Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLI, вып. 2, 1961 г.

ВИБРОБУРИМОСТЬ ПОРОД И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

А. М. Яковлев

Проходка мелких скважин в мягких осадочных отложениях в практике поисковых и разведочных работ осуществляется в основном вращательным колонковым способом или применением крайне отсталого ручного ударно-вращательного бурения. Не говоря уже о последнем, колонковое бурение также не может полностью удовлетворять современным требованиям ведения разведочных работ как по производительности труда, так и по количеству и качеству отбираемых образцов. Это объясняется, в первую очередь, необходимостью резкого снижения режимных параметров бурения (по скорости вращения бурового снаряда и количеству подаваемой в скважину жидкости), исходя из обязательных условий сохранности керна. Если еще учесть, что используемый в практике метод «затирки всухую» с целью повышения выхода керна занимает 30% времени чистого бурения в каждом рейсе (длиной 1,2—2 *м*), то становится очевидным неприемлемость данного способа для бурения в мягких осадочных отложениях.

Как известно, нашедшее в последние годы применение в практике разведочных работ вибрационное бурение в значительной мере исключило эти недостатки.

Эффективность вибробурения по сравнению с такими способами, как колонковое, ударно-механическое и ручное бурение, доказана [2, 4]. Однако этот метод проходки скважин до настоящего времени остается малоизученным: не выяснен, например, характер процессов, происходящих в породах при погружении в них вибрирующего зонда [1, 2]. Это не разрешает устанавливать как режимные, так и конструктивные параметры вибраторов, а также производить правильный выбор рабочего инструмента, который удовлетворял бы объективно происходящим в породах процессам, определяющим их вибробуримость.

Как известно, погружение любого тела в какую-либо среду связано с обязательным перемещением (вытеснением и сжатием) определенных ее объемов. Это перемещение частиц породы из-под виброзонда, естественно, связано, с одной стороны, с явлением уплотнения ее в массив, а с другой — освобождением из пор породы свободной иммобилизованной воды. Освобождение иммобилизованной воды объясняется тем, что твердые частицы, вдавливаясь в поры породы, выжимают ее из них. Практически этот процесс наблюдал М. П. Зубанов [3]. Освобождение иммобилизованной воды определяется также разрушением структуры породы.

Появление свободной воды в зоне, примыкающей к виброзонду, изменяет механические свойства породы, снижая сопротивление углубляющемуся буровому инструменту как в связных, так и несвязных породах. Это явление отмечалось многими авторами [1, 2, 4], а Б. М. Гуменским оно положено в основу процесса вибробуримости глинистых пород [2].

Вибробуримость связных пород. Сопротивление глинистых пород перемещениям под действием сдвигающих сил, вызываемых вибрирующим зондом, определяется в большей степени силами молекулярного взаимодействия между частицами (цементационными связями, если они имеются), т. е. степенью сближения частиц твердой фазы породы — их плотностью.

Плотность породы при этом может быть определена как

$$\xi = \frac{1}{\varepsilon},$$

где ε — коэффициент пористости породы.

Установлено, что прочность пород, в том числе и глинистых, находится в обратной зависимости от их влажности. Изменение количества влаги в глинистой породе, как известно, приводит к существенным качественным изменениям ее свойств. Соответственно этому приняты пределы, определяющие состояние глинистой породы (предел текучести, пластичности и т. д.). Так, порода с естественной влажностью выше предела текучести находится в состоянии суспензии. По нижнему пределу пластичности оценивается примерная граница, разделяющая два других состояния — с высокой и низкой деформируемостью.

Способность глинистых пород деформироваться при различном содержании в них воды можно выразить через показатель консистенции

$$B_1 = \frac{W_f - W}{W_f - W_p},$$

где W_f — предел текучести;
W_p — предел пластичности;
W — естественная влажность пород.

Таким образом, глинистые породы, находясь в различном консистентном состоянии, будут обладать, по-видимому, и различной степенью вибробуримости. Тогда за показатель вибробуримости может быть принята величина

$$K = B_1 \xi,$$

учитывающая все деформационные особенности структур глинистых пород при различной степени увлажнения и уплотнения.

