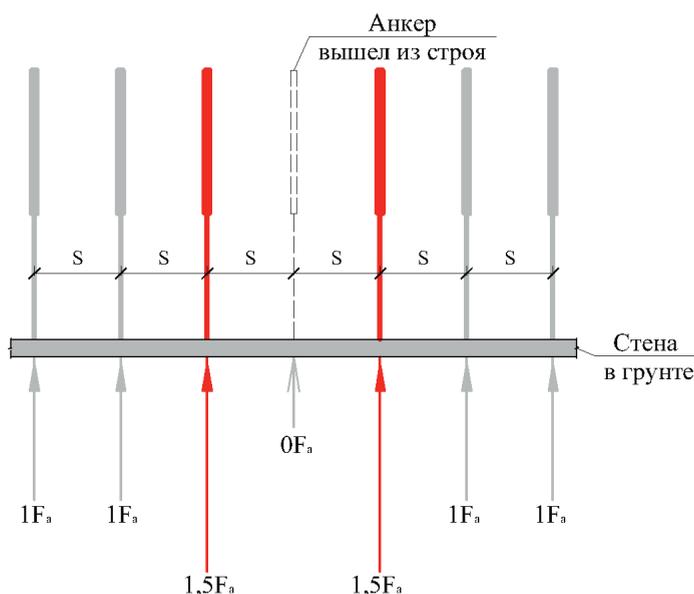
### Key words:

*Anchor, basic load combination, cofferdam, division, emergency situation, numerical simulation, progressive collapse, retaining wall, special load combination, strut system, special technical regulations, «wall in the ground».*

В 2016-2017 гг. в рамках научно-технического сопровождения проектирования одного из объектов г. Москвы сотрудники НИИОСП им. Н.М. Герсеванова встретились с задачей прогноза распределения усилий в отдельно взятых грунтовых анкерах с учетом их групповой работы при разработке глубокого котлована. Котлован относился к уникальным сооружениям согласно ст. 48.1 п. 2 Градостроительного Кодекса РФ [1] (глубина более 15 м), в связи с чем при его проектировании рассматривалась аварийная расчетная ситуация (ст. 16 п. 6 [2]), имеющая малую вероятность возникновения и небольшую продолжительность, но являющаяся важной в отношении последствий достижения предельных состояний, которые могут возникнуть при этой ситуации (расчет на прогрессирующее обрушение).

В качестве одной из таких ситуаций был рассмотрен выход из строя грунтового анкера. Стандартным инженерным подходом при подобных ситуациях является допущение, что выход из строя одного анкера с расчетным усилием  $F_a$  приводит к равномерному распределению усилий между соседними анкерами, добавляя половину от его усилия к левому и половину — к правому анкеру, в результате чего итоговое (аварийное) усилие, приходящееся на левый и на правый анкера, составит (рис. 1):

$$F_{\text{авар}}^{\text{лев}} = F_{\text{авар}}^{\text{прав}} = F_a + 0,5F_a = 1,5F_a.$$



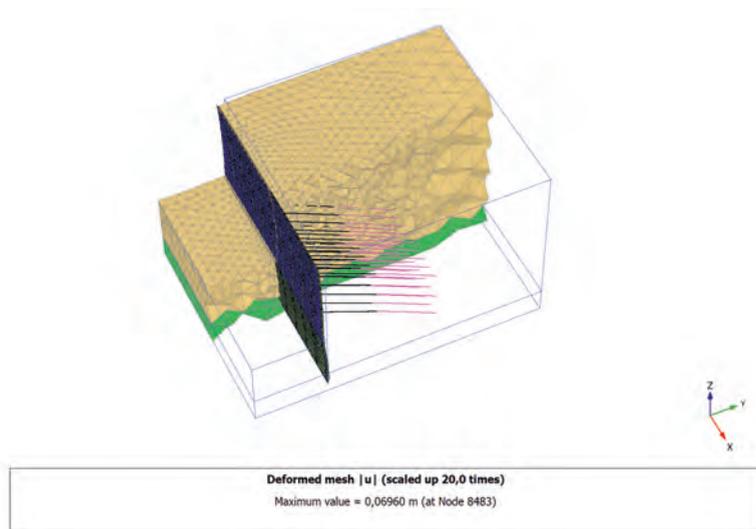
**Рис. 1.** Схема распределения усилий в группе анкеров при отказе одного из них, обычно принимаемая при проектировании

