



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСШИРИТЕЛЯ СКВАЖИН ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ
В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ**

Д. О. Чешчин, Б. Б. Данилов

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

Представлен расчет конструктивных параметров шнекового расширителя для скважин с криволинейной траекторией. В ходе математического моделирования найдены зависимости величины деформации грунта обсадной трубой расширителя от ее длины при движении по криволинейной траектории. Получена формула для определения максимальной длины обсадной трубы расширителя в зависимости от ее диаметра и параметров направляющего устройства.

Управляемое бурение, криволинейные скважины, расширители, бестраншейные технологии

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF A HOLE EXPANSION REAMER
MOVING ALONG A CURVED PATH IN ROCK MASS**

D. O. Cheshchin and B. B. Danilov

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

Calculations of the design parameters of auger-type hole expansion reamer for curved wells is presented. Relationships between the magnitude of soil deformation caused by the casing of expansion reamer and its length while moving along a curved path were found during mathematical modeling. The formula for determining the maximum length of the casing of expansion reamer, depending on its diameter and parameters of the steering unit was found.

Directional drilling, curved wells, expansion reamer, trenchless technologies

В технологиях разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи как подземным, так и открытым способами одним из основных методов сооружения скважин является бурение. Проходка скважин зачастую оказывается ключевой операцией для многих специальных работ в подземном строительстве при бестраншейной прокладке коммуникаций, установке криволинейных анкеров, усилении грунтовых инженерных сооружений и реализации многих других технологических процессов [1].

В последнее время при проведении подобных работ все более необходима возможность изменения траектории проходки скважины для попадания в нужную точку подземного пространства, причем как из подземной выработки, так и с поверхности Земли. Создание прототипа системы управления процессом изменения траектории проходки скважин в породном массиве — важная научно-техническая задача. Ее решение требует создания механизма формирования отклоняющего воздействия на буровой рабочий орган, определения его конструктивных параметров и технических возможностей в зависимости от физико-механических свойств породного массива, формы и размеров породоразрушающего инструмента.

Анализ способов изменения траектории движения рабочего органа при прокладке скважины в грунте проведен в ИГД СО РАН [2]. Он показал, что в наиболее работоспособных конструкциях отклоняющих механизмов используются технические решения, действие которых основано на изменении внешней формы рабочего органа и точки приложения ударного импульса.

Достаточно просто реализуются способы отклонения рабочего органа, основанные на применении в качестве отклоняющего устройства асимметричного клина. При его вращении отклоняющая сила постоянно изменяет направление своего действия, в результате чего отклонения не происходит. Для этого необходимо остановить вращение и осевым усилием воздействовать на клин. Отклонение при этом произойдет в сторону, противоположную его наклонной плоскости.

Подобные рабочие органы нашли применение главным образом в установках горизонтального направленного бурения скважин в грунте или в рыхлых горных породах [3]. На этапе корректировки траектории при отсутствии вращения скважина образуется, по сути, методом прокола, т. е. сдвига породы в радиальном направлении. Верхний предел диаметра скважин у большинства видов оборудования для осуществления прокола составляет 300–350 мм. Это ограничение обусловлено значительным возрастанием энергоемкости процесса при увеличении диаметра. Причем скважины диаметром более 200 мм приходится в большинстве случаев сооружать за несколько проходов путем последовательного увеличения диаметра расширителя. Кроме возрастания энергоемкости, при увеличении диаметра скважин, образуемых методом радиального уплотнения грунта, расширяется зона деформирования окружающего грунтового массива. Зона осязательных деформаций массива составляет 4–5 диаметров скважины. Зона заметных деформаций охватывает в два раза большую область [4]. Это явление может быть связано с риском повреждения близлежащих коммуникаций, вспучивания дневной поверхности над скважиной.

Разбуривание пилотной скважины позволит не только сократить время сооружения скважины и исключить ограничение по ее диаметру, но и снизить уровень напряжения в окружающих уплотненных слоях массива. На рис. 1 представлена схема бурового расширителя с направляющим элементом. Установка представляет собой расширитель, состоящий из обсадной трубы 1, шнеков 2 и разбуривающей коронки 3, соединенный при помощи подвижного механизма 4 с направляющим элементом 5.

