

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 624.153.7 + 531.7

### О ПОВЫШЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ С ГИБКОЙ ТЯГОЙ

А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gmmlab@misd.nsc.ru,  
Красный проспект 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Экспериментально подтверждена возможность реализации при натяжении нити, взаимодействующей с грунтовой опорой, эффекта, который для случая той же растягиваемой нити, но огибающей жесткую опору, описывается формулой Эйлера. Опытами на моделях и полевыми экспериментами продемонстрирован существенный рост за счет развития данного эффекта несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой — Э-анкеров. Разработано и испытано технологическое оборудование для их монтажа. С привлечением метода дискретных элементов в двумерной постановке решена задача об эффективности работы новых анкеров в зависимости от направления приложения к их тяговому элементу усилия выдергивания. Показана перспективность использования Э-анкеров при строительстве и эксплуатации инженерных объектов.

*Грунтовый анкер, гибкий тяговый элемент, взаимодействие с основанием, сила трения, формула Эйлера, метод дискретных элементов*

Основными требованиями, предъявляемыми к грунтовым анкерам, являются их высокая несущая способность и надежность. Они, при всем разнообразии конструкций анкеров [1–4], традиционно достигаются исключительно за счет увеличения сопротивления выдергиванию их замковой части (пяты). Тяговый элемент в существующих решениях предназначен только для передачи на нее выдергивающей силы, которая действует на конструкцию со стороны закрепляемого объекта. Трение на контакте тяги с грунтом незначительно и потому при расчетах во внимание не принимается. В ИГД СО РАН разработан и запатентован способ [5] сооружения грунтовых анкеров, который обеспечивает существенное увеличение их сопротивления выдергиванию за счет использования потенциала, заложенного в гибкой анкерной тяге.

#### Э-АНКЕР

Суть решения заключается в использовании эффекта, который реализуется при взаимодействии нагружаемой по концам гибкой нити с охватываемой ею опорой (рис. 1а) [6]. В случае жесткой цилиндрической опоры  $I$  для преодоления сопротивления  $P$ , удерживаю-

щего пассивный конец нити 2, к другому ее концу (активному) необходимо приложить тем большее усилие  $F$ , чем больше угол  $\alpha$  охвата ею опоры [6]. Связь сил  $F$  и  $P$  описывается формулой Эйлера [6]:

$$F = Pe^{f\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  в радианах;  $f$  — коэффициент трения между нитью и опорой.

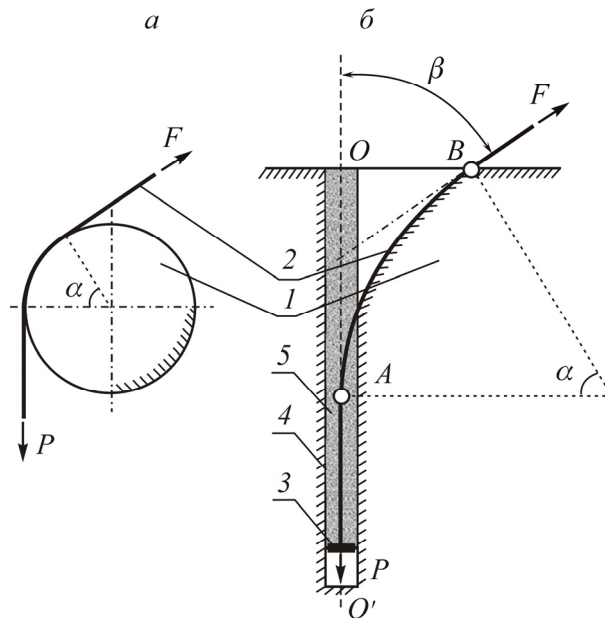


Рис. 1. Схемы взаимодействия гибкой нити с жесткой цилиндрической опорой (а) и гибкой анкерной тяги с грунтовой опорой (б): 1 — опора; 2 — гибкая тяга; 3 — пята анкера; 4 — скважина; 5 — тампонирующий сыпучий материал

