

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ВИБРАЦИОННО- ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫМ ЗАБОЕМ

В. М. МАТРОСОВ

(Представлено научным семинаром кафедр техники разведки  
и горных машин и рудничного транспорта)

Большая эффективность вибрационных механизмов, используемых для целей разрушения горных пород, привлекает к ним все большее и большее внимание. Целый ряд научно-исследовательских и производственных организаций проводит в широком объеме работы по внедрению виброметода в практику горнобурового дела.

Однако дальнейшее совершенствование вибрационного метода тормозится отсутствием достаточно стройных теорий по основам разрушения горных пород этим способом. Несмотря на длительный опыт эксплуатации вибромеханизмов, до настоящего времени отсутствует теория расчета основных конструктивных параметров вибрационных установок, не выявлены оптимальные соотношения между параметрами режима вибрационно-вращательного бурения (возмущающая сила, частота колебаний, осевая нагрузка и окружная скорость коронки), которые обеспечивают наилучшие показатели использования вибромеханизмов в технико-экономическом отношении.

Настоящая статья посвящена решению одного частного вопроса теории виброметода, относящегося к механизму разрушения горных пород при вибрационно-вращательном способе бурения кольцевым забоем. На основе принятой схемы разрушения породы на забое и проведенных экспериментальных исследований установлены оптимальные соотношения между основными параметрами режима вибрационно-вращательного бурения кольцевым забоем в крепких породах.

Экспериментальная часть выполнялась в буровой лаборатории кафедры «Техника разведки» Томского политехнического института на специально смонтированной для этой цели вибрационно-вращательной установке.

### О механизме разрушения горных пород при вибрационно- вращательном бурении

Высокая эффективность механизмов, которым сообщаются вибрации, обусловлена следующим. Воздействие вибрационных механизмов на объект носит импульсный характер, причем рабочий процесс получается в результате суммарного эффекта большого количества отдельных циклов, следующих один за другим. Хотя за один цикл совершается весьма незначительная работа, в целом достигается высокий производ-

ственный эффект вследствие большой частоты импульсов в единицу времени.

Необходимо отметить также, что воздействие бурового наконечника на забой в период каждого импульса при сравнительно небольших перемещениях происходит со значительной скоростью и при больших ускорениях, что имеет большое значение при разрушении породы ударом.

Явления, происходящие при взаимодействии вибрирующего бурового наконечника с горной породой, весьма сложны и изучены пока в самых общих чертах. Сравнительно более полно исследованы явления, возникающие при погружении виброметодом буровых наконечников в мягкие грунты [2].

Механизм разрушения при вибрационно-вращательном бурении в крепких породах изучен в настоящее время далеко не в достаточной степени. Можно лишь с уверенностью сказать, что здесь имеется много общего с забойными процессами, имеющими место при бурении скважин сплошным забоем вращательно-ударным способом и шарошечными долотами. Во всех этих случаях разрушение горной породы на забое происходит под действием динамических нагрузок.

Полной аналогии, однако, при сравнении воздействия на забой указанными способами с вибрационно-вращательным провести нельзя, так как в первом случае буровой инструмент постоянно прижат к забою под действием осевой нагрузки или усилия подачи, в то время как при вибрационно-вращательном бурении буровой инструмент наносит удары с отрывом от забоя. Отрыв долота или коронки от забоя является характерной особенностью вибрационно-вращательного способа бурения, оказывающей решающее влияние на характер взаимодействия бурового наконечника с породой.

При вращательно-ударном бурении основным движением инструмента, обеспечивающим максимальную работу по разрушению забоя, является вращательное [1].

При ударно-поворотном бурении разрушение породы на забое происходит под действием ударной нагрузки, при этом резец внедряется в породу вертикально под углом 90 градусов к поверхности забоя.

