



**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ОТКЛОНЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН В ГРУНТЕ**

**Б. Б. Данилов, А. А. Речкин**

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

Предложена принципиальная схема устройства отклонения траектории скважины при горизонтально направленном шнековом бурении. Рассмотрена задача его взаимодействия с грунтом при статическом нагружении. С помощью модифицированной модели Кэм-Клэй для глинистых грунтов конечно-элементного комплекса Ansys решена параметрическая задача по определению зависимости угла отклонения оси скважины и величины отклонения скважины на 1 п. м ее длины от угла наклона передней плоскости породоразрушающего инструмента. Рассчитано оптимальное значение этого угла.

*Горизонтально направленное бурение, устройство отклонения, модифицированная Кэм-Клэй модель, метод конечных элементов, имитационная модель, конструктивные параметры*

**DETERMINING DEFLECTOR PARAMETERS  
WHEN SINKING HORIZONTAL HOLES IN SOIL**

**B. B. Danilov and A. A. Rechkin**

*Chinakal Mining Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: bbdanilov@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A schematic diagram of a device for deflecting a hole trajectory during horizontally directed auger drilling is proposed. The problem of deflector interaction with soil under static loading is considered. Using modified Cam Clay model for clay soils of the Ansys finite element package, the parametric problem on determining the dependence of hole axis deflection angle and the value of hole deflection per running meter of its length on the inclination angle of the front plane of rock cutting tool is solved. The optimal value of this angle is calculated.

*Horizontal directional drilling, deflector, modified Cam-Clay model, finite element method, simulation model, design parameters*

Широко используемые в настоящее время в строительстве технологии бестраншейной прокладки труб доказали свою эффективность и экономичность. Вместе с тем они не лишены недостатков и нуждаются в совершенствовании. Наиболее часто применяется технология, предусматривающая бурение пилотной скважины по заданной траектории с последующим расширением ее до нужного диаметра путем протягивания расширителей. Контроль за траекторией осуществляется с помощью геолокационного устройства, а управление — поворотом буровой головки, имеющей скос передней поверхности. Очевидно, что диаметр пилотной скважины ограничен и существует предел ее расширения вследствие уплотнения грунта.

Отчасти эта проблема решается в технологии горизонтального направленного бурения за счет удаления грунта из скважины посредством бурового раствора. Однако побочным следствием являются нарушения геометрии скважин, а иногда обрушение грунтового массива и прорыв бурового раствора на дневную поверхность [1]. Технология шнекового бурения с

обсадной трубой позволяет избежать такого рода проблем. Тем не менее чаще всего при этом также требуется предварительная прокладка пионерной скважины [2], в значительной степени обусловленная необходимостью управления траекторией скважины для обеспечения ее выхода в заданную область подземного пространства.

В связи с этим представляется перспективным анализ возможности разработки конструктивных схем устройств корректировки траектории, применимых не только в технологии прокола, но и при шнековом бурении без прокладки пилотной скважины [3]. На рис. 1 схематично показана конструкция передней части шнека, в котором породоразрушающий инструмент выполнен в форме разрезного диска, наклонно закрепленного на оси шнека. В процессе вращения такой инструмент формирует забой скважины в форме конуса. При движении вперед без вращения давление грунта создает на этой наклонной поверхности усилие, включающее осевую и радиальную составляющие. Радиально направленная составляющая является отклоняющим усилием. Величина хода без вращения ограничена вследствие образования грунтовой пробки. Если полученного отклонения недостаточно, то после одного или нескольких оборотов шнека без осевой подачи операцию корректировки можно повторить.

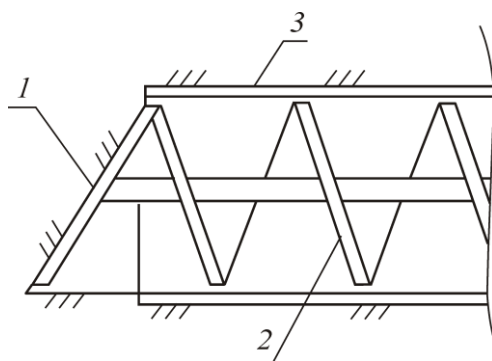


Рис. 1. Конструктивная схема отклоняющего устройства: 1 — инструмент; 2 — шнек; 3 — трубчатый кожух

