

НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИБРАЦИОННО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ

В. М. МАТРОСОВ

(Представлено научным семинаром кафедры техники разведки)

Повышение эффективности технологических процессов, выполняемых при помощи машин, нередко достигается в настоящее время путем широкого использования различных физических и химических явлений. В одних случаях они ускоряют или замедляют процесс, в других — улучшают качество работ, снижают или предупреждают аварийность и т. д. К явлениям подобного рода относятся механические колебания, или вибрации, т. е. периодические достаточно малые перемещения систем.

Вибрационные машины, т. е. машины, в которых рабочему органу сообщаются колебания, получили в последние годы весьма широкое распространение во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства и используются при выполнении самых разнообразных технологических операций, таких как: уплотнение, сепарация, погрузка, транспортировка, измельчение, пахота, погружение в грунт свай, шпунтов, труб, бурение горных пород, сверление металлов и их заливка в формы, снятие напряжений в отливках, испытание различных контрольно-измерительных приборов и др. [1]. Только на предприятиях горнорудной промышленности, по данным А. О. Спиваковского и И. Ф. Гончаревича, вибрационные машины применяются для выполнения 35 различных технологических операций [2].

Большое распространение получают колебательные процессы и в буровом деле как для непосредственной проходки скважин, так и для вспомогательных целей: обсадка скважин и извлечение труб, ликвидация некоторых аварий в скважинах, очистка промывочных растворов от шлама (табл. 1).

В зависимости от условий проведения работ можно выделить два случая использования колебательных процессов непосредственно для бурения скважин: 1) вибрационное бурение (погружение) в мягких породах; 2) вибрационное бурение в сочетании с вращением инструмента (вибрационно-вращательное бурение) в породах средней твердости и крепких.

В качестве возбудителей колебаний в этих случаях применяются вибрационные механизмы двух типов: поверхностные вибраторы и забойные вибраторы. К механизмам первого типа относятся механические центробежные вибраторы направленного и ненаправленного действия, вибромолоты и др., отличающиеся большой мощностью и значительными габаритами. Область применения таких механизмов ограничена, так

как возбуждаемые ими колебания быстро затухают с глубиной. Практически такие вибраторы находят применение лишь при бурении неглубоких скважин. Для бурения с поверхностными вибраторами ЦКБ Государственного геологического комитета СССР создало целый ряд установок: БУВ-1, УВБ-3А, УВБ-15, УВБ-25А.

Механизмы второго типа (турбоцентробежные, гидравлические и пр.) более перспективны, так как находятся в скважине и непосредственно связаны с рабочим органом — коронкой или долотом. Однако до сих пор нет еще работоспособных промышленных конструкций вибраторов данного типа. Поэтому в практике буровых работ используются пока лишь погружные гидроударники.

Высокая эффективность вибробуровых механизмов дает основание полагать, что они займут одно из ведущих мест в буровой технике недалекого будущего. Для создания высокопроизводительных буровых

Таблица 1

Область применения колебательных процессов в бурении

№ п. п.	Возбудители колебаний	Вибрационное бурение (погружение)	Вибрационно-вращательное бурение	Обсадка скважин трубами	Ликвидация аварий в скважинах	Очистка промысловых растворов
Поверхностные						
1	Механический вибратор ненаправленного действия			+	+	+
2	Механический вибратор направленного действия	+	+	+	+	+
3	Механический вибратор направленного действия с подпрессорной пригрузкой	+	+	+	+	
4	Вибромолот	+	+	+	+	
5	Электромагнитный вибратор					+
Забойные						
1	Механический вибратор (конструкции М. П. Попова)					
2	Турбоцентробежный вибратор		+		+	
3	Пульсационный вибратор		+		+	
4	Гидравлический вибратор		+		+	
5	Гидротаранный вибратор		+		+	
6	Магнитострикционный вибратор		+		+	
7	Виброзонд, виброжелонка	+				

машин вибрационно-вращательного действия и их широкого внедрения в практику разведочного бурения необходимо решить целый ряд важных научных и технических задач. До последнего времени в практике конструирования вибробуровых установок расчет их оптимальных параметров не производился. В лучшем случае проводились лишь расчеты отдельных узлов и элементов установки на прочность при действии знакопеременных динамических нагрузок. Поэтому при испытаниях опытных образцов отдельные параметры технической характеристики виброустановок не соответствовали оптимальным режимам бурения.