Исходя из такого допущения, проектирование и контрольные испытания грунтовых анкеров согласно [5] выполняются на нагрузку, в полтора раза превышающую расчетное значение, что является необходимым для обеспечения надежности ограждения котлована.

Однако результаты выполненных расчетов существенно отличались от указанного

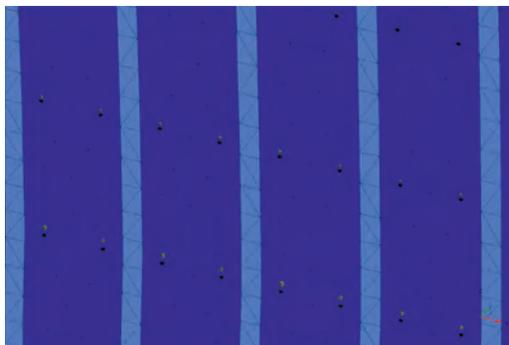
допущения, в связи с чем сотрудниками НИИОСП было принято решение продолжить исследовательскую работу по изучению групповой работы грунтовых анкеров.

Для решения поставленной задачи в программном комплексе PLAXIS 3D [7] выполнена расчетная модель фрагмента котлована глубиной 15 м. Размер расчетной схемы составил  $40(b) \times 40(h) \times 60(L)$  м (рис. 2).



**Рис. 2.** Общий вид расчетной модели PLAXIS 3D

Ограждение котлована смоделировано в виде «стены в грунте» толщиной 800 мм с заглублением на 8 м ниже дна котлована. «Стена в грунте» состоит из 13 отдельных захваток шириной по 3 м каждая, не связанных между собой, т.е. в расчетной модели каждая захватка работает отдельно, и таким образом в задаче мы пренебрегли усилиями, передающимися по стыку захваток (рис. 3). Такой подход близок к реальной работе ограждения котлована в виде «стены в грунте» – ввиду технологических особенностей горизонтальное армирование «стены в грунте» не производится, хотя некоторое усилие между захватками все же передается по бетону благодаря особой конфигурации стыка захваток и наличия сил трения.



**Рис. 3.** Модель стыка захваток (в стыках заданы элементы с почти нулевой жесткостью)

Расчетная модель выполнена для трех вариантов инженерно-геологических условий, характерных для г. Москвы (табл. 1):

- вариант 1 – однородная толща грунтов на всю глубину расчетной схемы, с физико-механическими свойствами, характерными для песков средней крупности, средней плотности, с уровнем подземных вод, расположенным с глубины 4 м от поверхности земли и далее до низа ограждения котлована;
- вариант 2 – однородная толща грунтов на всю глубину расчетной схемы, с физико-механическими свойствами, характерными для песков средней крупности, средней плотности, без подземных вод;
- вариант 3 – однородная толща грунтов на всю глубину расчетной схемы, с физико-механическими свойствами, характерными для мягкопластичных глинистых грунтов без подземных вод.