Механизм разрушения породы на забое при вибрационно-вращательном бурении кольцевым забоем можно представить следующим образом (рис. 1). Как видно из схемы, коронка 1 совместно с резцом участвует одновременно в двух движениях: во вращательном с постоянной окружной скоростью и в осевом с вертикальной скоростью, изменяющейся по величине и знаку. В результате этого движение резца происходит по сложной траектории 2, приближающейся в простейшем случае к синусоиде. Наличие собственных колебаний бурового инструмента, а также упругие свойства горной породы в той

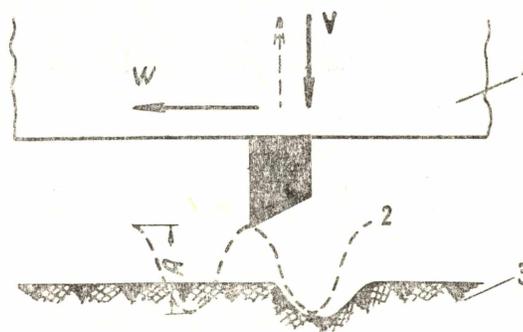


Рис. 1. Схема разрушения породы на забое. 1 — коронка, 2 — траектория резца, 3 — горная порода.  $w$  — окружная скорость,  $v$  — вертикальная скорость,  $A$  — амплитуда колебаний.

или иной степени искажают гармоническое движение резца. Тем не менее, при встрече резца с породой 3 имеет место явление косоугольного удара: в зависимости от соотношения окружной и вертикальной скоростей резец

внедряется в породу под тем или иным углом к поверхности забоя.

Как было установлено ранее [3], объем скола горной породы за один удар зависит от угла встречи резца с породой и достигает максимума при оптимальном угле встречи « $\rho_0$ », который является дополнительным к углу трения между резцом и породой « $\varphi$ », т. е.  $\rho_0 + \varphi = 90^\circ$ .

Из анализа принятой схемы разрушения породы при вибрационно-вращательном бурении кольцевым забоем вытекают следующие выводы:

1) при оптимальном соотношении окружной и вертикальной скоростей резца должен наблюдаться максимум скорости бурения;

2) мощность, снимаемая с вала вращателя, должна быть меньше при вибрационно-вращательном бурении, чем при статическом бурении, что обусловлено явлением отрыва коронки от забоя и уменьшением общего трения.

Проверить высказанные положения можно только опытным путем, для чего были проведены специальные эксперименты.

### Методика экспериментальных исследований

Опыты по вибрационно-вращательному бурению в крепких породах кольцевым забоем проводились на специальной установке, имеющей следующее устройство (рис. 2).

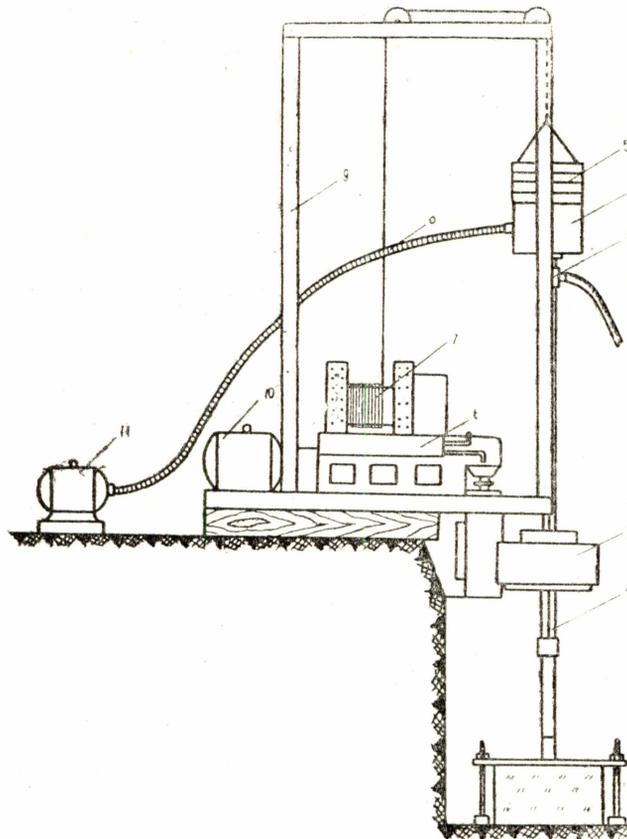


Рис. 2. Вибрационно-вращательная установка для экспериментального бурения. 1—буровой инструмент, 2—ротор, 3—сальник, 4—вибратор, 5—груз, 6—коробка передач, 7—лебедка, 8—гибкий вал, 9—копер, 10—электродвигатель переменного тока, 11—электродвигатель постоянного тока.