Трудность решения указанной задачи при конструировании установок вибрационно-вращательного действия заключается в большом числе параметров, прямо или косвенно влияющих на эффективность данного способа бурения. Одни из этих параметров связаны с технологией вращательного бурения, другие — с конструкцией возбудителя колебаний — вибратора. Создание оптимальных условий для работы вибрационно-вращательной установки требует органической взаимосвязи всех этих параметров. Только при выполнении этого условия можно достичь наиболее эффективных результатов.

В задачу данной работы не входит разработка конструктивных схем вибрационных механизмов для тех или иных условий работ. Здесь предпринимается лишь попытка дать рекомендации по выбору основных параметров технической характеристики вибрационно-вращательной буровой установки как с поверхностными, так и с забойными вибраторами, и режимам ее работы в зависимости от физико-механических свойств горных пород. Указанные рекомендации составлены по материалам исследования вибрационно-вращательного способа бурения кольцевым забоем, проведенного в 1957—1961 гг. при кафедре техники разведки Томского политехнического института [3, 4]. При этом использовались и материалы по вибрационно-вращательному бурению, опубликованные в периодической литературе.

К основным параметрам режима вибрационно-вращательного бурения относятся:

- 1) возмущающая сила вибратора $P_{\text{макс}}$, кг;
- 2) осевая нагрузка на забой Q , кг;
- 3) частота колебаний вибратора n , кол/мин;
- 4) окружная скорость коронки W , м/сек;
- 5) интенсивность промывки скважины.

Существует и ряд других параметров (момент эксцентриков центробежного вибратора, амплитуда колебаний бурового снаряда, соотношение частот собственных и вынужденных колебаний в системе «буровой снаряд — вибратор» и пр.), которые также влияют на эффективность вибрационного бурения. Однако эти параметры тесно связаны с основными или же предопределяются их сочетанием.

Ниже рассматривается каждый из перечисленных параметров вибрационно-вращательной установки с точки зрения назначения его оптимальных значений для условий колонкового бурения.

Возмущающая сила вибратора. Этот параметр виброустановки зависит от момента эксцентриков вибратора и частоты колебаний и связан с ними следующей зависимостью:

$$P_{\text{макс}} = \frac{M \cdot n^2}{44750}, \quad (1)$$

где M — момент эксцентриков вибратора, кг × см.

Как показали исследования [3, 4, 5], механическая скорость бурения вибрационно-вращательным способом прямо пропорциональна возмущающей силе вибратора. Следовательно, при прочих равных условиях для достижения высокой производительности необходимо стремиться к максимальным значениям возмущающей силы вибрационной установки.

Верхний предел значений возмущающей силы вибратора должен устанавливаться в каждом конкретном случае в зависимости от прочностных характеристик применяемого бурового оборудования, в частности, бурильных труб. В этом отношении следует заметить, что до сих пор нет общепринятой методики расчета бурильных труб на подобные на-

грузки, и это обстоятельство приводит к малообоснованному подбору оборудования для вибрационного бурения.

Для поверхностных вибрационных механизмов высокие значения возмущающей силы должны достигаться за счет увеличения момента эксцентриков вибратора, так как в отношении габаритов последнего в этом случае нет больших ограничений. Идти здесь по пути увеличения возмущающей силы вибратора за счет высокой частоты колебаний вряд ли целесообразно, так как в этом случае значительно возрастают энергозатраты, а период воздействия породоразрушающего инструмента на забой уменьшается, что может привести лишь к усталостному разрушению горных пород, мало эффективному.

У забойных вибрационных механизмов центробежного типа, находящихся в скважине и стесненных ее размерами, большие значения возмущающей силы можно получить лишь в результате увеличения частоты колебаний. При этом единичный импульс, создаваемый вибратором, должен быть не меньше разрушающего для данной породы [3]. У других типов забойных вибрационных механизмов, например, гидравлических, гидротаранных и др., величина ударного динамического импульса находится в тесной зависимости от расхода промывочной жидкости. Ограничительный предел в этом случае будет зависеть от величины гидравлических сопротивлений, возникающих при подаче максимального количества жидкости через принятое сечение бурильных труб.

При работе с бурильными трубами колонкового сортамента максимальное значение возмущающей силы вибратора может быть рекомендовано в пределах 1500—2000 кг. При наличии специального бурового инструмента или же в случае проходки неглубоких скважин возмущающая сила вибратора может достигать 10 000—15 000 кг. Большое значение при выборе величины возмущающей силы вибратора для условий колонкового разведочного бурения будет иметь моторесурс применяемой коронки, и этот фактор нельзя упускать из вида.