Применительно к анкерам (рис. 1б) рассматриваемый эффект (для краткости будем называть его эйлеровским) может быть реализован за счет натяжения гибкой тяги 2 (троса, ленты, цепи и т. п.) под некоторым углом  $\beta$  к оси  $O-O'$  установочной скважины 4 [5]. Это позволяет придать тяге, внедряя ее во вмещающий скважину грунт, криволинейные (близкие дуге окружности) очертания и тем самым обеспечить взаимодействие с формирующейся промежуточной грунтовой опорой 1 по дуге  $AB$ . Схемы нагружения нити и анкерной тяги подобны и различаются только тем, что в последнем случае сопротивление  $P$  выдергиванию гибкого элемента обеспечивается пятой 3 анкера. Полагаем, что, несмотря на деформируемость опоры 1, под нагрузкой сила трения  $R$  между ней и тяговым элементом, обеспечивающая приращение несущей способности анкера, определяется соотношением

$$R = F - P = P(e^{f\alpha} - 1). \quad (2)$$

С учетом того, что  $\alpha = \beta$ , условие равновесия (1) можно переписать в виде

$$\frac{F}{P} = e^{f\beta} = K. \quad (3)$$

Из (3) следует, что в зависимости от значения угла  $\beta$  вклад гибкой тяги в несущую способность нагружаемых предлагаемым способом конструкций (будем называть их Э-анкерами) может оказаться сопоставимым с усилием, которое способно воспринимать их пята, а при определенных условиях даже превосходить его.

### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГИБКОЙ ТЯГИ С МОДЕЛЬНЫМ ОСНОВАНИЕМ

В задачу лабораторных экспериментов входило подтверждение возможности повышения несущей способности грунтовых анкеров за счет реализации эйлеровского эффекта при взаимодействии их гибкой тяги с грунтом, а также выявление особенностей проявления данного эффекта в случае развития в податливом грунтовом основании. Исследования эйлеровского эффекта в условиях, моделирующих взаимодействие гибкого элемента с деформируемой опорой, проделаны на стенде, состоящем из прозрачной прямоугольной емкости *1*, оснащенной системой нагружения, которая состоит из тяги *2* в виде стального троса диаметром 1.5 мм, блоков *3* и их опорных элементов *4* (рис. 2).

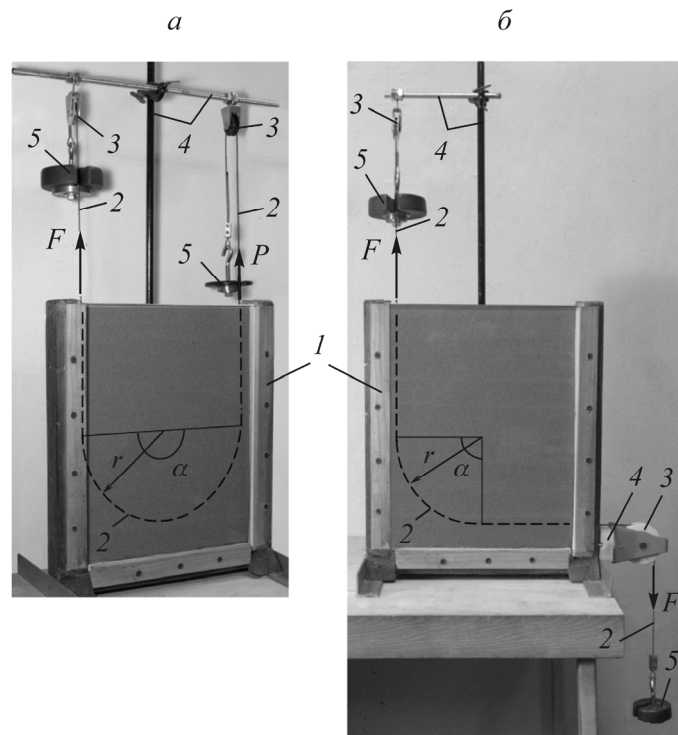


Рис. 2. Нагружение *U*-образного (*a*) и *L*-образного (*б*) тросов: *1* — емкость; *2* — трос; *3* — блок; *4* — опора; *5* — гиря

Размеры емкости в плане 250×20 мм, высота 375 мм. Тросам *2* при установке в емкость *1* придавали *U*-образную (рис. 2*a*) или *L*-образную (рис. 2*б*) форму с радиусом *r* кривизны. Затем емкость послойно заполняли влажным уплотняемым в ходе укладки кварцевым песком крупностью до 0.5 мм. В результате получали модельный грунтовый массив с размещенным внутри *U*-образным или *L*-образным гибкими элементами. Угол  $\alpha$  охвата ими грунтовой опоры составлял 180 и 90° соответственно. Далее осуществляли натяжение троса *2*. К его выступающим из грунта и перекинутым через блоки *3* пассивному и активному концам посредством гирь *5* или вручную через динамометры прикладывали силы *P* и *F* соответственно (рис. 2). Нагруженный таким образом трос может рассматриваться как Э-анкер, приложению к которому внешнего усилия *F* встречает сопротивление *P* со стороны его пяты. По условиям прочности стенда величину *P* ограничивали сверху значением 40 Н. При каждом наперед заданном *P* нагружение силой *F* осуществляли вплоть до момента нарушения анкерной пятой равновесия, что контролировали по началу смещения пассивного конца гибкого элемента.