Для оценки возможности достижения ожидаемого эффекта необходимо установить зависимость величины отклонения рабочего органа от угла наклона его передней поверхности к продольной оси. Задачи определения деформации грунта при произвольных граничных условиях с учетом пластических деформаций не имеют аналитического решения. Решить их можно с использованием численных методов, из которых самым распространенным в механике грунтов является метод конечных элементов [1]. Метод применяется с 1950-х годов и позволяет решать нелинейные задачи со сложными граничными условиями. В свою очередь, развитие численных методов стало толчком к более широкому изучению свойств грунтов и созданию на их основе различных моделей прочности. За это время также были созданы различные программные комплексы для расчета задач геомеханики, такие как Ansys, Solidworks, PLAXIS, PHASE2 и др.

Расчетная схема отклонения скважины представлена на рис. 2. Конструкция состоит из трубчатого кожуха 1, шарнирного соединения 2 и отклоняющего устройства 3. Отклоняющее устройство 3 представляет из себя часть обсадной трубы, передний конец которой закрыт породоразрушающим инструментом, расположенным под углом  $\alpha$  к оси шнека. Корпус отклоняющего устройства шарнирно соединен с основной трубой 1 к торцу которой приложено давление  $P$ . Скошенный торец отклоняющего устройства и его наружные цилиндрические поверхности вместе с поверхностью трубы 1 находятся в контакте с грунтом. Под действием сил реакции грунта осуществляется поворот корпуса отклоняющего устройства. Выясним, насколько эффективно будет происходить отклонение скважины. Для этого предположим, что на угол

отклонения оголовка будут влиять величина угла  $\alpha$ , давление  $P$ , свойства грунта и диаметр трубы. Для проверки этого предположения необходимо решить задачу о взаимодействии конструкции с грунтом.

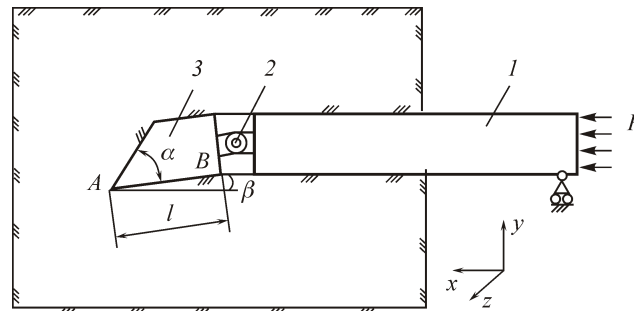


Рис. 2. Расчетная схема отклоняющего устройства

Решение тестовой задачи выполнено с помощью комплекса Ansys, в котором имеется библиотека материалов и возможность выбора модели деформации грунта. Для геологических материалов существует несколько моделей, применяемых в Ansys: Мора – Кулона, Друкера – Прагера, Кэм-Клэй (Кембриджская глина), Менетри – Вильяма, пористой упругости, Jointed Rock.

Так называемые шатровые модели (EDP Cap Model) разработаны на рубеже 1960-х годов [1 – 7] для описания поведения нормально уплотненных глин и в дальнейшем получили развитие для переуплотненных дисперсных грунтов, а также полускальных и скальных пород. К ним в первую очередь относятся модель Кэм-Клей и модифицированная модель Кэм – Клей. Модели Кэм – Клей являются упругопластическими с изотропным упрочнением. Впервые модель с логарифмической поверхностью пластичности построена в [7, 8]. Затем в [9, 10] предложена модель с эллиптической поверхностью пластичности [6], названная модифицированной моделью Кэм-Клей. Поверхность пластичности строится в координатах  $p - q$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2),$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные эффективные напряжения.

Графическая интерпретация модели приведена на рис. 2а. Линия  $q = M_p$  — линия критического состояния (ЛКС) для данного грунта и характеризует связь девиаторного напряжения с величиной  $p$ . Коэффициент  $M$  связан с углом внутреннего трения  $\varphi$  следующим соотношением [1]:

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}.$$

Считается, что для глин значения  $M$  лежат в диапазоне от 0.7 до 1.2 [6], что соответствует значению  $\varphi$  от  $18^\circ 40'$  до  $30^\circ$ .