Осевая нагрузка на забой. Данный параметр при бурении вибрационно-вращательным способом увеличивает энергию единичного импульса, снижает расход мощности, потребляемой вибратором, и стабилизирует работу всей виброустановки в целом.

При малых значениях осевой нагрузки буровой снаряд будет совершать колебания с большой амплитудой, но с малыми скоростями и ускорениями внутри одного цикла. Энергия удара в этом случае будет невелика. Если же осевая нагрузка превысит величину максимальной возмущающей силы вибратора, то перемещения бурового снаряда нередко исчезают совсем, и эффект вибраций проявляться не будет. Поэтому при выборе значений осевой нагрузки для условий колонкового разведочного бурения в первом приближении можно воспользоваться рекомендациями В. А. Кружкова [8]. Согласно этим рекомендациям, скорость удара и эффект воздействия породоразрушающего инструмента на забой скважины достигают максимума при отношении осевой нагрузки к максимальной возмущающей силе вибратора, равном 0,4. При уменьшении этого отношения скорость удара снижается, при увеличении — возникают паузы в работе виброустановки, она начинает «глохнуть». В наших исследованиях виброустановка работала наиболее стабильно при значениях указанного отношения в пределах 0,3—0,4.

Следует отметить, что при работе с забойными вибраторами осевую нагрузку целесообразно создавать с помощью тяжелого низа.

Частота колебаний вибратора. Как уже указывалось выше, путем изменения частоты колебаний вибратора можно регулировать величину возмущающей силы (для вибраторов центробежного типа). Кроме того, частота колебаний вибратора является главнейшим факто-

ром, определяющим частоту приложения ударных импульсов к забою скважины (обычно она равна частоте колебаний вибратора или кратна ей).

С увеличением частоты приложения ударных импульсов к забою скважины скорость бурения, как правило, возрастает. Ввиду этого увеличение частоты колебаний вибратора при прочих равных условиях сказывается положительно на производительности вибрационно-вращательного бурения. Однако при этом следует помнить, что параллельно с ростом частоты колебаний вибратора возрастает и его возмущающая сила, причем во второй степени. Поэтому при больших значениях момента эксцентров частоту колебаний вибратора следует ограничивать в пределах 1500—2000 кол/мин. При малых значениях момента эксцентров вибратора частоту колебаний можно значительно увеличивать, но в этом случае необходимо проводить тщательный расчет оборудования на повторные нагрузки.

Когда контактное давление будет недостаточным для того, чтобы на забое скважины происходил объемный процесс разрушения горной породы (при малых значениях возмущающей силы вибратора), увеличение частоты колебаний является единственным путем поддержания углубки скважины на высоком уровне. В этом случае будет происходить усталостное разрушение хрупких горных пород.

Верхний предел частоты колебаний вибратора может быть ограничен, исходя из соображений оптимального времени контакта резца коронки с породой на забое скважины [6]. Как известно, увеличение частоты колебаний вибратора соответственно влечет за собой уменьшение продолжительности времени воздействия коронки на забой в период одного цикла. Поэтому при высокой частоте колебаний бурового снаряда продолжительность времени контакта коронки с породой может оказаться меньше оптимального времени (для шарошечного бурения по Р. М. Эйгельсу — $5 \div 8$ миллисекунд). Это повлечет за собой резкое уменьшение эффективности разрушения горной породы. Для предотвращения подобных явлений частоту колебаний вибратора следует ограничивать:

$$n_{\text{в}} \leq \frac{60}{\tau_0} = \frac{60}{(0,005 \div 0,008)} = 12000 \div 7500 \text{ кол/мин}, \quad (2)$$

где τ_0 — оптимальное время контакта, сек;

$n_{\text{в}}$ — верхний предел частоты колебаний вибратора, кол/мин.

Нижний предел частоты колебаний вибратора должен обеспечивать превышение возмущающей силы вибратора над величиной осевой нагрузки. Это условие выражается следующей зависимостью:

$$n_{\text{н}} \geq 212 \cdot \sqrt{\frac{Q}{M}}, \quad (3)$$

где $n_{\text{н}}$ — нижний предел частоты колебаний вибратора, кол/мин.