Таблица 1

**Принятые для расчета характеристики грунтов**

№ варианта	Наименование грунта	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\nu$	$e$	$c$ , МПа	$\varphi$ , °	$E$ , МПа
1	Песок средней крупности, средней плотности, водонасыщенный, УПВ – 4 м от поверхности	18,0	0,3	0,6	1	30	25
2	Песок средней крупности, средней плотности, неводонасыщенный						
3	Глина мягкопластичная	18,9	0,4	0,9	28	20	23

Устойчивость ограждения котлована обеспечивается устройством трех ярусов крепления. В исследовании рассмотрены три варианта конструкций крепления:

- вариант 1 (рис. 4) – крепление котлована тремя ярусами преднапрягаемых грунтовых анкеров. Конструкция анкеров – тросовые, жесткость анкера эквивалентна 4 канатам К7 Ø15,2 мм. Длина тяги анкера принята 11 м, длина корня анкера 6 м, диаметр корня 300 мм, угол наклона анкера к горизонту 35°, усилие предварительного натяжения 32 т на анкер, средний шаг анкеров 1,5 м (два анкера на захватку);

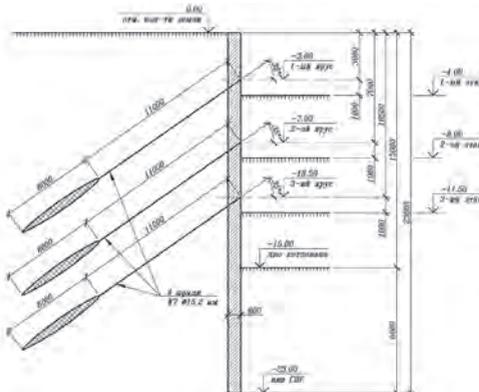


Рис. 4. Расчетная схема к варианту 1

- вариант 2 (рис. 5) – крепление котлована выполняется тремя ярусами преднапрягаемых грунтовых анкеров. Конструкция анкеров – стержневые ТВШ типа «Атлант-джет» (или аналогичные), жесткость анкера эквивалентна жесткости стальной штанги  $\varnothing 52/26$  мм. Длина анкера принята 17 м, диаметр корня 300 мм, угол наклона анкера к горизонту  $35^\circ$ , усилие предварительного натяжения 32 т на анкер, средний шаг анкеров 1,5 м (два анкера на хватку);

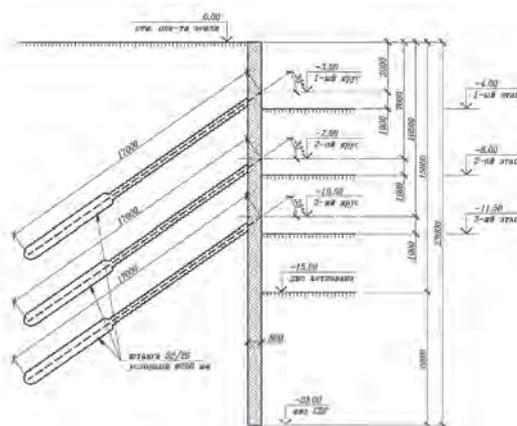


Рис. 5. Расчетная схема к варианту 2

- вариант 3 (рис. 6) – рассмотрен вариант крепления котлована стальными распорками. В модели не задавались реальные параметры распорной системы, так как задачей этого варианта является анализ распределения усилий в ограждении котлована и между соседними анкерами (распорками) без учета влияния грунтовых условий на их несущую способность, т.е. фактически в варианте 3 смоделированы те же грунтовые анкера и с тем же шагом, что и в вариантах 1, 2, но без натяжения и с исключением влияния грунтовых условий на их несущую способность.

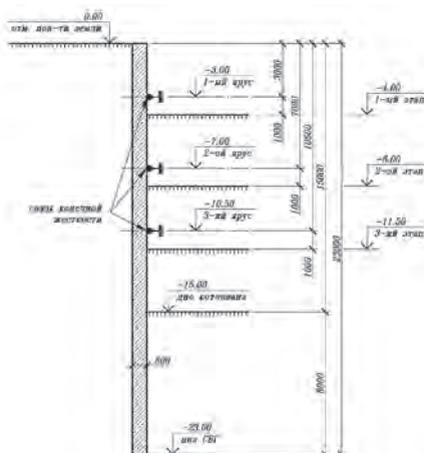
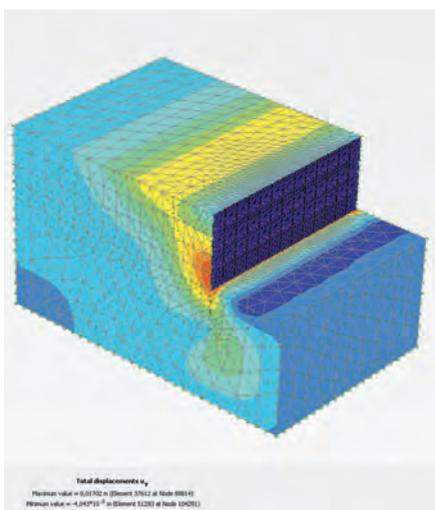