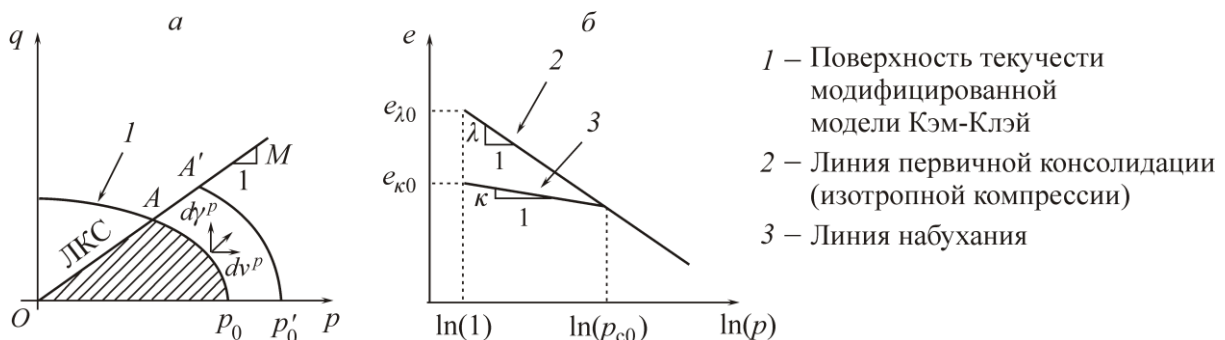


Рис. 3. Графическая интерпретация модифицированной модели Кэм-Клэй (а) и типичная характеристика для глин при изотропном компрессионном (одометрическом) тесте (б) [4]

Модель основана на следующих допущениях:

— при изотропном сжатии давлением  $p_0$  в зоне  $OA p_0$  возможны только малые обратимые упругие деформации. При выходе за пределы зоны возникают пластические деформации, причем на всей поверхности  $Ap_0$  их уровень одинаков.

— поверхность текучести также является поверхностью пластического потенциала, вектор пластических деформаций нормален к поверхности текучести (закон ассоциированного течения).

— работа пластических деформаций определяется только сдвиговыми напряжениями  $q$ , т. е.  $dA = pMd\gamma^p$  (в модели Кэм – Клэй), а в модифицированной модели —

$$dA = p\sqrt{(dv^p)^2 + (Md\gamma^p)^2},$$

где  $v^p$ ,  $\gamma^p$  — компоненты вектора пластических деформаций.

Уравнение поверхности текучести будет тогда описывать эллипс:

$$p^2 - pp_0 + \frac{q^2}{M^2} = 0.$$

Накопление пластических деформаций с ростом напряжений расширяет область упругости и ассоциированная поверхность упругости сдвигается в положение  $A'p'_0$ . Объемная пластическая деформация при этом постоянна независимо от пути нагружения и равна деформации грунта при изотропном сжатии от давления  $p_0$  до давления  $p'_0$ . Коэффициент пористости при нагрузке и набухании (разгрузке) описывается соответственно формулами:

$$e_\lambda = e_{\lambda 0} - \lambda \ln p, \quad e_k = e_{k 0} - k \ln p.$$

Для того чтобы найти коэффициенты  $\lambda$  и  $k$ , необходимо выполнить изотропный компрессионный или одометрический тест и построить зависимость  $e$  от  $\ln(p)$ . Для слабокогезивных грунтов это будет прямая линия (рис. 2б). Таким образом, необходимо определение только трех экспериментальных параметров  $M$ ,  $\lambda$  и  $k$ .

На основе расчетной схемы построена конечно-элементная 3D-модель, симметричная относительно плоскости  $XOY$  для сокращения ресурсных и временных затрат. Грунт имитировался параллелепипедом размером  $1 \times 1 \times 2$  м. Диаметр трубы и оголовка 0.219 м, длина трубы 1 м, длина оголовка  $l = 0.5$  м. Для системы оголовок – шарнир – труба были запрещены перемещения, перпендикулярные плоскости  $XOY$ , а торец трубы закреплен в вертикальном направлении. К торцу трубы приложено давление  $10^8$  Па. Задача решалась параметрически с изменением угла  $\alpha$  от  $25$  до  $60^\circ$  с шагом  $5^\circ$ , при этом фиксировалось также горизонтальное перемещение  $X_A$  точки  $A$ . Угол отклонения определялся как

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{\gamma_B - \gamma_A}{l} \right) \frac{180}{\pi},$$

где  $\gamma_A$ ,  $\gamma_B$  — вертикальные перемещения точек  $A$  и  $B$ .