Опыты показали, что податливость грунтового основания накладывает на его и троса взаимодействие свой отпечаток. Гибкий элемент в этом случае наряду с проскальзыванием относительно грунтовой опоры еще и внедряется в нее. Как следствие, меняются его и ее геометрия. Наглядное представление о перемещениях и формоизменении данного элемента и деформируемой опоры при нагружении дает рис. 3. Штриховой линией маркируются исходные конфигурация  $U$ - и  $L$ -образного тросов 2, кривыми 2 — их постнагрузочные очертания. Выявлены они путем послойного удаления влажного песка до обнажения тяги 2 и подстилающей ее поверхности.

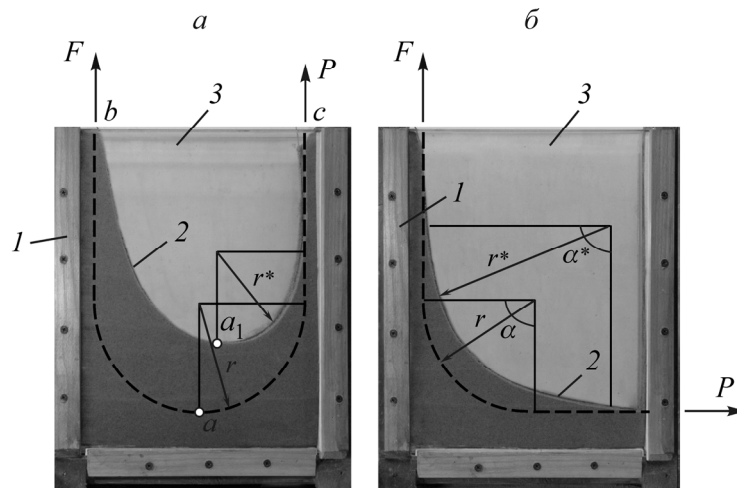


Рис. 3. Изменение конфигурации  $U$ -образной (а) и  $L$ -образной (б) тяг при нагружении: 1 — емкость; 2 — гибкая тяга; 3 — грунт

Видно, что  $U$ -образный трос, защемленный в грунтовой опоре и натягиваемый за счет приложения к его концам сил  $F, P$  (рис. 3а), в целом ведет себя как гибкая нить под действием неравномерно распределенной по длине нагрузки. Изначально симметричные относительно оси симметрии емкости грунтовой опоры и тяга по мере роста  $F$  такую симметрию утрачивают. Наибольшей трансформации подвергается “активная” ветвь  $a-b$  троса. На конечной стадии нагружения ее прямолинейный участок исчезает и она вырождается в полностью криволинейную. У “пассивной” составляющей  $a-c$  троса прямолинейный отрезок испытывает только некоторое укорочение, а изогнутая часть тяги лишь незначительно меняет свою кривизну.

$L$ -образный гибкий элемент (рис. 3б) ведет себя при нагружении подобно “пассивной” ветви  $U$ -образного троса. Начальный радиус огибания первым грунтовой опоры возрастает при этом от  $r$  до  $r^*$ . Таким образом, натяжение силами  $F, P$  гибкого элемента, имеющего грунтовую опору с углом  $\alpha = 90$  и  $180^\circ$ , приводит к изменениям очертаний троса в геосреде, а также длины и радиуса дуги охвата им грунтовой опоры.

Сохранение участком контактирующей с ней тяги в опытах криволинейных очертаний означает сохранение на всех этапах нагружения условий для реализации эйлеровского эффекта. Результаты измерений данный вывод подтверждают. При  $\alpha = 90$  и  $180^\circ$  на всем пути нагружения троса прикладывавшаяся к его активному концу сила  $F$  превышала сопротивление  $P$  пяты выдергиванию из модельного основания. Характерно, что в обеих ситуациях усилия  $F, P$ , как и в случае жесткого основания, оказались связанными линейной зависимостью (рис. 4). Однако выяснилось, что при этом независимо от значения угла  $\alpha$  (когда  $\alpha > 0$ ) даже при  $P = 0$  выдергивающая сила  $F > 0$ .

