

УДК 621.23.05

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ПОВОРОТА ПНЕВМОПРОБОЙНИКА
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТРАЕКТОРИИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ В ГРУНТЕ**

Б. Б. Данилов¹, Б. Н. Смоляницкий^{1,3}, А. И. Чанышев^{1,2}, Д. О. Чещин¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет экономики и управления,
ул. Каменская, 56, 630099, г. Новосибирск, Россия

³Сибирский государственный университет путей сообщения,
ул. Д. Ковальчук, 191, 630049, г. Новосибирск, Россия

Для обеспечения точности проходки скважин в грунте необходима корректировка траектории движения пневмопробойника за счет отклонения задней части его корпуса относительно продольной оси. Приведена конструктивная схема механизма управления траекторией, позволяющая модернизировать серийные пневмопробойники. Представлено решение задачи определения усилий, необходимых для изменения траектории пневмопробойника при проходке скважин в грунте. Грунтовый массив рассматривается как жесткопластическая среда, а отклоняющее устройство пневмопробойника как недеформируемое тело. Задача решается в два этапа: внедрение отклоняющего устройства в грунтовый массив и движение пневмопробойника в грунте с отклоненной на некоторый угол хвостовой частью. Определены нагрузки, действующие на хвостовую часть, необходимые для изменения траектории движения пневмопробойника в грунте и радиус траектории при повороте в грунте под действием отклоняющего усилия.

Скважина, пневмопробойник, отклоняющее устройство, траектория, радиус поворота, грунт, отклоняющее усилие

DOI: 10.15372/FTPRPI20180305

Развитие технологий разведки и добычи полезных ископаемых, увеличение длин транспортных и инженерных коммуникаций требует обеспечения их точного выхода в заданную область подземного пространства за счет направленного движения бурового рабочего органа в породном массиве по заданной траектории. Это позволяет сохранить природный ландшафт и экологический баланс в местах проведения работ, а также снизить негативное влияние на условия проживания людей в такой зоне.

В подземном строительстве в большинстве случаев проходка скважин осуществляется в приповерхностном грунтовом слое. Так как грунт при механическом воздействии способен уплотняться, то широкое распространение получил способ формирования скважины, основанный на деформации грунта в радиальном направлении при статическом или ударном внедрении в него рабочего органа (прокол). Наиболее эффективным техническим средством для реализации метода прокола являются пневмопробойники.

Дальнейшее развитие технологии виброударного прокола пневмопробойниками сдерживается отсутствием гарантий выхода скважины в заданную точку подземного пространства, что обусловлено отклонением машины от первоначально заданного направления при движении

в грунте [1, 2]. Создание управляемых пневмопробойников, изменяющих траекторию движения по команде оператора, позволяет решить эту проблему за счет компенсирования всех факторов, являющихся причиной случайного отклонения от заданного курса.

На рис. 1 приведена конструктивная схема механизма управления траекторией [3], разработанная в ИГД СО РАН и позволяющая использовать в качестве ударного привода хорошо зарекомендовавшие себя ударные машины — пневмопробойники [4]. Эта схема, в отличие от приведенной в [4, 5], не увеличивает диаметр корпуса машины, что дает возможность сохранить скорость проходки скважины. Кроме того, заднее расположение отклоняющего элемента упрощает конструкцию механизма управления, а его конструкция не нарушает целостность стенок скважины.

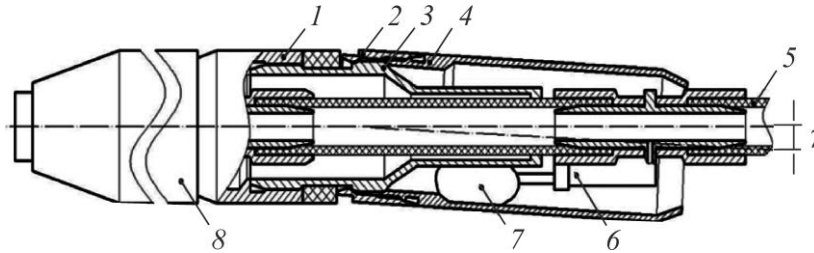


Рис. 1. Схема механизма управления траекторией пневмопробойника (при отклоненной задней части)

Механизм представляет собой отклоняющуюся заднюю часть 4, которая шарнирно соединяется с задней гайкой 1 пневмопробойника 8 посредством гайки 2 и втулки 3. Создание отклоняющего усилия обеспечивает вмонтированная в устройство эластичная камера 7, которая управляется с помощью механизма управления 6. Для выбора направления, в котором необходимо отклонить пневмопробойник, поворачивают механизм 6 с помощью воздухоподводящего шланга (рукава) 5 [6].