Рассчитывалось также отношение отклонения к поступательному перемещению  $\beta/X_A$  для трех разных случаев плотности разбиения сетки с размером элемента 0.3, 0.1 и 0.05 м. Пример варианта расчета представлен на рис. 4, результаты сведены в таблицу.

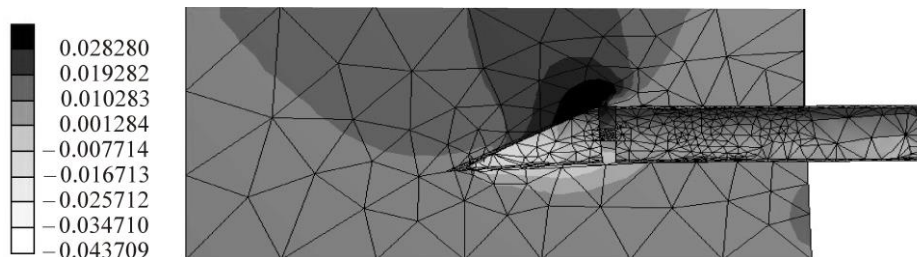


Рис 4. Поле вертикальных перемещений (м) в плоскости симметрии модели при  $\alpha = 25^\circ$

Значения угла отклонения, горизонтального перемещения и погонного отклонения от угла скоса при различной плотности КЭ-сетки

Размер элемента, м	Параметр	$\alpha$ , град.							
		25	30	35	40	45	50	55	60
0.3	$\beta$ , град.	3.92	4.03	2.97	3.19	2.32	2.70	2.20	1.70
	$X_A$ , м	0.17	0.128	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09
	$\beta/X_A$ , град./м	23.33	31.48	28.83	33.94	24.42	27.27	23.66	18.89
0.1	$\beta$ , град.	3.14	3.25	3.08	3.08	2.68	2.58	1.86	1.40
	$X_A$ , м	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07
	$\beta/X_A$ , град./м	28.81	33.51	33.48	35.4	32.68	34.40	24.47	19.18
0.05	$\beta$ , град.	2.43	2.73	2.51	2.41	2.16	1.96	1.79	1.44
	$X_A$ , м	0.086	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05
	$\beta/X_A$ , град./м	28.26	32.5	34.38	35.44	34.28	33.22	31.40	29.67

По результатам расчетов можно сделать вывод, что с увеличением угла скоса  $\alpha$  уменьшается угол отклонения  $\beta$ , который изменяется от 4 до  $1.5^\circ$  (рис. 5а), причем с ростом плотности сетки кривые становятся более сглаженными и пологими, что свидетельствует о сеточной сходимости. Так, для сетки с размером элемента 0.05 м изменение угла отклонения  $\beta$  имеет близкую к линейной форму и находится в более узком диапазоне  $2.77-1.44^\circ$ . Более гладко с уменьшением размера элемента выглядит также кривая отношения отклонения к поступательному перемещению  $\beta/X_A$  (рис. 5б). Из зависимостей, построенных по результатам расчета с размером элемента 0.05 м, можно заключить, что наиболее предпочтительные значения угла скоса оголовка будут располагаться вблизи отметки  $40^\circ$ , что может быть обусловлено близкими значениями составляющих реакции грунта в продольном и вертикальном направлениях. При увеличении угла скоса  $\alpha$  уменьшается продольная составляющая перемещения (таблица), так как повышается сила продольного сопротивления.