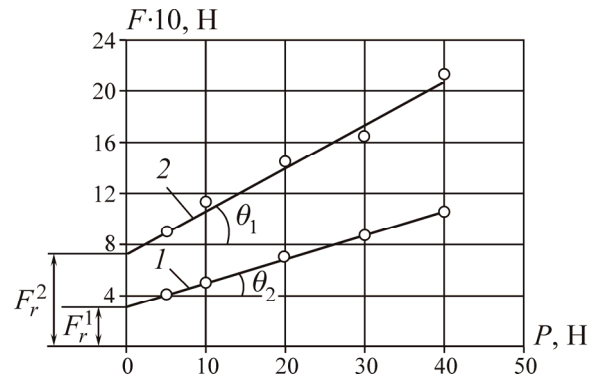


Рис. 4. Зависимости выдергивающей силы  $F$  от удерживающей  $P$  при  $\alpha = 90^\circ$  (1) и  $\alpha = 180^\circ$  (2)

Таким образом, модельные исследования подтвердили принципиальную возможность использования потенциала гибкой тяги анкеров для существенного повышения их общей несущей способности.

#### ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГИБКОЙ ТЯГИ С ГРУНТОМ ЕСТЕСТВЕННОГО СЛОЖЕНИЯ

Исследования проведены на экспериментальной площадке полигона “Зеленая горка” ИГД СО РАН. Состоит она (площадка) из котлована 1 с размерами в плане  $500 \times 250$  см и глубиной  $\sim 150$  см, параллельной ему такой же глубины с размерами в плане  $500 \times 100$  см траншеи 2, которые разделены целиком 3 шириной 400 см (рис. 5). Грунтовое основание в районе работ сложено легким пылеватым суглинком и песчаной слабой супесью, которые имеют сцепление  $C = 0.020 - 0.022$  МПа, угол внутреннего трения  $\varphi = 23 - 30^\circ$ , коэффициент водонасыщения  $S_r = 0.8$ .

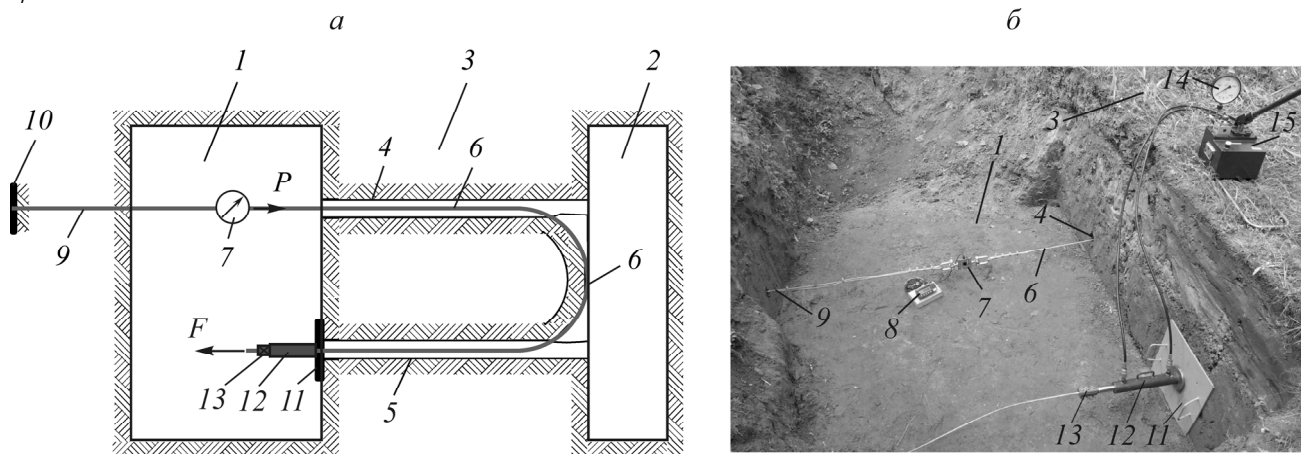


Рис. 5. Схема (а) и вид (б) экспериментальной площадки с нагруженным  $U$ -образным тросом: 1 — котлован; 2 — траншея; 3 — целиком; 4, 5 — скважины; 6 — трос; 7 — динамометр; 8 — индикатор; 9 — тяга стопора; 10 — пята стопора; 11 — опорная плита; 12 — домкрат; 13 — зажим; 14 — манометр; 15 — насос

Для опытов с  $U$ -образной тягой в разделительном целиком 3 площадки на расстоянии друг от друга 150 см и на глубине от поверхности 120 см посредством пневмопробойника ДЖЛ-974 [7] проходили две сквозные диаметром 65 мм горизонтальные параллельные скважины 4, 5. Через них пропускали, формируя в грунте  $U$ -образную дугу с углом его охвата  $\alpha = 180^\circ$ , стальной трос 6. Конец пассивной ветви троса крепили к динамометру 7 растяжения ДОР-3-50И (диапазон 100