Рис. 6. Расчетная схема к варианту 3

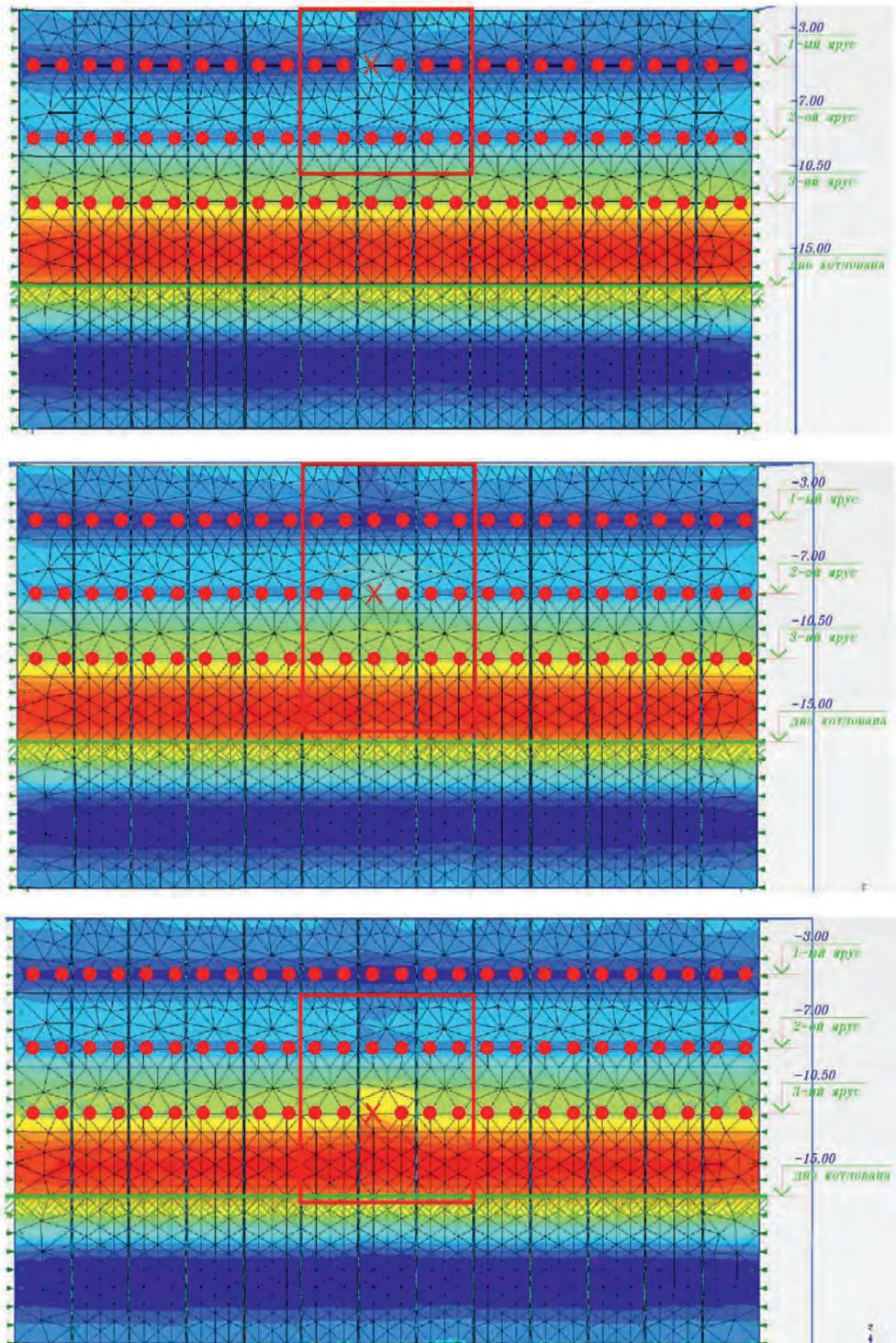
В расчетной модели использованные следующие типы материалов:

- грунтовые условия – нелинейная модель грунта Hardening Soil;
  - «стена в грунте» – упругий элемент типа «Plate»;
  - корень тросового анкера, а также для всей длины стержневых анкеров – упругий элемент типа «Pile»;
  - тяга тросового анкера – упругая узловая связь, работающая только на растяжение «node-to-node»;
  - распорки – связь конечной жесткости, работающая на сжатие.
- Расчет выполнялся в несколько этапов, с учетом последовательности разработки котлована, характерной для подобных объектов:
- разработка котлована на глубину 4 м от поверхности земли;
  - включение анкеров или распорок 1-го яруса, задание предварительного натяжения (для анкеров);
  - разработка котлована на глубину 8 м от поверхности земли;
  - включение анкеров или распорок 2-го яруса, задание предварительного натяжения (для анкеров);
  - разработка котлована на глубину 11,5 м от поверхности земли;
  - включение анкеров или распорок 3-го яруса, задание предварительного натяжения (для анкеров);
  - разработка котлована на окончательную глубину 15 м.

После разработки котлована (рис. 7) выполнялось поочередное «выключение» одного анкерного или распорного элемента средней захватки 1-го, 2-го или 3-го яруса. На каждом этапе выполнялся анализ изменения перемещений и усилий в конструкции ограждения котлована, а также в анкерах или распорках в пределах всей расчетной схемы.



**Рис. 7.** Общий вид деформированной расчетной схемы на последнем этапе разработки котлована

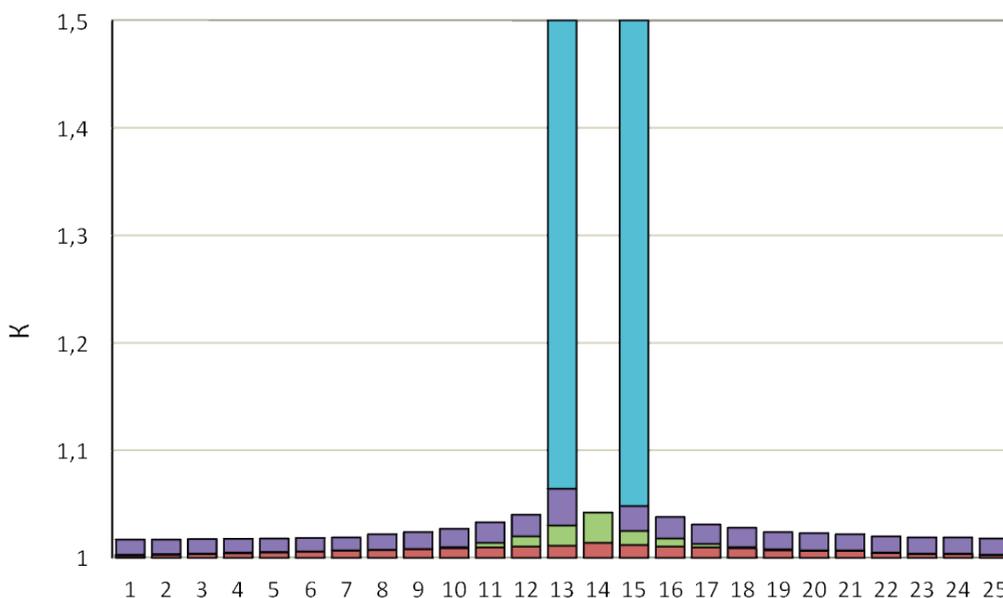


**Рис. 8.** Изменение изгибающих моментов «стены в грунте» при отключении анкера/распорки 1-го, 2-го или 3-го яруса в средней захватке (рамкой выделен участок изменения изополей)