Кроме процесса перемещения породы на забое, определяющего лобовое сопротивление, как известно, углубке зонда препятствует также сопротивление породы, действующее по его боковой поверхности. Это сопротивление пород (как и лобовое) в значительной степени снижается при их разжижении во время вибробурения. Явление разжижения (тиксотропные проявления) в породе можно объяснить в основном наличием в зоне разрушения, прилегающей к виброзонду, свободной воды. В связи с этим большое значение приобретает вопрос о связи тиксотропных изменений с деформируемостью (консистенцией) породы, их влажностью — в первую очередь минимальной влажностью, при которой еще возможно появление тиксотропных изменений в породе. В работах отечественных и иностранных исследователей по этому поводу можно найти ряд замечаний, сводящихся к тому, что тиксотропные изменения в поро-

дах растут с увеличением влажности (А. И. Августинник, Б. М. Гуменский, И. М. Горькова, А. Д. Костылев) и пластических свойств (Г. Фрейдлих, Д. Босвелл). Однако высказывания о связи тиксотропных превращений в породах с их пластическими свойствами носят предположительный характер. Необходимы дополнительные исследования.

Вибробуримость несвязных пород. За основные свойства, определяющие вибробуримость песков, по-видимому, можно принять плотность расположения (укладки) зерен ξ, естественную влажность W и коэффи-

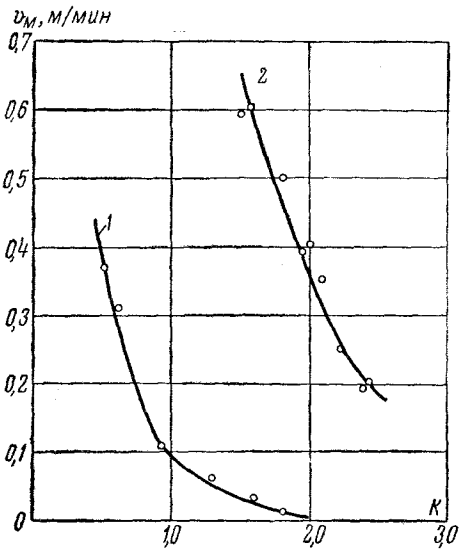


Рис. 1. Зависимость механической скорости бурения $v_м$ от показателя вибробуримости K (Северный Казахстан):

1 — бурение по глинам, вибратор ВПМ-1, $Q_0\varepsilon$ = = 60 *кгсм*, n = 1500 *об/мин*; *2* — бурение по суглинкам, вибратор ВБЛ-3, $Q_0\varepsilon$ = 100 *кгсм*, n = = 1500 *об/мин*

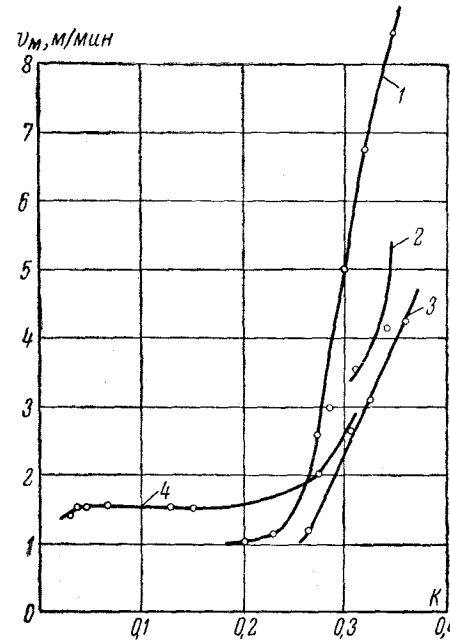


Рис. 2. Зависимость механической скорости бурения $v_м$ от показателя вибробуримости K для песков:

1 — Ленинградской области, вибратор БТ-9, $Q_0\varepsilon$ = = 100 *кгсм*, n = 2200 *об/мин*; *2* — там же, вибратор ВБЛ-3, $Q_0\varepsilon$ = 60 *кгсм*, n = 1600 *об/мин*; *3* — Северного Казахстана, вибратор ВПМ-1, $Q_0\varepsilon$ = 60 *кгсм*, n = 1500 *об/мин*; *4* — там же, вибратор ВБЛ-3, $Q_0\varepsilon$ = 100 *кгсм*, n = 1500 *об/мин*

циент внутреннего трения f. Тогда показатель вибробуримости для песков

$$K = \xi W f.$$

Проведенные опытные и производственные наблюдения за процессом вибрационного бурения в различных геологических условиях (рис. 1, 2) доказали правильность выбранных нами показателей вибробуримости и позволили установить количественную зависимость между механической скоростью бурения и физико-механическими свойствами связных и несвязных пород.