Для обоснования динамических параметров управляемого пневмопробойника и радиуса его поворота в грунте при корректировке траектории движения необходимо найти усилие, требуемое для внедрения отклоняемого устройства в стенку скважины, определить сопротивление или реакцию грунта при движении отклоняющего устройства, а также момент силы сопротивления, вызывающий поворот пневмопробойника. Основная цель при этом заключалась в получении достаточно приемлемых инженерных расчетных формул.

При определении силы взаимодействия элементов корпуса управляемого пневмопробойника с грунтом в основу расчета положено решение задачи о формировании грунтовой полости коническим расширителем при его ударном нагружении в рамках плоской модели равновесного состояния кольцевого слоя грунта с нагруженной изнутри полостью при допущении, что движение пневмопробойника происходит уже при отклоненной на некоторый угол γ задней части корпуса [7]. В этом случае распределение давления грунта, действующего на корпус пневмопробойника при его продольном перемещении, будет иметь вид, показанный на схеме рис. 2.

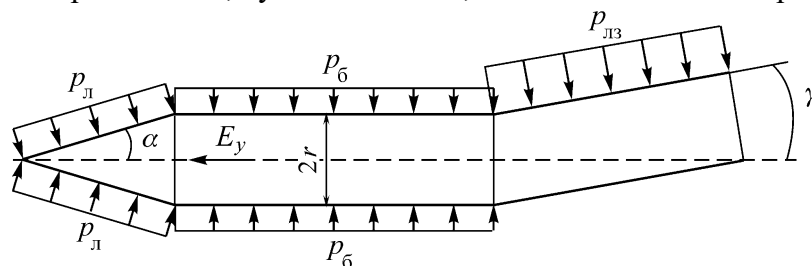


Рис. 2. Схема действия давления грунта на корпус пневмопробойника при его продольном перемещении

Согласно этой схеме, на корпус действуют лобовое давление грунта p_l , его нормальное боковое давление на основную цилиндрическую часть корпуса p_6 , а также давление $p_{лз}$ на отклоненную заднюю часть, управляющую изменением направления движения пневмопробойника в грунте. Лобовое и боковое давление связаны соотношением $p_6 = \psi p_l$, где $\psi = 0.15 - 0.30$ — коэффициент пропорциональности [8].

Полученная в [7] обобщенная аппроксимация относительного среднего давления, действующего на коническую поверхность рассекателя, представлена в удобной для практического применения линейной форме:

$$p_l = b_l - a_l r,$$

где a_l и b_l — коэффициенты линейной аппроксимации; r — радиус корпуса пневмопробойника, м.

Для практического использования в дальнейших вычислениях коэффициенты линейной аппроксимации среднего давления для супеси в зависимости от пористости грунта имеют вид

$$a_l = 1.146 - e \cdot 0.88, \quad b_l = 6.092 - e \cdot 4.76.$$

Нормативные значения основных механических характеристик грунтов приведены в [9].

На рис. 3 представлена схема сил, действующих на корпус пневмопробойника и отклоненную часть.

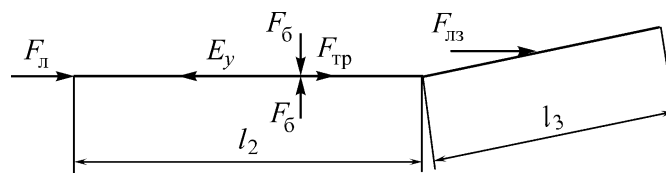


Рис. 3. Схема действия сил на корпус пневмопробойника при его продольном перемещении в грунте

Определение силы лобового сопротивления строится на допущении, что фактическая скорость перемещения пневмопробойника изменяется в диапазоне, не превышающем $0 - 3$ мм/с, тогда значения F_l и $F_{лз}$ рассчитываются для его средней скорости. С учетом относительного среднего давления p_l формула для нахождения лобового сопротивления внедрению в грунт передней конусной части корпуса пневмопробойника [7] примет вид

$$F_l = \pi r^2 p_l P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\alpha)}{1 - \mu_1 \operatorname{tg}(\alpha)} \right] \quad (1)$$

или

$$F_l = S_{\text{сеч}} p_l P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\alpha)}{1 - \mu \operatorname{tg}(\alpha)} \right],$$

где r — радиус корпуса пневмопробойника, м (рис. 2); α — угол наклона образующей конуса передней части к его оси симметрии; $S_{\text{сеч}} = \pi r^2$ — площадь поперечного сечения цилиндрической части корпуса; P^* — давление участка грунтового массива на корпус пневмопробойника, Па; μ — коэффициент трения “металл – грунт”:

$$P^* = \rho g h + P_{\text{атм}},$$

здесь ρ — плотность грунта в естественном состоянии, кг/м³; $g = 9.81$ м/с² — ускорение свободного падения; h — глубина заложения скважины, м; $P_{\text{атм}} = 101325$ Па — атмосферное давление.