По результатам выполненных расчетов установлено, что во всех рассмотренных вариантах отключение одного из анкеров не приводит к существенному изменению перемещений и усилий в конструкции ограждения котлована и соседних анкеров. Изменения изгибающих моментов (рис. 8) и перемещений настолько незначительны, что они практически незаметны на изополях, а усилие от выключенного элемента (анкера или распорки) распределяется на множество соседних анкеров, причем сумма «добавочного» усилия на всех соседних анкерах меньше, чем усилие, которое приходилось на отключенный анкер, а максимальное увеличение нагрузки на соседний элемент не превышает 6%, что радикально отличается от принятой практики проектирования. Характерный график распределения усилий в анкерах одного из ярусов крепления приведен на рис. 9.

Полученный эффект может быть обусловлен множеством факторов, например:

- горизонтальное давление грунта и подземных вод меньше, чем суммарное усилие натяжения анкеров;
- грунтовые воды повышают сцепление грунтового массива, снижая горизонтальное давление на ограждающую конструкцию;
- иные причины, требующие дополнительного исследования.



**Рис. 9.** Распределение усилий на соседние анкера при выключении из работы центрального анкера (сравнение результатов принятой практики проектирования и результатов выполненного расчета):

- – распределение усилий на анкера 1-го яруса при отключении среднего анкера 3-го яруса;
- – то же 2-го яруса;    ■ – то же 3-го яруса;    ■ – распределение усилий на анкера в современной практике проектирования

Далее приводится сводная таблица 2, в которой представлены обобщенные результаты изменения усилий и перемещений по их максимальным значениям, полученным

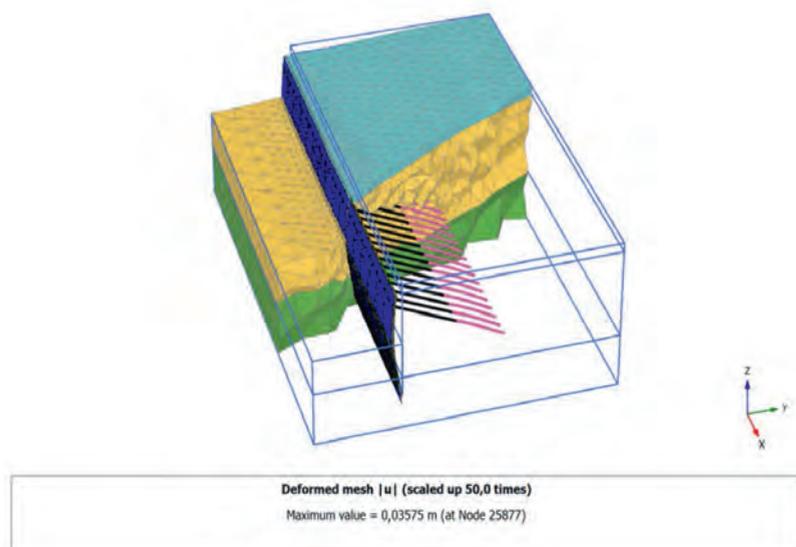
по всем расчетам (в таблице указано, на сколько процентов возрастает усилие и перемещение в конструкциях при отключении одного из анкеров по отношению к нормальной работе ограждения котлована со всеми анкерами).