измерений 5–50 кН), оснащеному цифровым индикатором 8 марки R320. С противоположной стороны к подвижному элементу динамометра присоединяли тягу 9 анкера-якоря, пяту 10 которого жестко фиксировали в нерабочей стенке котлована 1. Активный конец троса пропускали через опорную плиту 11, полый шток домкрата 12 марки ДП10Г254 и закрепляли захватом 13. Домкрат соединяли шлангами с оборудованным манометром 14 гидравлическим насосом 15 марки НРГ-7080Р, с помощью которого производили натяжение конструкции. В ходе экспериментов нагружение троса *b* выполняли пошагово. При этом периодически регистрировали смещения *u* его активного конца. Одновременно снимали показания манометра 14 домкрата и индикатора 8 динамометра, характеризующие усилия *F* и *P*, которые реализовывались в активной и пассивной ветвях троса соответственно.

Аналогичным образом проводили опыты с *L*-образной тягой. При ее создании пассивную ветвь троса оформляли как и в предыдущих экспериментах (см. рис. 5а), затем его пропускали через скважину 4 и под углом  $\alpha = 90^\circ$  изгибали в вертикальной плоскости по восстанию. После этого сформированную таким способом *L*-образную тягу нагружали с помощью показанного выше оборудования.

На рис. 6 приведены экспериментальные результаты, которые характеризуют соотношение сил *F* и *P*, действовавших по концам *U*- и *L*-образной тяг в ходе их нагружения. Можно видеть, что в обоих случаях сила *F*, прикладываемая к активному концу троса при натяжении, существенно превышала его сопротивление *P* выдергиванию. Зависимость  $F = f(P)$  для реального грунтового основания, как и в лабораторных экспериментах, оказалась близка к линейной. Углы наклона  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  кривых 1, 2 равны  $\sim 56$  и  $67^\circ$  соответственно. Отсюда определяющий эффективность работы анкеров коэффициент *K* (см. формулу 3) для тросов с углом  $\alpha$  охвата грунтовой опоры, равным 90 и  $180^\circ$ , составил соответственно 1.5 и 2.5.

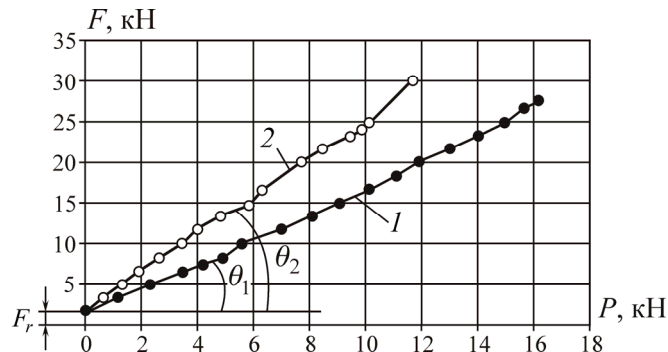


Рис. 6. Зависимость выдергивающей силы *F* от удерживающей *P* при  $\alpha = 90^\circ$  (1) и  $\alpha = 180^\circ$  (2)

Таким образом, проведенные исследования показали, что при взаимодействии криволинейной гибкой тяги с грунтом естественного сложения эйлеровский эффект проявляется столь же отчетливо, как и в случаях ее взаимодействия с жесткой цилиндрической опорой и с модельным песчаным основанием.

#### ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Э-АНКЕРА С ГРУНТОМ

Опытный Э-анкер имел тяговый трос диаметром 2 мм, с прочностью на разрыв 2 кН и был оснащен стальной пяткой диаметром 12 мм. Конструкция помещалась в сквозную наклонную скважину 1, пройденную путем прокалывания стальным стержнем диаметром 8 мм в борту траншеи 2 под углом  $\omega = 45^\circ$  к горизонту (рис. 7). Полость, образованную стенками скважины 1, пяткой 3 и тягой 4 анкера, тампонируют песком 5. Во всех опытах трос 4 с помощью ворота натягивали вдоль оси *O–O'* скважины, т. е. при  $\beta = 0$ , а затем в каждом из них — под наперед за-

данным углом  $\beta = 45, 90$  или  $135^\circ$  к ней. Нагружали анкеры силой  $F$  вплоть до преодоления сопротивления  $P$  их пяты выдергиванию. Усилие  $F^*$ , характеризующее несущую способность анкера, замеряли динамометром растяжения  $6$  (марки ДПУ с диапазоном измерений  $0.1 - 1$  кН).