Опытное бурение производилось вибраторами: ВПМ-1, ВБЛ-3 и БТ-9, аналогичные наблюдения проводились за работой агрегата ВУЛГИ-2 (разработанного кафедрой техники разведки Ленинградского горного института) при геохимической разведке. Общий метраж пробуренных скважин около 6000 *пог. м*. Некоторые физико-механические свойства пород, а также технические условия вибробурения даны в табл. 1. Как видно из графиков и таблицы, исследование проводилось

Таблица 1

Основные физико-механические свойства пород

Глубина наблюдений, *м*	Гранулометрический состав								Влажность, %	Объемный вес, *г/см³*	Коэффициент внутреннего трения	Удельный вес, *г/см³*	Пористость, %	Коэффициент пористости	Полная влагоемкость, %	Коэффициент насыщения	Предел текучести	Предел пластичности	Число пластичности	Показатель консистенции	Плотность	Показатель вибробуримости	Механич. скорость бурения, *м/мин*
	2,0—1,0	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	0,001															
Бурение по глинам																							
5,0	—	—	Следы	—	3	19	14	64	46,43	1,79	—	2,83	56,90	1,320	—	1,000	86	24	62	0,360	0,759	0,5	3,6
5,7	—	—	Следы	—	13	14	60	13	43,84	1,81	—	2,83	55,48	1,246	—	0,997	86	30	56	0,750	0,802	0,6	3,0
6,7	—	1	Следы	3	12	22	7	55	35,10	1,88	—	2,81	50,55	1,021	—	0,965	84	30	54	0,910	0,979	0,9	1,0
8,35	—	2	5	—	12	10	6	65	35,15	1,87	—	2,78	50,59	1,014	—	0,963	81	33	48	0,940	0,986	0,9	0,96
10,50	—	—	1	10	7	19	2	61	26,86	2,02	—	2,78	42,81	0,749	—	0,999	72	25	47	0,960	1,335	1,3	0,6
11,00	—	—	—	11	8	18	4	59	22,96	2,07	—	2,74	38,68	0,630	—	0,997	67	23	44	1,00	1,587	1,6	0,24
12,35	—	—	Следы	9	8	15	5	63	21,12	2,09	—	2,74	36,85	0,584	—	0,989	57	22	35	1,03	1,712	1,8	0,1
13,00	—	—	Следы	15	9	14	3	59	19,67	2,17	—	2,83	36,05	0,563	—	0,988	53	21	32	1,03	1,787	1,8	0,08
15,40	—	—	—	39	19	10	3	29	21,25	2,08	—	2,71	35,30	0,576	—	1,000	35	15	20	0,70	1,734	1,2	0,96
Бурение по пескам																							
1,8	2	6	26	56	4	—	1	5	12,00	2,14	0,878	2,67	28,46	0,398	14,90	0,805	—	—	—	—	2,512	0,264	1,12
2,8	2	10	33	44	3	1	—	7	14,78	2,10	0,926	2,66	31,20	0,454	17,05	0,867	—	—	—	—	2,202	0,302	2,6
3,2	4	10	20	56	4	—	2	4	15,57	2,10	0,942	2,66	31,58	0,462	17,34	0,898	—	—	—	—	2,142	0,323	2,9
4,0	1	2	2	85	—	3	1	6	17,33	2,14	0,961	2,67	31,83	0,467	17,49	0,991	—	—	—	—	2,140	0,355	4,2

Примечание. Вибратор ВПМ-1, момент эксцентриков 60 *кгсм*, скорость вращения эксцентриков вибратора 1500 *об/мин*, диаметр бурения 108 *мм* (Северный Казахстан, Сарбайская ГРЭ).

на сравнительно широком диапазоне пород как по влажности, консистенции, так и плотности. При бурении по глинам и глинистым породам (см. табл. 1) отмечена ярко выраженная зависимость между скоростью бурения, с одной стороны, и влажностью, пористостью, показателем консистенции — с другой. Чем влажнее породы, чем выше их пластические свойства и ниже их прочность (показатель вибробуримости), тем эффективнее идет процесс углубки бурового инструмента под действием вибрирования. Однако однозначно как показатель консистенции B_1, так и плотность породы ξ не всегда позволяют проследить эту зависимость. Более полно зависимость механической скорости бурения от свойств породы выражается показателем вибробуримости. Она имеет гиперболический характер

$$v = aK^{-b},$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от параметров вибратора.

Для вибратора ВПМ-1 эти коэффициенты соответственно оказались: $a=0{,}73$; $b=2{,}52$. В глинах с показателем выбробуримости $K=1{,}8$ механическая скорость бурения резко снижалась до 0,1—0,08 *м/мин*, при подливе же воды в скважину значение ее поднималось до 0,5 *м/мин* и более.