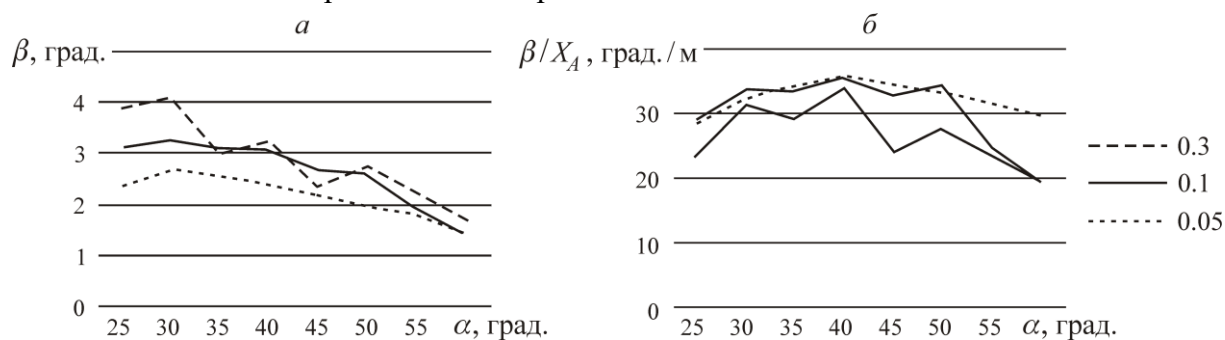


Рис. 5. Зависимости: а — угла отклонения оголовка  $\beta$  от угла скоса  $\alpha$ ; б — отношения отклонения к поступательному перемещению от угла скоса  $\alpha$  при разных размерах элементов КЭ-модели

## ВЫВОДЫ

Предложенная принципиальная схема устройства отклонения траектории скважины при горизонтально направленном шнековом бурении может быть применима при создании механизма для управления траекторией скважины непосредственно в процессе шнекового горизонтального бурения. Для получения более полного представления о характеристиках предлагаемой системы необходимы дальнейшие исследования на основе полученных результатов, в частности, расчет взаимодействия с грунтом породоразрушающего инструмента в виде диска, расположенного под углом к оси вращения и имеющего один или несколько радиальных разрезов для прохода грунта, а также установить зависимость величины отклонения скважины от геометрических параметров такого инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Danilov V. B., Smolyanitskiy V. N., and Cheshchin D. O.** Substantiation of the schematic diagrams of deflecting devices in horizontal directional drilling rigs, *Journal of Mining Science*, 2015, no. 3, pp. 106–116. (in Russian) [Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чещин Д. О. Обоснование принципиальных схем отклоняющих устройств в установках горизонтального направленного бурения скважин // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 106–116.]
2. **Danilov V. B., Smolyanitskiy V. N.** Substantiation of the method for correcting the trajectory of the auger drilling tool when driving wells in soils, *Political transport systems: materials of the IX International Scientific and Technical Conference, STU*, 2017, pp. 536–539. (in Russian) [Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н. Обоснование способа корректировки траектории шнекового бурового инструмента при проходке скважин в грунтах // Политранспортные системы: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. — СГУПС, 2017. — С. 536–539.]
3. **Devereux S.** *Drilling Technology*, Tulsa, PennWell Books, 2012 382 pp. [Девере С. Технология бурения. — Тулса: PennWell Books, 2012 — 382 с.]
4. **Fadeev A. B.** *Finite element method in geomechanics*, Moscow, Nedra, 1987. (in Russian) [Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221 с.]
5. **Goldstein R. V. and Kuznetsov S. V.** Modified cam clay model. *Fundamentals of theory and numerical analysis, Computational mechanics of continuous media*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 162–172. (in Russian) [Гольдштейн Р. В., Кузнецов С. В. Модифицированная Кэм-Клэй модель. Основы теории и численный анализ // Вычислительная механика сплошных сред. — 2016. — Т. 9. — № 2. — С. 162–172.]
6. **Shashkin A. G.** Visco-elastic-plastic model of clay soil behavior, *Urban development and geotechnical construction*, 2011, no. 13, pp. 173–205. (in Russian) [Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — № 13. — С. 173–205.]
7. **Roscoe K. H., Schofield A. N., and Wroth C. P.** On the yielding of soils, *Géotechnique*, 1958, vol. 8, issue 1, pp. 22–53.
8. **Roscoe K. H. and Schofield A. N.** Mechanical behavior of an idealized ‘wet’ clay, *Proc. 2nd European Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, 1963, vol. I, pp. 47–54.
9. **Roscoe K. H. and Burland J. B.** On the generalized stress strain behavior of wet clay, *Engineering Plasticity*, Eds. J. Heyman, F.A. Leckie, Cambridge University Press, 1968, pp. 535–609.
10. **Roscoe K. H., Schofield A. N., and Thurairajah A.** Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, 1963, vol. 13, no. 3, pp. 211–240.