Внешнее боковое давление со стороны массива изменяется пропорционально пассивному боковому давлению p_6 при обжатии грунтом взаимодействующих с ним элементов пневмопробойника:

$$F_6 = 2\pi r l_2 p_6 P^* \quad \text{или} \quad F_6 = S_{6п} p_6 P^*,$$

где $S_{6п} = 2\pi r l_2$ — площадь боковой поверхности корпуса пневмопробойника.

Сила трения на поверхности корпуса, возникающая от силы бокового давления, равна $F_{тр} = F_6 \mu$.

Для определения лобового сопротивления на отклоненной части используется формула, аналогичная (1):

$$F_{лз} = S_{сеч.з} p_{лз} P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\gamma)}{1 - \mu \operatorname{tg}(\gamma)} \right], \quad (2)$$

где $S_{сеч.з}$ — максимальная площадь поперечного сечения отклоненной задней части, погруженной в стенку скважины; γ — угол отклонения задней части.

При отклонении задней части корпуса на угол γ максимальная площадь поперечного сечения $S_{сеч.з}$ будет находиться на ее краю. Тогда $S_{сеч.з} = 2r l_3 \sin(\gamma)$.

С учетом (2) формула для определения лобового сопротивления отклоненной части примет вид

$$F_{лз} = 2r l_3 \sin(\gamma) p_{лз} P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\gamma)}{1 - \mu \operatorname{tg}(\gamma)} \right].$$

Под действием этой силы возникает поперечное усилие F_z , отклоняющее пневмопробойник от прямолинейного направления при его движении в грунте. Схема сил, действующих в данном случае на отклоненную часть корпуса пневмопробойника, представлена на рис. 4. Согласно ей, поперечное усилие F_z определяется из формулы $F_z = F_{лз} \operatorname{tg}(\gamma)$.

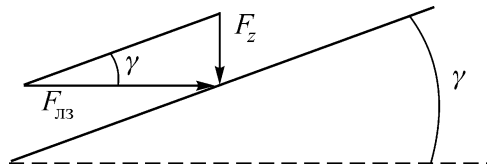


Рис. 4. Схема сил, действующих на отклоненную часть корпуса пневмопробойника при изменении направления движения

Отметим, что отклоненная часть, по сравнению с лидирующей частью пневмопробойника, взаимодействует с более плотным грунтовым массивом. В [10] плотность грунта в этой зоне по отношению к плотности грунта в естественном состоянии изменяется по мере удаления от оси скважины (рис. 5).

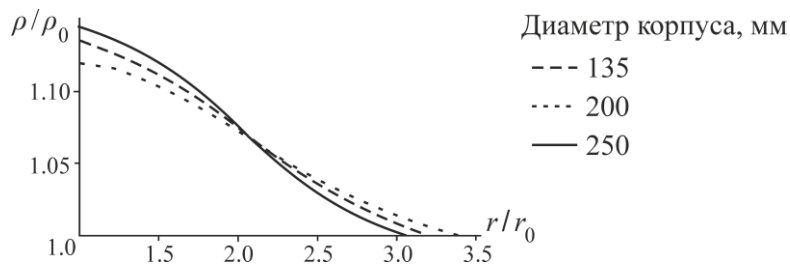


Рис. 5. Плотность грунта в зависимости от расстояния до оси скважины при разном диаметре корпуса

Поэтому при расчете сил, действующих на отклоненную часть пневмопробойника, необходимо учитывать изменение плотности грунтового массива у коэффициентов линейной аппроксимации a_n и b_n .

Таким образом, для расчета сил сопротивления, действующих на пневмопробойник с отклоненной задней частью со стороны грунта, следует использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F_n = \pi r^2 p_n P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\gamma)}{1 - \mu \operatorname{tg}(\gamma)} \right], \\ F_{\text{тр}} = 2\pi r l_2 \mu p_n \psi P^*, \\ F_{\text{пз}} = 2r l_3 \sin(\gamma) p_{\text{пз}} P^* \left[\frac{1 + \mu \operatorname{ctg}(\gamma)}{1 - \mu \operatorname{tg}(\gamma)} \right], \\ F_z = F_{\text{пз}} \operatorname{tg}(\gamma). \end{cases} \quad (3)$$

Для определения радиуса криволинейной траектории движения пневмопробойника в грунте R принята схема, представленная на рис. 6, которая основана на допущении, что продольное перемещение пневмопробойника за один ударный импульс E_y несоизмеримо мало по сравнению с радиусом криволинейной траектории, поэтому центр траектории можно считать неподвижным. Предполагается, что за один ударный импульс E_y пневмопробойник с отклоненной задней частью продвигается в грунте на величину x_1 . За это же время сила на отклоненной части создает момент, поворачивающий пневмопробойник на угол φ .

