

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВУРОВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ

И. Д. Гессе

В настоящее время в поисковом и разведочном бурении все большее распространение получают способы проходки рыхлых пород, основанные на их уплотнении. К таким способам относятся задавливание и вибробурение [8]. Эти способы применяются при проходке пород I—III категорий по буримости для классификации вращательного бурения и обладают высокой механической скоростью.

Образование скважины методом уплотнения можно пояснить следующими соображениями. Рыхлые породы в естественном залегании обладают определенной пористостью n_1 , численно характеризующейся отношением объема пор V_n' к общему объему породы V [6],

$$n_1 = \frac{V_n'}{V}.$$

Эта величина в зависимости от гранулометрического состава и генезиса пород составляет 20—90%.

Пористость обусловлена наличием макро- и микропустот между частицами породы, имеющими неправильную форму и расположенными далеко не по принципу наиболее плотной упаковки. Благодаря этому имеется возможность проходить эти породы не путем их разрушения и выноса на поверхность, а уплотнением их в стенки скважины.

Пусть в породе внедряется под действием силы P твердое недеформируемое тело цилиндрической формы радиуса r_1 (рис. 1). Это тело производит деформацию скелета грунта только за счет уменьшения объема пор, так как материал скелета практически недеформируем.

С достаточной для такого расчета точностью можем предположить, что уплотнение происходит равномерно в зоне кольцевого цилиндра, ограниченного радиусами r_1 и r_2 , причем пористость породы в этом цилиндре уменьшается с n_1 до

$$n_2 = \frac{V_n''}{V},$$

где V_n'' —объем пор грунта в кольцевом цилиндре с радиусами r_1 и r_2 ;
 V —объем всей породы в цилиндре радиуса r_2 .

Таким образом, скважина образуется за счет уменьшения пористости окружающей ее породы, и объем скважины будет равен

$$V_{\text{скв}} = V_{\text{п}}' - V_{\text{п}}'' \quad (1)$$

Из этого равенства можно найти, как далеко происходит уплотнение грунта, т. е. радиус r_2 . Расчет производится для цилиндров единичной длины.

Выразив величины, входящие в формулу (1), через радиусы r_1 и r_2 и пористости n_1 и n_2 , находим выражение для r_2

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{1-n_2}{n_1-n_2}}.$$

Безразмерную величину

$$\sqrt{\frac{1-n_2}{n_1-n_2}} = A \quad (2)$$

назовем *показателем уплотняемости*.

В таблице приведены численные значения показателя уплотняемости A , вычисленные по формуле (2) на основе литературных данных о наиболее распространенных величинах пористости пород n_1 , а также о минимальных значениях пористости n_2 [3].

Кольцевая зона пород с пористостью n_2 и образует стенки скважины, которые вследствие увеличенной плотности породы довольно устойчивы и в большинстве случаев не осыпаются.

Сила P представляет собой либо статическую нагрузку (задавливание), либо периодически меняется по величине (вибробурение). В том и другом случаях она передается от бурового агрегата к наконечнику через колонну буровых труб. Это является главным недостатком упомянутых двух способов.

Как при задавливании, так и при вибробурении значительная часть этой силы уходит на продольный изгиб буровой штанги в скважине и создает большие усилия трения. Поэтому наиболее рациональным

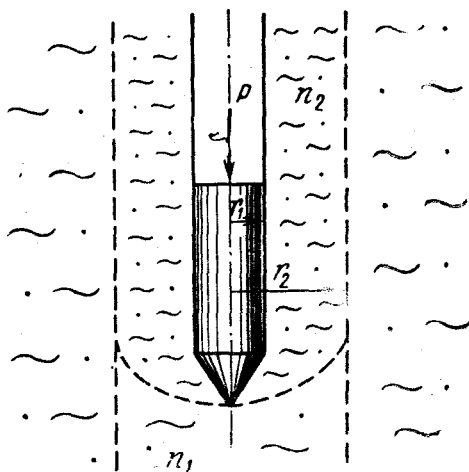


Рис. 1. К расчету винтобурового наконечника

Численные значения A

Породы	Пористость		Показатель уплотняе- мости A
	наиболее распростра- ненная n_1	минималь- ная n_2	
Гравелистые	0,22—0,38	0,19	5,20—2,06
Пески	0,26—0,48	0,20	3,65—1,69
Глины	0,32—0,60	0,22	2,80—1,38

был бы такой способ уплотнения, при котором необходимое для проходки усилие создавалось на самом буровом наконечнике. Тогда потери энергии в бурильной колонне становятся минимальными. Эта задача решается применением винтobурового наконечника, изображенного на рис. 2.