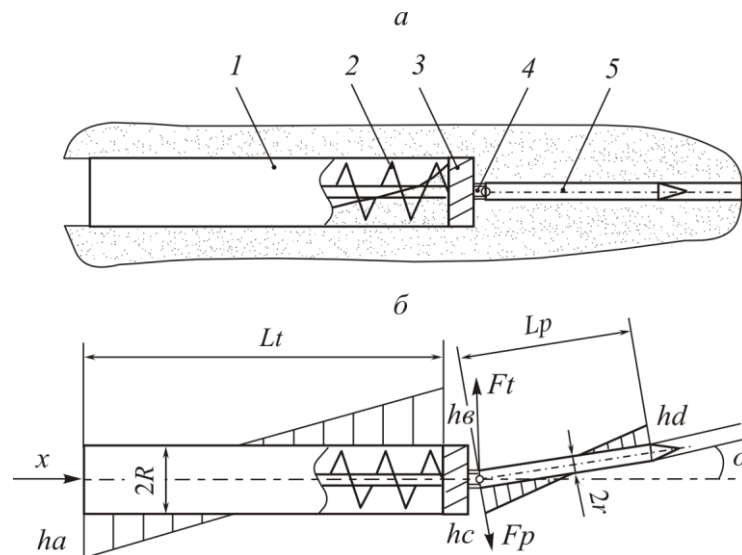


Рис. 1. Принципиальная (а) и расчетная (б) схемы бурового расширителя с направляющим элементом

Теме взаимодействия рабочих органов с породным массивом при корректировке направления движения посвящено немало работ, основанных на различных методиках [5–8]. Используя эти результаты можно определить конструктивные параметры расширителя, которые позволят осуществлять проходку по криволинейной траектории пилотной скважины.

Основываясь на работе [8], рассмотрим расчетную схему бурового расширителя скважин при движении по криволинейной траектории пилотной скважины, представленную на рис. 1б. Во время появления осевого усилия F_x , действующего на расширитель, при отклоненном на

некоторый угол α направляющем элементе, забойная часть расширителя стремится развернуться в направлении криволинейной скважины (на рис. 1 в направлении “вверх”), что вызывает появление некоторого отклоняющего усилия Ft , действующего на обсадную трубу, вследствие чего происходит деформация уплотняемого массива ha и hb . Однако при подаче осевого усилия Fx направляющий элемент стремится сохранить свое положение относительно расширителя, вследствие чего возникает усилие Fp , которое вызывает деформации массивов hc и hd . В зависимости от осевого усилия и угла отклонения направляющего элемента значения Ft и Fp определяются по формулам:

$$\begin{cases} Ft = Fx \operatorname{tg}(\alpha), \\ Fp = Fx \sin(\alpha). \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, в качестве критерия для определения конструктивных параметров расширителя принято условие, при котором деформация массива на забойной части расширителя hb будет иметь величину большую или равную деформации задней части управляемого рабочего элемента hc . При выполнении этого условия появляется возможность деформирования уплотняемого массива расширителем с сохранением требуемой криволинейной траектории.

Для определения конструктивных параметров расширителя установим их взаимосвязь с величиной осадки массива. При нагружении слоя уплотняемого массива сплошной нагрузкой осадка будет происходить за счет его уплотнения. Согласно [9] формула для определения осадки выглядит следующим образом:

$$S = ha_0 p, \quad (2)$$

где h — высота уплотняемого слоя грунта, м; a_0 — коэффициент сжимаемости грунта; p — давление на грунт, Па.

Коэффициент сжимаемости вычисляется на основе модуля деформации E_0 :

$$a_0 = \frac{\beta}{E_0}, \quad (3)$$

где β — переходный коэффициент от компрессионного модуля деформации E_0 к модулю общей деформации E (песок — 0.76, супесь — 0.72, суглинок — 0.57, глина — 0.43).

Определение высоты уплотняемого слоя выполняется из предположения, что величины давления, воспринимаемого грунтовым массивом от элемента, достаточно для его деформирования. Критерием достаточности давления служит структурная прочность грунта, т. е. величина давления на грунт, превышение которой вызывает его деформацию.

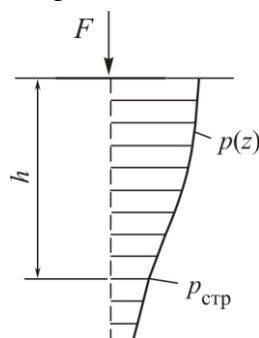


Рис. 2. Схема распределения вертикального давления в грунтовом массиве, возникающего под штампом, при действии на него сосредоточенной силы

Распределение вертикального давления в грунтовом массиве (рис. 2), возникающего под штампом, при действии на него сосредоточенной силы определяется из уравнения [9]:

$$p(z) = \frac{3F}{2\pi z^2}. \quad (4)$$

По достижении глубины $z = h$ давление уменьшится до значения структурной прочности. Следовательно, давление на глубине, превышающей значения $z = h$ не будет оказывать деформационного воздействия на массив. Толщина уплотняемого слоя составит:

$$h = \sqrt{\frac{3F}{2\pi p_{\text{стр}}}}. \quad (5)$$

Значение структурной прочности зависит от типа породного массива, а также от его пористости, и определяется на основе исследований описываемых в [10].