Аналогичное положение имело место и с углубкой в течение рейса. В то же время вибрирование таких глин в зонде, на поверхности, не приводило ни к каким сколько-нибудь заметным изменениям свойств породы при различных режимах и времени вибрирования. Следовательно, переход глинистых пород в вязкотекучее состояние возможен только до определенной их прочности, определяемой содержанием свободной воды.

Опытное бурение по пескам проводилось в условиях Северного Казахстана (см. табл. 1, рис. 2) и Ленинградской области (см. рис. 2).

Для песков различной влажности и плотности

$$v = a_1 K^{b_1}.$$

Значения коэффициентов a_1 и b_1, зависящих от параметров вибратора, следующие:

	a_1	b_1
ВПМ-1 .	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$	6,21
ВБЛ-3 .	0,296	6,21
ВТ-9 . .	0,264	1,33

Для иллюстрации этой зависимости приведен график (см. рис. 1).

Выводы

1. Вибробуримость глинистых пород определяется главным образом плотностью сложения, формой их консистенции (деформируемостью).

2. Подтверждается зависимость между прочностью глинистых пород в пластичном состоянии, содержанием в них свободной воды и их тиксотропными свойствами.

3. Деформируемость пород и их способность к тиксотропным проявлениям определяются показателем вибробуримости.

4. За предел проявления тиксотропных изменений в глинах может быть принято $K_г = 1{,}8$ и для суглинков $K_с = 2$, при которых процесс вибробурения определяется только преодолением упругих деформаций в породе.

5. Буримость глинистых пород, находящихся в текучем или скрытотекучем состоянии (при $W > W_f$), зависит, по-видимому, исключительно

от степени вызываемых в них при вибробурении тиксотропных превращений.

6. Вибробуримость песков различной пористости и влажности полностью определяется показателем вибробуримости ($K=\xi W_f$).

7. Увеличение частоты колебаний рабочего инструмента (соответственно ускорения колебаний) резко повышает скорость бурения в песках различного сложения и влажности. При этом полученные наименьшие значения скорости бурения соответствуют влажности песков (3,8—14%), а наибольшие механические скорости бурения — влажности песков, приближающейся к полной влагоемкости.

Полученные данные, а также опыт работы других организаций позволили нам разработать основные положения для классификации пород по вибробуримости (табл. 2). За основной классификационный признак принят показатель вибробуримости пород, определяющий скорость бурения по определенной породе и возможную длину рейса. При распределении пород по группам учтены их генетические, петрографо-минералогические, структурные и текстурные свойства.

Таблица 2

Классификация мягких осадочных пород по вибробуримости

Категория породы	Типичные представители породы	Показатель вибробуримости	Проходка, *пог. м*	
			за 1 *мин* чистого бурения	за один рейс
I	Рыхлые, супесчаные, глинистые, суглинистые илы, обводненные супеси, плывуны, сильно разложившийся торф и слабые торфяные породы, ленточные и песчаные глины	$K_г < 0{,}5$ (при $W > W_f$); $K_п > 0{,}32$	>3	3 и более; бурение трубами 10—12 *м*
II	Суглинки пылеватые и непылеватые, песчаные глины и другие глинистые породы, песок различной зернистости и влажности с включением мелкой гальки до 10%, растительный слой	$K_г = 0{,}5 - 0{,}7$; $K_с < 1{,}5$; $0{,}26 < K_п < 0{,}32$	1,5—3	1,5—3
III	Суглинки, вязкие глины, слабые мергели, сухие пески, пески с глинистым цементом, сухие почвы, слабый мел, лёссовидные породы, загипсованные глины	$K_г = 0{,}7 - 1{,}7$; $K_с = 1{,}2 - 2$; $K_п < 0{,}26$	0,4—1,5	До 1,5
IV	Плотные глины, мергели, слабые известняки	$K_г > 1{,}7$; $K_с > 2$	0,4 (0,6)	До 0.4 (до 1)

Примечания: 1. Принятая в классификации размерность механической скорости бурения метр в минуту объясняется тем, что углубка за один рейс определяется минутами или долями минуты. Приводимая в некоторых работах скорость бурения в метрах за час непоказательна.

2. В скобках даны возможные скорости бурения и длины рейса с подливом в скважину воды.

3. Показатель вибробуримости глин $K_г$, суглинков $K_с$ и песков $K_п$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. Госстройиздат, 1959.

2. Гуменский Б. М. и Комаров Н. Я. Вибробурение грунтов. Изд-во Мин. коммун. хоз-ва, 1959.

3. Зубанов М. П. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей и грунтов. Машгиз, 1959.

4. Савинов О. А. и Годес Э. Г. Применение вибропогружателей на работах по бурению артезианских скважин. «Строительная промышленность», 1956, № 6.