Наконечник имеет винтовую лопасть 1 и уплотнитель, состоящий из конической 2 и цилиндрической 3 частей. Вверху он заканчивается хвостовиком 4, через который ему передается крутящий момент.

При правом вращении наконечника на его винтовой лопасти, находящейся в уплотненной зоне породы с радиусами r_1 и r_2 (рис. 1), образуется осевое усилие, которое и заставляет конус 2 сминать рыхлую породу и уплотнять ее в стенки скважины. Таким образом, благодаря винтовой лопасти крутящий момент преобразуется в полезное осевое усилие, приложенное к самому наконечнику, а

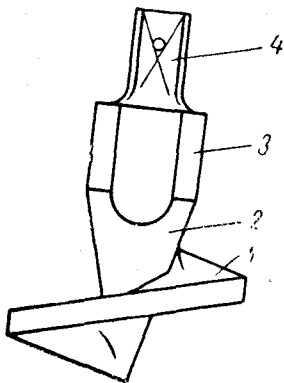


Рис. 2. Схема устройства винтobурового наконечника

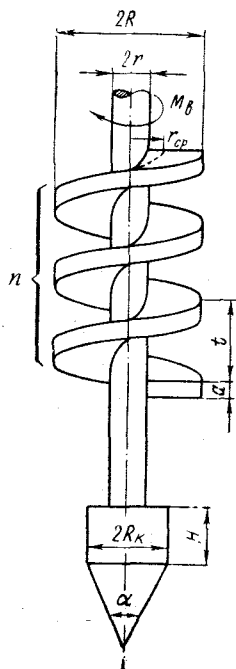


Рис. 3. Расчетная модель винтobурового наконечника

не к верху бурильной колонны. При реверсе вращения будет происходить вывинчивание наконечника.

Выбор размеров наконечника должен производиться с таким условием, чтобы винтовая лопасть данного шага и диаметра обеспечивала тянущее усилие, превосходящее сопротивление конуса вдавливанию в горную породу.

Осевые усилия, действующие в процессе бурения на винтовой бур и штангу. В соответствии с принципом, положенным в основу данного способа проходки скважины, расчетная модель бурового наконечника должна состоять из двух основных частей (рис. 3): а) винтовой нарезки с шагом t , толщиной витков a , радиусами r и R и числом полных витков n (целое или дробное число), предназначенной для преобразования крутящего момента в осевое усилие, необходимое для проходки; б) уплотнителя, состоящего из конуса с углом при вершине α и радиусом основания R_k и цилиндра радиусом R_k и высотой H , необходимого для уплотнения породы.

Поэтому анализ действующих на наконечник усилий проведем для каждой из упомянутых частей в отдельности и затем сопоставим их.

Усилия, действующие на винтовую нарезку. Пусть на создание винтовой нарезкой осевого усилия расходуется крутящий момент M_v (рис. 3). Тогда, согласно известной формуле, на винтовой нарезке должно возникнуть осевое усилие

$$P_v = \frac{M_v}{r_{cp} \operatorname{tg}(\beta + \rho)}, \text{ кг},$$

где r_{cp} —средний радиус винтовой нарезки, см; β —угол подъема винтовой линии на радиусе r_{cp} ; ρ —угол трения горной породы о накопчик.

Но эта формула предназначена для движения винта в абсолютно жесткой гайке и не учитывает возможной ее деформации. В рассматриваемом случае роль гайки играет горная порода. По этой причине реальная осевая сила будет ограничена прочностью взаимодействующей с винтом породы на смятие P_{cm} и на сдвиг $P_{сдв}$: $P_v = P_{cm} + P_{сдв}$. Выраженное через геометрические параметры осевое усилие

$$P_v = \frac{\theta}{2} (R^2 - r^2) \sigma_{cm} + 2\pi n R (t - a) \tau_{сдв},$$

где θ равно 2π при числе витков $n \geq 1$ и $2\pi n$ при $0 < n \leq 1$; σ_{cm} —предел прочности породы на смятие, кг/см²; $\tau_{сдв}$ —предел прочности породы на сдвиг, кг/см².

Усилия, действующие на уплотнитель. На уплотнитель, вдавливаемый в породу усилием P_k (рис. 4), действуют сила $P_{деф}$, с которой порода сопротивляется деформации, и усилие трения P_t , возникающее на конической и цилиндрической поверхностях, т. е.

$$P_k = P_{деф} + P_t^k + P_t^n. \quad (3)$$

Усилие деформации породы $P_{деф} = \sigma_{cm} F_k \sin \frac{\alpha}{2}$, где $F_k = \frac{\pi R_k^2}{\sin \frac{\alpha}{2}}$ — площадь поверхности конуса, см². Подставляя значение F_k , получим $P_{деф} = \sigma_{cm} \pi R_k^2$.