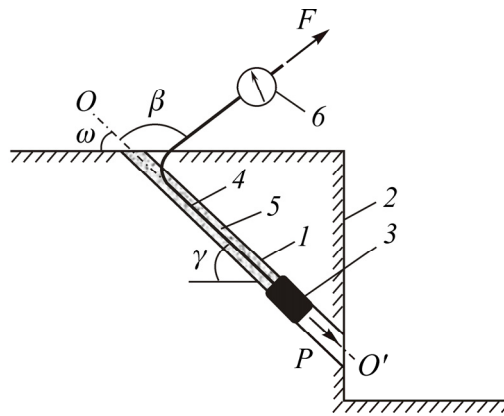


Рис. 7. Схема установки и нагружения анкера: 1 — скважина; 2 — борт траншеи; 3 — пята анкера; 4 — тяга анкера (трос); 5 — тампонирующий материал; 6 — динамометр

Испытания показали, что натяжение троса под углом  $\beta > 0$  к оси установочной скважины сопровождается внедрением гибкой тяги в грунт на величину, которая связана со значением  $\beta$ . Вскрытие грунтового основания подтвердило, что трос, изгибаясь в процессе внедрения, приобретает в области образующейся грунтовой опоры 4 характерные близкие к дуге окружности очертания (рис. 8). Радиус  $r$  дуги зависит от угла  $\beta$ . В результате формоизменения в области контакта анкерной тяги и ее грунтовой опоры возникают условия для развития эйлеровского эффекта. О его реализации в рассматриваемых ситуациях наглядно свидетельствует построенная по результатам экспериментов зависимость несущей способности  $F^*$  анкера от угла  $\beta$  (рис. 9). Из графика следует, что с увеличением угла несущая способность анкера интенсивно возрастает. Так, при  $\beta = 90^\circ$  приращение достигло  $\sim 70\%$ , а при максимальном для данной серии опытов значении  $\beta = 135^\circ$  выдергивающая сила  $F^*$  превысила зафиксированную для случаев  $\beta = 0^\circ$  более чем вдвое.



Рис. 8. Вид на трос (а) и его «грунтовую опору» (б) после вскрытия основания по завершению эксперимента ( $\beta = 135^\circ$ ): 1 — трос после натяжения; 2 — след установочной скважины анкера; 3 — след троса; 4 — грунтовая опора

Таким образом, эксперименты, проведенные на полигоне, подтвердили способность развития в грунтовом основании естественного сложения при взаимодействии с анкерами, оснащенными гибкой тягой, эйлеровского эффекта и, как следствие, возможность существенного общего повышения несущей способности таких конструкций.



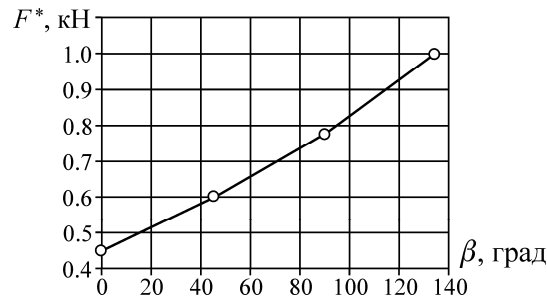


Рис. 9. Зависимость несущей способности анкера от угла натяжения тяги

### АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЯ Э-АНКЕРАМИ

В качестве объекта для крепления Э-анкерами принят имеющий высоту  $\sim 150$  см, ширину  $\sim 500$  см рабочий борт котлована экспериментальной площадки (см. рис. 5). Его закрепление осуществлялось разработанными в ИГД СО РАН анкерами с поворотной пятой и гибкой тягой [8]. Металлическая пята конструкций имела размеры  $120 \times 150 \times 10$  мм. Анкерные тяги изготавливали из стального троса диаметром 10 мм.

Методика сооружения крепи состояла в следующем. Из котлована 2 в целике 3 пневмопробойником ДЖЛ-974 с интервалом около 1 м проходили ряд слабонаклонных скважин 1 (рис. 10). В точках выхода скважин на горизонтальную поверхность по нормали к ним тем же пневмопробойником забивали в грунт на глубину  $\sim 3$  м поворотные анкера [8]. Выступающий из образованных в результате забивки скважин 4 на поверхность активный конец анкерных тяг пропускали через скважину 1 и после установки ограждения нагружали Э-анкер силой  $F$  с помощью разработанного в ИГД СО РАН натяжного устройства. Оценка вклада эйлеровского эффекта в несущую способность анкеров проведена методом двухстадийного натяжения одного из них.