Определение величины возникающего давления строится на основе равновесного состояния системы (рис. 3), находящейся под усилием Ft для расширителя и Fp для направляющего органа.

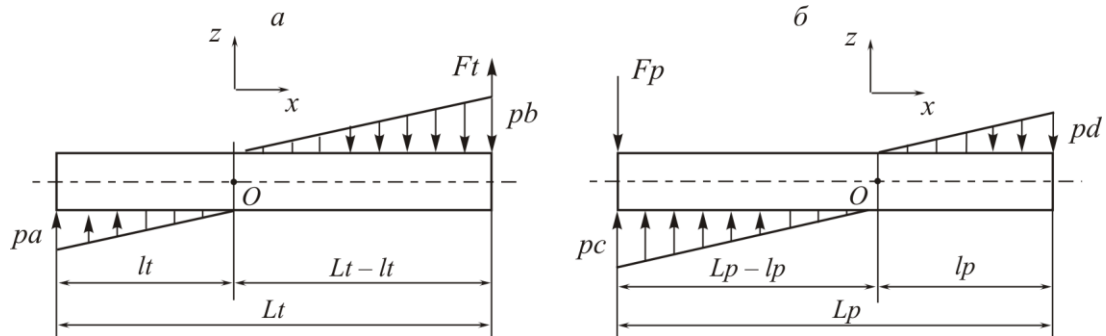


Рис. 3. Схема силового воздействия на элемент: *a* — расширитель; *б* — направляющий орган

$$\begin{cases} \Sigma F_z = 0, \\ \Sigma M_o = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему уравнений (6) с учетом вводимой величины [11]:

$$n = \frac{Lx}{lx}, \quad (7)$$

отражающей некоторое усредненное значение положения точки поворота lx на корпусе в зависимости от его длины Lx , получим формулы для определения величины давлений:

$$\begin{cases} pa = \frac{Ft(n-1)}{2RLt}, \\ pb = \frac{Ft(3n-1)}{2RLt(n-1)}, \\ pc = \frac{Fp(n-1)}{2rLp}, \\ pd = \frac{Fp(3n-1)}{2rLp(n-1)}. \end{cases} \quad (8)$$

Дифференцируя область действия давлений и определив результирующие силы на каждом малом отрезке, с помощью формул (5) и (2) рассчитываются соответствующие глубины уплотняемого слоя и величины вдавливания (осадка) корпуса в стенку скважины ha , hb , hc и hd за 1 мм проходки скважины.

В соответствии с приведенной методикой построена математическая модель, на которой определены величины вдавливания расширителя и направляющего органа. В качестве уплотняемого массива принята супесь с плотностью $\rho = 1750 \text{ кг/м}^3$, диаметр и угол отклонения направляющего элемента $d = 130 \text{ мм}$ и $\alpha = 1^\circ$ соответственно. На графиках 1, 2 и 3 рис. 5 отображены зависимости величины осадки hc направляющего элемента длиной 1, 1.5 и 2 м соответственно. Они представляют собой граничные условия для определения необходимой длины расширителя.

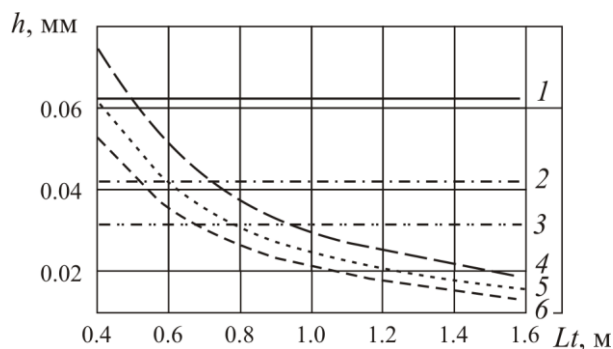


Рис. 4. Зависимости величины осадки hb расширителя от его длины

На графиках 4, 5 и 6 рис. 4 изображены зависимости величины осадки hb расширителя от его длины для диаметров обсадной трубы 250, 300 и 350 мм. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что длина первого управляемого звена обсадной трубы зависит от длины направляющего элемента и от соотношения их диаметров. Чем меньше длина направляющего элемента и больше диаметр расширителя, тем меньше должна быть длина первого звена. Максимальную длину можно определить по эмпирической формуле:

$$Lt = \frac{r}{R} Lp - 0.02 \left(\frac{Lp - 0.5}{0.5} \right). \quad (9)$$

Вышеописанный алгоритм позволяет провести предварительную оценку конструктивных параметров и технических возможностей подобного расширителя. Путем оптимизации параметров можно повысить его маневренность. Так, например, увеличить максимальную длину обсадной трубы расширителя возможно путем увеличения диаметра разбуривающей коронки относительно диаметра обсадной трубы, обеспечивая тем самым пространство для маневров расширителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Smolyanitsky B. N., Repin A. A., Danilov B. B., et al.** Enhanced-efficiency and improved-life impulse-forming machines for long borehole drilling in rocks, Novosibirsk, 2013, 204 pp. [Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. — 204 с.]
2. **Kostylev A. D., Maslakov P. A., and Smolyanitsky B. N.** Problems of creating a controlled pneumatic punch for drilling wells along a given trajectory, News of the higher institutions. Construction, 1999, no. 110, pp. 99–104 [Костылев А. Д., Маслаков П. А., Смоляницкий Б. Н. Проблемы создания управляемого пневмопробойника для проходки скважин по заданной траектории // Изв. вузов. Строительство. — 1999. — № 11. — С. 99–104.]
3. **Balakhovsky M. S.** In the Russian market – the American firm “Vermeer”, Mechanization of construction, 2000, no. 10, pp. 2–6 [Балаховский М. С. На Российском рынке – американская фирма “Vermeer” // Механизация строительства. — 2000. — № 10. — С. 2–6.]
4. **Kostylev A. D.** Analysis of well penetration by pneumatic punches, Journal of Mining Science, 2000, no. 3, pp. 95–100 [Костылев А. Д. Анализ проходки скважин пневмопробойниками // ФТПРПИ. — 2000. — № 3. — С. 95–100.]
5. **Kostylev A. D., Maslakov P. A., and Syryamin A. T.** On the interaction of the pneumatic punch with the ground when drilling curved wells, Journal of Mining Science, 1997, no. 6, pp. 78–83 [Костылев А. Д., Маслаков П. А., Сырямин А. Т. О взаимодействии пневмопробойника с грунтом при проходке криволинейных скважин // ФТПРПИ. — 1997. — № 6. — С. 78–83.]

6. **Tkach H. B.** On the penetration of wells in the ground pneumopunches, *Journal of Mining Science*, 1991, no. 6, pp. 69–77 [**Ткач Х. Б.** О проходке скважин в грунте пневмопробойниками // ФТПРПИ. — 1991. — № 6. — С. 69–77.]
7. **Repin A. A.** Ways to change the direction of the pneumatic punch in the ground during the construction of underground utilities, *Collection of works of young scientists NSUACE, Novosibirsk*, 1999, no. 2, pp. 32–40 [**Репин А. А.** Способы изменения направления движения пневмопробойника в грунте при строительстве подземных коммуникаций // Сборник трудов молодых ученых НГАСУ. — Новосибирск: НГАСУ. — 1999. — № 2. — С. 32–40.]
8. **Danilov V. B., Smolyanitsky V. N., Chanyshv A. I. and Cheshchin D. O.** Determination of Pneumatic Puncher Turn Radius during Change of Its Motion Path in Soil, *Institute of Mining Science*, 2018, no. 3, pp. 43–50 [**Данилов В. Б., Смоляницкий В. Н., Чанышев А. И., Чещин Д. О.** Определение радиуса поворота пневмопробойника при изменении траектории его движения в грунте // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 43–50.]
9. **Doroshkevich N. M., Klejn G. K., and Smirenkin P. P.** Grounds and basements, *Textbook for technical schools, Moscow, Higher School*, 1972, 256 pp. [**Дорошкевич Н. М., Клейн Г. К., Смиреникин П. П.** Основания и фундаменты: учебник для техникумов. — М.: Высш. шк., 1972. — 256 с.]
10. **Osipova M. A. and Sviridov V. L.** Structural strength as a criterion for assessing the deformability of loess soils, *Polzunovskiy bulletin*, 2013, no. 4-1, pp. 26–28 (in Russian) [**Осипова М. А., Свиридов М. А.** Структурная прочность как критерий оценки деформируемости лессовых грунтов // Ползуновский вестник. — 2013. — № 4-1. — С. 26–28.]
11. **Danilov V. B., Rechkin A. A., and Cheshchin D. O.** Experimental positioning of controllable pneumatic piercing machine pivot, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2018, no. 7, pp. 116–123 [**Данилов В. Б., Речкин А. А., Чещин Д. О.** Экспериментальное определение местоположения центра поворота корпуса управляемого пневмопробойника // ГИАБ. — 2018. — № 7. — С. 116–123.]