Усилие трения можно определить из следующих соображений. При вдавливании конуса вдоль его образующих возникает распределенная сила трения T_t^k , которую можно заменить равнодействующей P_t^k , направленной по оси конуса. Сделав соответствующие подстановки, получаем

$$P_t^k = \sigma_{cm} \pi R_k^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} f_{пр}^k,$$

где

$$f_{пр}^k = f \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 R_k^2}{t^2}}}.$$

Усилие P_t^n , потребное для преодоления трения цилиндрической поверхности радиусом R_k и высотой H , будет определяться выражением

$$P_t^n = 2\pi R_k H f_{пр}^n \xi \frac{\gamma h}{10},$$

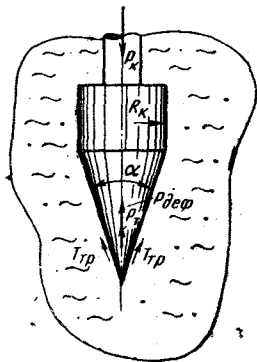


Рис. 4. Усилия, действующие на уплотнитель

где h —глубина скважины, m ; γ —объемный вес породы, $г/см^3$; ξ —коэффициент бокового давления; $f_{пр}^u$ —приведенный коэффициент трения, определяемый по формуле

$$f_{пр}^u = f \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R_k^2}{t_2}}}.$$

Общее усилие, согласно формуле (3), будет равно

$$P_k = \sigma_{см} \pi R_k^2 \left(1 + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} f_{пр}^k + 2f_{пр}^u \right),$$

где принято допущение $R_k = H$.

Осевые силы трения штанги о стенки скважины могут возникнуть в результате изгиба штанги от центробежных сил либо при потере ею устойчивости; эти усилия весьма невелики и поэтому в расчет не принимаются.

Определение параметров наконечника. Рассуждая аналогично И. И. Цюрупе [7], напишем условие равновесия бурового наконечника: $\vec{P}_в = \vec{P}_к = 0$.

Переписанное в скалярной форме при подстановке значений $P_в$ и $P_к$, это условие будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_{см} \frac{\theta}{2} (R^2 - r^2) + 2\pi n R(t-a) \tau_{сдв} = \sigma_{см} \pi R_k^2 \left(1 + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} f_{пр}^k + 2f_{пр}^u \right). \quad (4)$$

Левая часть уравнения характеризует тянущую способность винта в данной породе, а правая—противодействие конической части вдавливанию при вращении.

Это уравнение может быть положено в основу принципа определения геометрических параметров бурового наконечника. При этом некоторые из параметров назначаются из общих соображений, другие—с учетом технологичности изготовления наконечника, и тогда уравнение (4) будет представлять собой неявное задание функциональной зависимости между R и R_k при прочих параметрах, принятых постоянными.

Для упрощения вида этого уравнения поделим обе его части на $n\pi\sigma_{см} \neq 0$ и заменим величину $\frac{\tau_{сдв}}{\sigma_{см}}$ весьма близкой ей величиной $\operatorname{tg} \varphi$, где φ —угол внутреннего трения породы. Тогда при $0 < n \leq 1$ уравнение, переписанное по степеням R , примет вид

$$R^2 + 2(t-a) \operatorname{tg} \varphi \cdot R - \frac{1}{n} \left[r^2 + R_k^2 \left(1 + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} f_{пр}^k + 2f_{пр}^u \right) \right] = 0.$$

Уравнение (4) имеет только один положительный корень

$$R_1 = \sqrt{(t-a)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + \frac{1}{n} \left[r^2 + R_k^2 \left(1 + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} f_{пр}^k + 2f_{пр}^u \right) \right]} - (t-a) \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

Это выражение представляет собой соотношение в явном виде между R_1 и R_k , при котором тянущая сила винта равна противодействию конуса. Чтобы могло осуществиться движение наконечника, наружный радиус винтовой лопасти R должен быть больше R_1

$$R = k R_1, \quad (6)$$

где k —коэффициент запаса тянущей силы (по экспериментальным данным $k=1,1 \div 1,2$).

В выражении (5) величины n , α , $f_{пр}^k$, $f_{пр}^u$, r , a принимаются постоянными из следующих соображений. Число витков n берется равным 0,75, так как при больших значениях возможно заклинивание крупных кусков породы между витками. Угол конуса α выбирается в пределах 30—40°, что обеспечивает отсутствие уплотненного ядра перед конусом и в то же время небольшие величины трения по его поверхности [2]. Приведенные коэффициенты трения $f_{пр}^k$ и $f_{пр}^u$ в этой формуле можно принять равными 0,1. Величины r и a выбираются с учетом технологии изготовления винтовых наконечников. Обычно $r=15 \div 16$ мм, $a=10 \div 12$ мм.