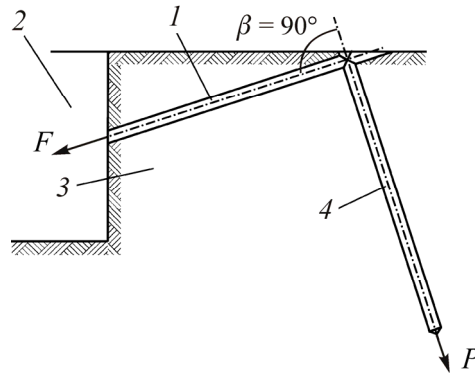


Рис. 10. Схема подготовительных работ по установке Э-анкеров: 1 — слабонаклонная скважина; 2 — котлован; 3 — целик; 4 — монтажная скважина

Технология нагружения Э-анкера и методика измерения усилий в конструкции были те же, что и при рассмотренных ранее полевых опытах с тросами. Полученная зависимость силы выдергивания  $F$ , прикладываемой к гибкой тяге анкера, от перемещений  $u$  конца ее активной ветви представлена на рис. 11. Участок  $AB$  кривой отражает связь усилий и перемещений на первой стадии нагружения конструкции, т. е. при  $\beta = 0^\circ$ , участок  $CD$  — при натяжении анкера (после его предварительной разгрузки) под углом  $\beta = 90^\circ$  (рис. 10). Ордината точки  $B$  характеризует несущую способность  $P^*$  пяты конструкции, ордината точки  $D$  — общее сопротивление  $F^*$  Э-анкера выдергиванию. Из рис. 11 следует, что реализация эйлеровского эффекта в грунтовом основании обеспечивает в условиях полигона “Зеленая горка” увеличение несущей способности анкеров с гибкой тягой примерно в 1.5 раза — от  $\sim 20$  кН при  $\beta = 0^\circ$  до  $\sim 30$  кН при  $\beta = 90^\circ$ .



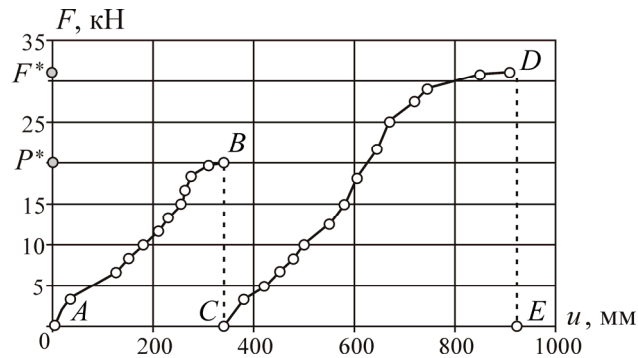


Рис. 11. Зависимость выдергивающей силы  $F$  от перемещения  $u$  нагружаемого конца троса при  $\beta = 0^\circ$  (участок  $AB$ ) и  $\beta = 90^\circ$  (участок  $CD$ )

В октябре 2013 г. ограждающей стенкой и Э-анкерами, установленными по схеме на рис. 10, скважину 4 которой проходили за призмой обрушения, закреплен рабочий борт котлована экспериментальной площадки (рис. 12). Обследование состояния конструкции, проведенное через год после ее монтажа, показало, что ни резкие изменения влажности и температуры в течение этого срока, ни различного рода статические и динамические воздействия на грунт в окрестностях экспериментальной площадки не повлияли на устойчивость системы грунт–ограждение. Это свидетельствует о надежности работы Э-анкеров и необходимости дальнейших исследований с целью разработки рекомендаций по их практическому использованию.



Рис. 12. Усиленное Э-анкерами ограждение котлована: 1 — стойка; 2 — силовой пояс; 3 — забирка; 4 — оголовок Э-анкера с натяжным устройством

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Э-АНКЕРА С ГРУНТОМ

С привлечением метода дискретных элементов в двумерной постановке решена задача об эффективности работы Э-анкеров. Для ее оценки использован коэффициент  $K = F/P$ . Определялась его зависимость от угла  $\beta$  между осью установочной скважины анкера и направлением нагружения последнего (см. рис. 1б). Техника решения подобных задач методом дискретных элементов описана в работах [9–12].

Расчетную прямоугольную грунтовую область формировали из шаровых элементов с плотностью  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ , углом контактного трения между ними  $\varphi = 15^\circ$ , модулем упругости  $E = 10^3 \text{ МПа}$  и сцеплением  $C = 0.02 \text{ МПа}$ . Трос, как и массив, моделировали шарами, которые в данном случае выстраивали в цепочку. Сцепление  $C$  между ними принимали равным модулю упругости  $E = 10^3 \text{ МПа}$ . Остальные параметры шаров задавали такими же, как у элементов, слагающих грунтовый массив. Пассивную часть троса заглубляли в основание с помощью установочной скважины, активную ветвь тяги укладывали на свободную границу. В начальный момент времени к пассивному и активному концам гибкого элемента анкера прикладывали равные по модулю и обратные по знаку усилия  $P, F$ . Натяжение троса силой  $F$  осуществляли до момента, в который его пассивный конец начинал смещаться вдоль установочной скважины. Величина  $F^*$  на активном конце троса, соответствующая данному моменту времени  $t^*$ , характеризовала общее сопротивление конструкции выдергиванию.