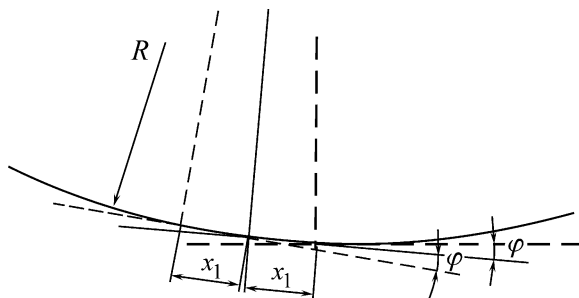


Рис. 6. Определение радиуса кривизны траектории движения пневмопробойника

Представив криволинейную траекторию скважины как полином с достаточно малыми отрезками, примем допущение о разделении криволинейного движения на продольное перемещение пневмопробойника на величину x_1 и поворот его корпуса на угол φ . Тогда, согласно рис. 6, радиус кривизны вычисляется по формуле

$$R = \frac{x_1}{\operatorname{tg}(\varphi)}. \quad (4)$$

Полное перемещение пневмопробойника за один удар, т. е. без учета упругой реакции грунта и силы отдачи от действия на корпус давления сжатого воздуха, составит

$$x_1 = \frac{E_y k_y}{\sum F_i^x}, \quad (5)$$

где E_y — энергия удара пневмопробойника, Дж; $\sum F_i^x$ — сумма проекций сил сопротивления на ось действия ударного импульса; k_y — коэффициент передачи ударного импульса на рабочий орган.

Величина последнего вычисляется следующим образом [11]:

$$k_y = \eta \left[\frac{1 + k_B}{1 + \eta} \right]^2,$$

где η — соотношение масс ударника и корпуса машины; $k_B = 0.45$ — коэффициент восстановления скорости.

С учетом системы (3) формула для определения перемещения пневмопробойника за один удар запишется так:

$$x_1 = \frac{E_y k_y}{F_{л} + F_{тр} + F_{лз}}.$$

Угол поворота корпуса пневмопробойника рассчитывается по величине вдавливания (осадки) корпуса в стенку скважины под действием поперечной силы.

Определение величины возникающего давления строится на основе равновесного состояния системы, находящейся под усилением F_z (рис. 7):

$$\begin{cases} \sum F_z = 0, \\ \sum M_0 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

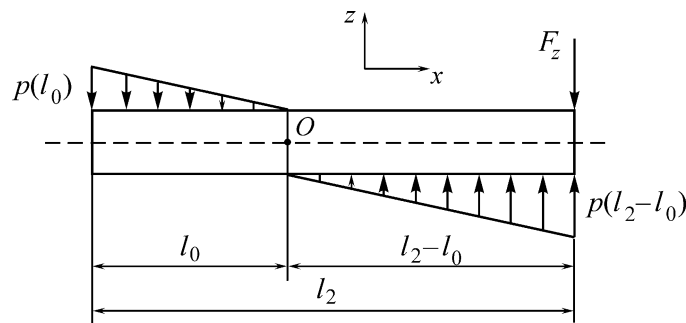


Рис. 7. Схема распределения давлений $p(x)$ на корпусе пневмопробойника при его повороте вокруг точки O от усилия F_z

Решая систему уравнений (6) с учетом вводимой величины $n = l_2 / l_0$, отражающей некоторое усредненное положение точки поворота l_0 на корпусе в зависимости от его длины l_2 , получим формулы для давлений:

$$\begin{cases} p(l_0) = \frac{F_z(n-1)}{2rl_2}, \\ p(l_2-l_0) = \frac{F_z(3n-1)}{2rl_2(n-1)}. \end{cases} \quad (7)$$

В основе расчета осадки слоя грунта от сил, действующих со стороны корпуса пневмопробойника, лежит формула, выведенная в [12]:

$$S(x) = \frac{hp(x)\beta}{E_0}. \quad (8)$$

Найдем высоту уплотняемого слоя из предположения, что величины давления, воспринимаемого грунтовым массивом от отклоняемой части корпуса пневмопробойника, достаточно для его деформирования. Критерием достаточности служит структурная прочность грунта [13], т. е. величина давления на грунт, превышение которой вызывает его деформацию.