Таблица 2

**Сводная таблица увеличения усилий и перемещений, %, по их максимальным значениям**

№ пп	Наименование	По столбцам: отключение 1-го/2-го/3-го яруса								
		Песок водонасыщенный			Песок сухой			Глина мягкопластичная		
1	Горизонтальное перемещение СВГ, мм	1,9	4,1	14,0	8,8	7,8	11,2	0,5	1,5	3,0
2	Изгибающие моменты $M_x$ , кН×м/п.м	1,1	4,2	11,0	3,7	3,2	7,6	0,6	5,2	6,9
3	Поперечная сила $Q_z/Q_x$ , кН/п.м	11,8	15,6	19,0	14,2	18,4	18,8	0,9	3,3	10,7
4	Усилие в анкерах 1-го яруса	4,5	4,0	2,1	5,2	4,3	1,9	3,4	2,4	1,0
5	Усилие в анкерах 2-го яруса	3,3	4,9	5,5	3,5	5,3	5,1	2,1	3,2	2,5
6	Усилие в анкерах 3-го яруса	1,2	4,0	6,0	2,4	5,1	5,8	1,0	2,8	3,2
7	Пассивное давление	Увеличение менее 1%								
8	Коэффициент устойчивости	Снижение коэффициента запаса устойчивости пренебрежимо малое								

Для проверки полученных результатов были решены аналогичные задачи с упрощением расчетной схемы – вместо трех ярусов крепления моделировался котлован меньшей глубины с одним ярусом грунтовых анкеров (рис. 10).



**Рис. 10.** Общий вид расчетной схемы с 1-м ярусом грунтовых анкеров

Изменение усилий в «стене в грунте» и перераспределение нагрузки на соседние анкера при выключении одного из них, так же как и в «большой» схеме, не превысило 6-10%.

### Заключение

1. Анализ выполненных расчетов показывает, что выход из строя одного анкера любого яруса в рассмотренных инженерно-геологических условиях вызывает увеличение перемещений и изгибающих моментов в конструкции «стены в грунте» не более чем на 11%, увеличение поперечных сил — не более чем на 19%, увеличение усилий в соседних анкерах — не более чем на 6%. Расчетная величина изменения пассивного давления и коэффициента устойчивости также незначительна.

2. Принципиально схема распределения нагрузок на смежные анкера в рассмотренных случаях практически не меняется при изменении конструкции крепления — тросовые или стержневые преднапрягаемые или не преднапрягаемые анкера как с учетом влияния грунтовых условий на их несущую способность (варианты 1, 2), так и без учета этого влияния (вариант 3).

3. Выполненный анализ позволяет заключить, что выход из строя одного анкера (при соблюдении остальных проектных параметров конструкции и проектных значений внешних нагрузок) не должен привести к нарушению прочности, устойчивости или к прогрессирующему разрушению ограждения котлована.

4. Полученные результаты расчетов побуждают поставить вопрос о необходимости разработки адекватной методики расчета на прогрессирующее обрушение ограждающих конструкций котлована с креплением грунтовыми анкерами.

### Библиографический список

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 г. №190-ФЗ.
2. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 №384-ФЗ.
3. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».
4. СП 24.13330.2012 «Свайные фундаменты».
5. СП 45.13330.2012 «Земляные сооружения основания и фундаменты».
6. СП 381.1325800.2018. «Сооружения подпорные. Правила проектирования».
7. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. 2011 г.

## Авторы:

Руслан Игоревич ЧЕРНОВ, главный инженер проектов отдела проектирования НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ruslan CHERNOV, head engineer of Project department, NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chernov@niiosp25.ru

тел.: +7 (499) 170-27-02; +7 (499) 170-63-12

Вячеслав Анатольевич КИТАЙКИН, начальник отдела проектирования НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vyacheslav KITAYKIN, head of Project department, NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

тел.: +7 (499) 170-27-02

Роман Игоревич КОНОВАЛОВ, старший инженер отдела проектирования НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Roman KONOVALOV, engineer of Project department, NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

тел.: +7 (499) 170-27-02

Екатерина Владимировна ЧЕЛИКОВА, старший инженер отдела проектирования НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ekaterina CHELIKOVA, engineer of Project department, NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

тел.: +7 (499) 170-27-02