С точки зрения обеспечения стабильности работы виброустановки $\left(\frac{Q}{P_{\text{макс}}} = 0,4\right)$, частота колебаний вибратора может быть найдена из выражения:

$$n_{\text{с}} = 334 \sqrt{\frac{Q}{M}}. \quad (4)$$

Окружная скорость вращения коронки. При вибрационно-вращательном бурении наблюдается явление косо́го удара: в зависимости от соотношения окружной и вертикальной скоростей резцы коронки внедряются в породу под тем или иным углом к поверхности

забоя. Объем скола горной породы за один цикл и механическая скорость бурения достигают максимума при оптимальном угле встречи ρ_0 , который дополняет угол трения для данной пары «резец — порода» до 90° [3, 4].

Рассмотренные выше параметры обеспечивают определенное значение вертикальной скорости коронки. Для обеспечения наиболее эффективной работы вибрационно-вращательной установки значение окружной скорости вращения коронки должно быть подобрано таким образом, чтобы результирующее направление движения резцов коронки совпадало с оптимальным углом встречи для конкретных условий бурения. В связи с этим необходима тесная увязка окружной скорости вращения коронки с остальными параметрами режима бурения вибрационно-вращательным способом. При этом требуется знать величины оптимальных углов встречи для различных пар: «горная порода — резец».

Аналитическая увязка окружной скорости вращения коронки с другими параметрами виброустановки, а также значения оптимальных углов встречи приводились в ранее опубликованных работах [3, 4]. Здесь же следует заметить, что при вычислении необходимой окружной скорости вращения коронки вначале нужно задаться значениями осевой нагрузки и частоты колебаний вибратора. Затем по данному моменту эксцентриков вибратора и значению оптимального угла встречи для конкретных условий подсчитать окружную скорость коронки.

При найденной окружной скорости коронки число оборотов в минуту бурового снаряда подсчитывается по формуле:

$$n_0 = \frac{60 \cdot \omega}{\pi \cdot D_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где n_0 — число об/мин бурового снаряда;

$D_{\text{ср}}$ — средний диаметр коронки, м.

На рис. 1 приведен график зависимости окружной скорости вращения коронки от частоты колебаний вибратора, имеющего момент эксцентриков, равный $50 \text{ кг} \times \text{см}$, построенный для различных осевых нагрузок и оптимальных углов встречи. Из анализа этого графика следует, что окружная скорость вращения коронки должна увеличиваться с ростом частоты колебаний вибратора и уменьшаться при увеличении осевой нагрузки и значений оптимального угла встречи. Для других значений момента эксцентриков характер изменения окружной скорости коронки сохранится, и она будет отлична лишь по абсолютному значению.

В случае использования для вибрационно-вращательного бурения существующих станков с известными числами оборотов окружными скоростями коронки следует задаваться и подсчитывать другие параметры оптимального технологического режима работы виброустановки. Ниже приводится пример практического расчета параметров оптимального режима работы вибрационно-вращательной установки.

Пример. Определить частоту колебаний вибратора и величину осевой нагрузки для оптимальной работы виброустановки при следующих условиях:

- 1) бурение ведется в мраморе, $\rho_0 = 78^\circ$;
- 2) окружная скорость коронки, $\omega = 0,15 \text{ м/сек}$;
- 3) момент эксцентриков вибратора, $M = 50 \text{ кг/см}$;

$$4) \text{ отношение } \frac{Q}{P_{\text{макс}}} = 0,3.$$

Связь между параметрами оптимального режима бурения vibra-

вибрационно-вращательной установкой выражается уравнением, выведенным автором [4]:

$$\omega = \frac{294,3}{n \cdot \operatorname{tg} \rho_0} \left[0,64 \sqrt{\left(\frac{P_{\max}}{Q} \right)^2 - 1} + (1 + 2K) \right],$$

где

$$K = \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}}.$$

Подставляем в уравнение численные значения и решаем его относительно n .

$$K = \frac{1}{3,14} \arcsin 0,3 = 0,095;$$

$$n = \frac{294,3}{0,15 \cdot \operatorname{tg} 78^\circ} \left[0,64 \sqrt{\left(\frac{1}{0,3} \right)^2 - 1} + (1 + 2 \cdot 0,095) \right] = 1350 \text{ кол/мин.}$$

Находим величину максимальной возмущающей силы вибратора при $n = 1350 \text{ кол/мин}$:

$$P_{\max} = \frac{M \cdot n^2}{44750} = \frac{50 \cdot 1350^2}{44750} = 2000 \text{ кг.}$$

Подсчитываем величину осевой нагрузки:

$$Q = 0,3 \cdot P_{\max} = 0,3 \cdot 2000 = 600 \text{ кг.}$$

Из приведенного примера следует, что, пользуясь предложенными рекомендациями и формулами, можно быстро подобрать наилучшие параметры режима работы виброустановки.