При подстановке числовых значений указанных величин в формулу (5) она примет вид:

$$R_1 = \sqrt{(t-1)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + 3 + 1,8R_k^2} - (t-1) \operatorname{tg} \varphi, \text{ см}, \quad (7)$$

где линейные величины выражены в сантиметрах.

Таким образом, наружный радиус винтовой лопасти R_1 является функцией геометрических параметров наконечника t и R_k , а также угла трения породы φ . Угол трения различных рыхлых пород имеет следующие значения [5]:

	φ , град.
Глины с различной влажностью и коэффициентом пористости 0,41—1,1	13—25
Пески при коэффициенте пористости 0,41—0,7	30—43
Суглинки	22—33

Диаметр конуса $2R_k$ выбирается из соображений наименьшего трения буровой штанги о стенки скважин [1] и определяется диаметром буровой штанги $d_{шт}$ и упругими свойствами породы, в которой производится бурение. Так, в породах, проявляющих при сжатии главным образом остаточные деформации и обладающих незначительной упругостью, отношение $\frac{2R_k}{d_{шт}}$ может быть небольшим. В породах, в которых упругие деформации преобладают над остаточными [4], это отношение будет большим.

Рекомендуемые значения $\frac{2R_k}{d_{шт}}$ для различных пород следующие:

Породы	$\frac{2R_k}{d_{шт}}$
Глины различной плотности	1,3—1,5
Суглинки	1,2—1,4
Пески различной зернистости	1,1—1,2

Шаг винта t выбирается порядка 30—40 мм, что обеспечивает достаточно высокую механическую скорость проходки при сравнительно небольших усилиях.

Таким образом, выбрав эти три величины, можем подсчитать необходимый радиус R_1 , а затем R по формуле (6).

Реальный наконечник (рис. 2) отличается от расчетной модели (рис. 3) взаимным расположением винтовой лопасти и расширителя. Такое расположение улучшает условия работы винтовой лопасти, так как она находится в несколько уплотненной зоне породы, расположенной перед расширителем, а эта порода обладает большей прочностью, чем окружающая. Кроме того, облегчается процесс проходки, так как

винтовая лопасть производит предварительное уплотнение породы в зоне с радиусами r_2 и r_1 , а затем расширитель уплотняет породу окончательно, образуя скважину радиусом R_k .

Для удобства выбора параметров винтобуровых наконечников на основании формулы (7) построено семейство кривых $R_1(R_k)$ при шаге t , равном 3,6 см, для различных пород (рис. 5).

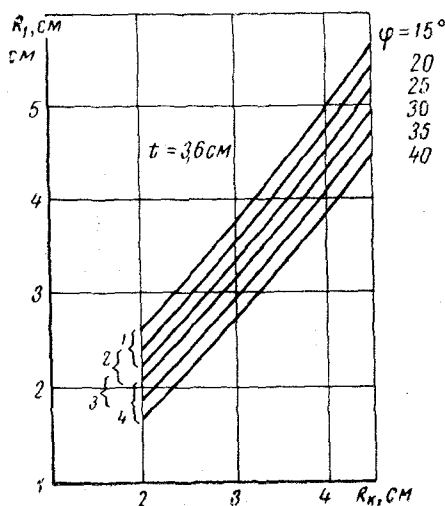


Рис. 5. Номограмма для определения $R_1(R_k)$
1—глины; 2—суглинки; 3—супеси; 4—пески

В заключение отметим, что для успешной работы винтобуровых наконечников необходим правильный выбор их геометрических параметров. Величины n , α , a выбираются из общих соображений, величины r — по конструктивным и технологическим условиям, R_k — по табл. 2, R_1 по формуле (7) или по графикам рис. 5, R — по формуле (6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г. К. Динамическое и статическое зондирование грунтов в инженерной геологии. Гостоптехиздат, 1964.
2. Зеленин А. Н. Резание грунтов. Изд-во АН СССР, 1959.
3. Ларионов А. К. Инженерно-геологическое изучение структуры рыхлых осадочных пород. Недра, 1966.
4. Справочник по характеристикам грунтов СССР. Стройиздат, 1946.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Основания и фундаменты. Стройиздат, 1964.
6. Цытович Н. А. Механика грунтов. Стройиздат, 1963.
7. Цюрупа И. И. Инженерные сооружения на винтовых сваях. Стройиздат, 1958.
8. Шамшев Ф. А., Тараканов С. Н. и др. Технология и техника разведочного бурения. Недра, 1966.