На рис. 13 приведены расчетные картины деформированного состояния грунтового массива в момент  $t^*$  при  $\beta$ , равном  $45, 90$  и  $135^\circ$ . Коэффициент  $K$  для данных случаев оказался равным  $1.21, 1.47$  и  $1.67$  соответственно. Коэффициент  $K$ , рассчитанный для тех же ситуаций по формуле (3), имеет значения  $1.23, 1.52$  и  $1.88$ .

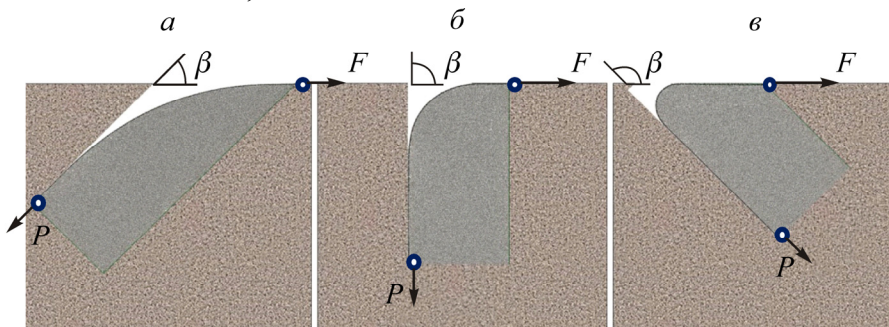


Рис. 13. Деформированные состояния грунтового массива в момент времени  $t^*$  при  $\beta = 45$  (а),  $90$  (б),  $135$  (в)

## ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена реализация эффекта, развивающегося при взаимодействии растягиваемой по концам гибкой нити с огибаемой ею грунтовой опорой, который в случае жесткого опирания нити описывается формулой Эйлера.

Опытами в лаборатории и на полигоне доказана возможность значительного (до двух раз) повышения за счет использования этого эффекта несущей способности анкеров с гибкой тягой.

Разработаны и изготовлены опытные образцы Э-анкеров, а также оборудование для их монтажа в грунтовое основание. Испытания показали высокую эффективность работы таких анкерных конструкций даже в условиях слабых водонасыщенных грунтов.

С привлечением метода дискретных элементов в двумерной постановке оценены деформированное состояние системы грунтовое основание – Э-анкеры и приращение несущей способности последних за счет отклонения направления их нагружения от оси установочной скважины.

Состояние борта опытного котлована, закрепленного Э-анкерами, после года эксплуатации подтвердило перспективность их использования при возведении и усилении инженерных объектов.

Полученные экспериментальные и численные результаты позволили наметить пути совершенствования Э-анкеров с целью дальнейшего повышения их несущей способности и надежности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смородинов М. И. Анкерные устройства в строительстве. — М.: Стройиздат, 1983.
2. Xanthakos P. P. Ground Anchors and Anchored Structures, N.Y.: Wiley, John & Sons, 1991.
3. Das B. M. Earth Anchors, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, FL, USA, 2007.
4. Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Стажевский С. Б. Грунтовые анкеры, машины и технологии для их монтажа // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
5. Пат. 2457293 РФ. Способ сооружения грунтового анкера / С. Б. Стажевский, А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, Г. Н. Хан // Опубл. в БИ. — 2012. — № 21.
6. Бутенин Н. В., Лунц Я., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики: учеб. для вузов. Т. 1: Статика и кинематика. — М.: Наука, 1985.
7. Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д., Плавских В. Д., Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Тупицын К. К., Чепурной Н. П. Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990.
8. Крамаджян А. А., Русин Е. П., Стажевский С. Б., Хан Г. Н. Поворотные анкеры с гибким тяговым элементом: исследования взаимодействия с основанием // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
9. Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1.
10. Хан Г. Н. Моделирование методом дискретных элементов динамического разрушения горной породы // ФТПРПИ. — 2012. — № 1.
11. Ланис А. Л., Хан Г. Н. Модификация модели геосреды для решения задач механики грунтов методом дискретных элементов // Вестн. ТГАСУ. — 2013. — № 1.
12. Клишин С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф. Деформирование сыпучего материала вокруг жесткого цилиндрического включения // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.

*Поступила в редакцию 15/X 2014*