Интенсивность промывки скважин. Промывка скважин при вибрационно-вращательном бурении определяется теми же факторами, что и при обычном бурении без вибраций, т. е. способом бурения (дробовое или твердосплавное) и объемом разрушенной породы в единицу времени. Количество промывочной жидкости, подаваемой в скважину, можно определить в каждом конкретном случае в соответствии с существующими инструкциями и рекомендациями [7].

Если с помощью промывочной жидкости приводится в действие забойный вибратор, необходимо делать специальные расчеты.

Компоновка низа бурового снаряда. Приведенные рекомендации по выбору отдельных параметров технической характеристики установок вибрационно-вращательного действия, безусловно, не охватывают всех возможных случаев и условий, встречающихся при проведении буровых разведочных работ. Поэтому данные выводы следует уточнять в каждом конкретном случае. Например, при использовании забойных вибраторов целесообразно отказаться от жесткой связи бурового снаряда с колонной буровых труб для улучшения условий работы последней. В этом отношении имеется уже ряд рекомендаций для забойных гидроударников (ВИНИБТ, ЦКБ МГ и ОН). На рис. 2 приводится схема предлагаемой компоновки бурового снаряда для вибрационно-вращательного бурения с забойным вибратором. Снаряд собирается в следующей последовательности: коронка, колонковая труба, переходник (шламовая труба), забойный вибратор, утяжеленные буровые трубы, муфта с шестигранным отверстием, шестигранная штанга, колонна обычных буровых труб. Благодаря наличию муфты и шестигранной штанги колонковая труба с вибратором и тяжелым низом, получая вращение с поверхности, может перемещаться под действием вибрационных колебаний в осевом направлении относительно

колонны бурильных труб. Бурильные трубы в этом случае будут изолированы от вибрационных колебаний бурового снаряда, находясь в подвешенном состоянии. Осовая нагрузка на забой скважины должна полностью создаваться за счет веса утяжеленных бурильных труб.