Таким образом, с учетом формулы, определяющей распределение давления в грунтовом массиве [12], соответствующие глубины уплотняемого слоя запишутся в виде

$$\begin{cases} h(l_0) = \sqrt{\frac{p(l_0) r l_2 \frac{1}{n}}{\pi p_{\text{стр}}}}, \\ h(l_2 - l_0) = \sqrt{\frac{p(l_2 - l_0) r l_2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)}{\pi p_{\text{стр}}}}. \end{cases} \quad (9)$$

Подставив значения (7) и (9) в (8), получим величину вдавливания (осадку) корпуса в стенку скважины $S(l_0)$ и $S(l_2 - l_0)$, после чего можно определить угол поворота корпуса:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{S(l_2 - l_0) + S(l_0)}{l_2} \right]. \quad (10)$$

После подстановки выражений (5) и (10) в формулу (4) находится радиус криволинейной скважины. Для дальнейшего практического применения можно перейти от величины радиуса криволинейной скважины R к величине вертикального смещения корпуса на 1 м скважины Δy :

$$\Delta y = R - \sqrt{R^2 - 1}.$$

ВЫВОДЫ

В рамках плоской модели равновесного состояния кольцевого слоя грунта с нагруженной изнутри полостью получены формулы для расчета усилий, действующих на отклоненную заднюю часть пневмопробойника при изменении траектории его движения в грунте. Определены зависимости смещения корпуса на одном метре длины скважины при сильном воздействии на него от конструктивных параметров отклоняющего устройства. Установлено, что разделение криволинейного движения на продольное и вращательное с поворотом корпуса пневмопробойника на угол φ при прохождении прямолинейного участка позволяет определить радиус траектории движения пневмопробойника в грунте при различных значениях конструктивных параметров отклоняющего механизма и величины ударного импульса. Выведена инженерная формула, позволяющая рассчитать величину ударного импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костылев А. Д., Чепурной Н. П. Исследование точности проходки скважин пневмопробойниками с различной цилиндрической частью корпуса // Пневмогидравлические силовые импульсные системы. Ч. 2. — Новосибирск, 1969. — С. 62–70.
2. Shadrina A., Saruev L., and Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2016, 43.
3. Пат. 156648 РФ. Устройство для изменения направления движения пневмоударной машины / Б. Н. Смоляницкий, Б. Б. Данилов, Н. Д. Сырямин, Д. О. Чещин; заявитель и обладатель Институт горного дела СО РАН. — № 2015115184/03; заявл. 22.04.2015 // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 31.
4. Рацкевич Г. И., Козлов В. А., Костылев А. Д. Применение пневмомашин ударного действия для устройства подземных сооружений // Механизация стр.-ва. — 1978. — № 5. — С. 8–10.

5. **Костылев А. Д.** Краткий анализ способов и схем устройств для управления направлением движения пневмопробойника в грунте // Изв. вузов. Строительство. — 1998. — № 10. — С. 112–115.
6. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чанышев А. И., Чецин Д. О.** Определение усилий для изменения траектории движения пневмопробойника в грунте // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 69–79.
7. **Исаков А. Л., Земцова А. Е.** Задача о расширении грунтовой полости при бестраншейной замене подземных коммуникаций // ФТПРПИ. — 1998. — № 3. — С. 95–100.
8. **Воронцов Д. С., Ткачук А. П.** Определение скорости проходки горизонтальной скважины грунтопроходчиком [Электронный ресурс] // СтройМного: электронный научный журнал. — 2016. — № 2(3). Режим доступа URL: <http://srtoymnogo.com/science/tach/opredelenie-skorosti-prokhodki-gori/>.
9. **Тищенко И. В.** Создание оборудования для проходки скважин с частичным уплотнением и экскавацией грунта: дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2006. — 124 с.
10. **Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д. и др.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.
11. **Гилета В. П.** Создание и совершенствование пневмоударных устройств для проходки горизонтальных скважин способом виброударного продавливания: дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск, 1997. — 287 с.
12. **Дорошкевич Н. М., Клейн Г. К., Смиренин П. П.** Основания и фундаменты: учеб. для техникумов. — М.: Высш. шк., 1972. — 256 с.
13. **Осипова М. А., Свиридов В. Л.** Структурная прочность как критерий оценки деформируемости лессовых грунтов // Ползуновский вестник. — 2013. — № 4-1. — С. 26–28.

Поступила в редакцию 21/III 2018