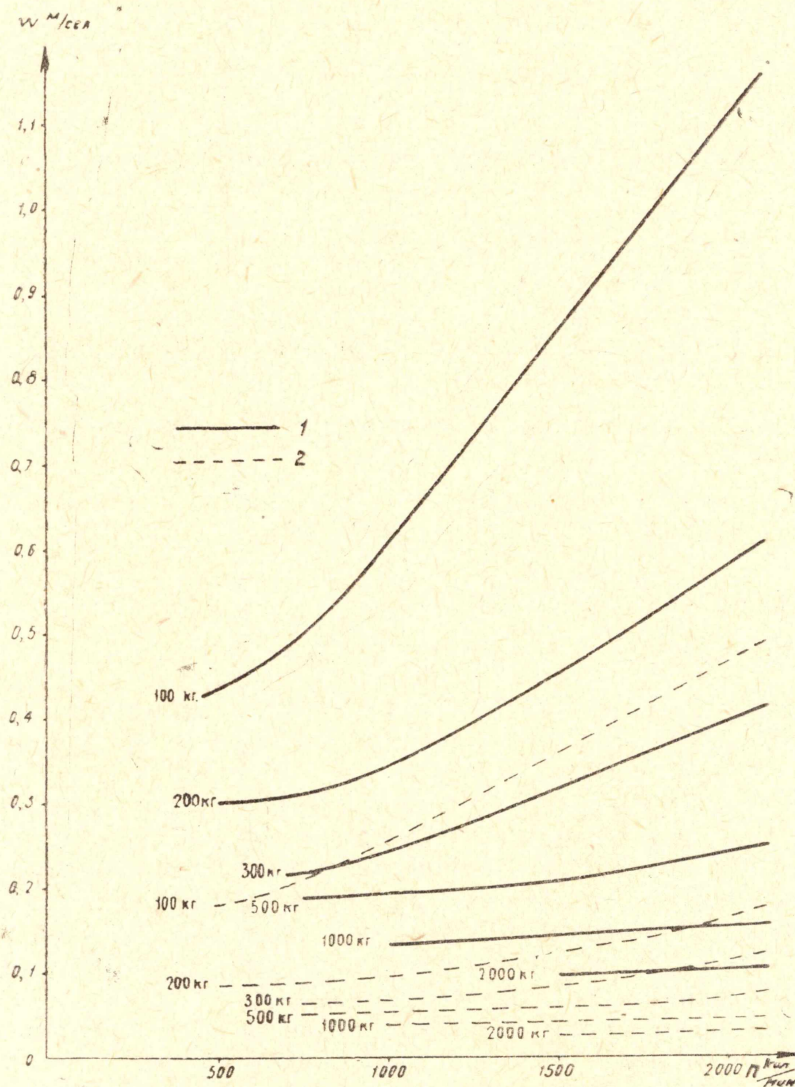


Рис. 1. График изменения окружной скорости вращения коронки в зависимости от частоты колебаний вибратора при различных осевых нагрузках и некоторых оптимальных углах встречи.

1 — $\rho_0 = 76^\circ$; 2 — $\rho_0 = 84^\circ$.

Забойный вибратор следует располагать непосредственно над колонковой трубой. Если его расположить, например, над тяжелым низом, то в случае поломки вибратора ликвидировать возникшую аварию будет намного сложнее. Кроме того, вибрационные колебания, передающиеся коронке через тяжелый низ, будут ослабевать.

Выводы

Выбор оптимального сочетания отдельных параметров технической характеристики вибрационно-вращательной установки является весьма сложной задачей, при решении которой требуется анализировать

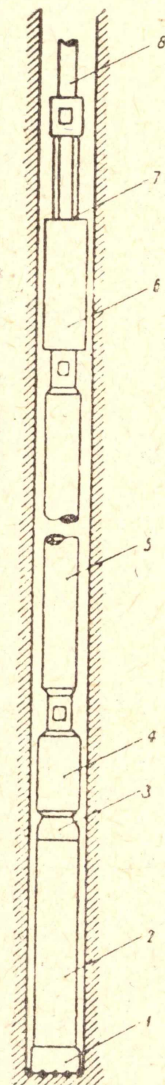


Рис. 2. Компоновка низа бурового снаряда.

1 — коронка; 2 — колонковая труба; 3 — переходник; 4 — забойный вибратор; 5 — утяжеленные бурильные трубы; 6 — муфта; 7 — шестигранник; 8 — колонна обычных бурильных труб.

большое число различных вариантов. Вариант, выбранный из условия наиболее эффективной работы установки (при оптимальных углах встречи бурового инструмента с поверхностью забоя скважины), может быть неприемлемым с точки зрения устойчивой, стабильной работы виброустановки. Наконец, вариант, удовлетворяющий указанным условиям, может оказаться непригодным из-за недостаточной прочности бурового оборудования и т. д.

Сложная и кропотливая работа по выбору наилучшего варианта технической характеристики виброустановки может быть успешно выполнена при использовании современных методов исследований. Большие перспективы в этом отношении открываются в связи с развитием методики электронного моделирования для определения рациональных параметров вибробуровых установок [9].

Создание установок вибрационно-вращательного действия, обладающих наиболее рациональными параметрами технической характеристики, в значительной степени повысит производительность труда на буровых работах, снизит себестоимость и трудоемкость работ, облегчит возможность автоматизации бурового процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И. И., Бессонов А. П., Шляхтин А. В. О машинах вибрационного действия. Изд. АН СССР, 1956.
 2. Гончаревич И. Ф., Спиваковский А. О. Состояние и задачи научных исследований в области развития вибротехники в горном деле. Сб. Вопросы горного дела ИГД АН СССР, 1958.
 3. Матросов В. М. Исследование вибрационно-вращательного способа бурения скважин кольцевым забоем. Автореферат канд. диссертации. Томск, 1961.
 4. Матросов В. М. Некоторые вопросы теории вибрационно-вращательного бурения кольцевым забоем. Изв. ТПИ, т. 120, 1962.
 5. Воскресенский Ф. Ф. и др. Вибрационное и ударно-вращательное бурение. Гостоптехиздат, 1961.
 6. Эйгельс Р. М. О некоторых закономерностях динамического внедрения зубьев долота в породу. Нефт. хозяйство, № 8, 1956.
 7. Воздвиженский Б. И., Волков С. А. и др. Разведочное колонковое бурение. Госгеолтехиздат, 1957.
 8. Кружков В. А. Расчет основных параметров вибрационно-вращательного бурового станка. Горный журнал, № 9, 1957.
 9. Ашавский А. М., Литвинов Н. Н. Применение электронных моделирующих установок для расчета оптимальных параметров процесса бурения. Разв. и охрана недр, № 5, 1960.
-