От электродвигателя 10 через коробку передач 6 и ротор 2 вращение передается буровому инструменту 1, состоящему из ведущей штанги, колонковой трубы и коронки. На верхнем конце ведущей штанги навин-

чивается сальник 3, который посредством резинового шланга связан с промывочным насосом. На сальнике с помощью конических роликоподшипников укрепляется вибратор 4, который остается неподвижным при вращении инструмента. На верхней крышке вибратора расположены грузы 5, жестко связанные с вибратором болтами. Вибратор приводится в движение через гибкий вал 8 от электромотора постоянного тока 11.

Ротор установки имел три скорости вращения: 38, 75 и 148 об/мин. Вибрационные колебания сообщались буровому снаряду от двухблочного вибратора направленного действия конструкции П. Ф. Пальянова с моментом эксцентриков 25 кг·см. Регулировка числа оборотов вибратора осуществлялась с помощью реостата, включенного в цепь электромотора постоянного тока. Пределы регулировки лежали от 500—700 до 1300—1400 оборотов в минуту.

Экспериментальное бурение проводилось в глыбах гранодиорита, относящегося к IX категории по буримости колонковым способом, гранита — X категории и мрамора — V категории. Гранит и гранодиорит разбуривались дробовым способом, мрамор — с помощью коронок, оснащенных восьмигранными резцами из твердого сплава. При дробовом бурении использовалась стальная дробь—сечка. Диаметры коронок составляли 65 мм (внешний) и 52 мм (внутренний).

Промывка осуществлялась насосом «45/15» при производительности 6—15 л/мин, промывочной жидкостью являлась вода.

Мощность, потребляемая электромотором переменного тока из сети, замерялась с помощью двух ваттметров, включенных в цепь по схеме Арона. Мощность, снимаемая с вала вращателя, определялась по показаниям ваттметров с учетом нагрузочной характеристики двигателя.

### Опытные данные

Первая серия опытов проводилась с целью выяснения характера изменения скорости бурения в зависимости от частоты колебаний вибратора. Результаты экспериментальных наблюдений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Число, об/мин вибратора	Скорость бурения, мм/мин						
	Гранит	Гранодиорит			Мрамор		
		38	38	75	148	38	75
0	0,90	1,40	3,70	6,40	3,50	6,80	11,30
700	0,95	—	—	—	4,90	7,95	12,40
800	1,00	1,45	3,80	6,40	5,10	13,80	14,20
900	1,35	1,50	4,20	6,70	5,25	11,60	14,70
1000	2,05	3,00	5,80	8,50	5,25	10,85	14,65
1100	2,10	3,00	7,25	10,60	6,30	10,20	15,30
1200	1,80	2,20	8,50	12,80	6,85	11,35	15,80
1300	1,70	2,15	9,10	15,15	7,35	12,15	17,00

По полученным данным построены графики влияния вибраций на скорость бурения при различных окружных скоростях коронки (рис. 3). Окружные скорости коронки в соответствии с числами оборотов ротора составляли:  $W_1=0,12$  м/сек,  $W_2=0,23$  м/сек и  $W_3=0,45$  м/сек.

Из графика следует, что максимумы скорости бурения наблюдаются при разбурировании гранита и гранодиорита на I скорости ротора и мрамора — на II скорости.

Для того, чтобы установить зависимость скорости бурения от угла встречи резцов с поверхностью забоя, приведенный ниже график следует построить в новых координатах: «скорость углубки—угол встречи». Угол встречи вычислялся по формуле

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{v}{W}, \quad (1)$$

где  $v$  — вертикальная скорость коронки в момент встречи с поверхностью забоя.

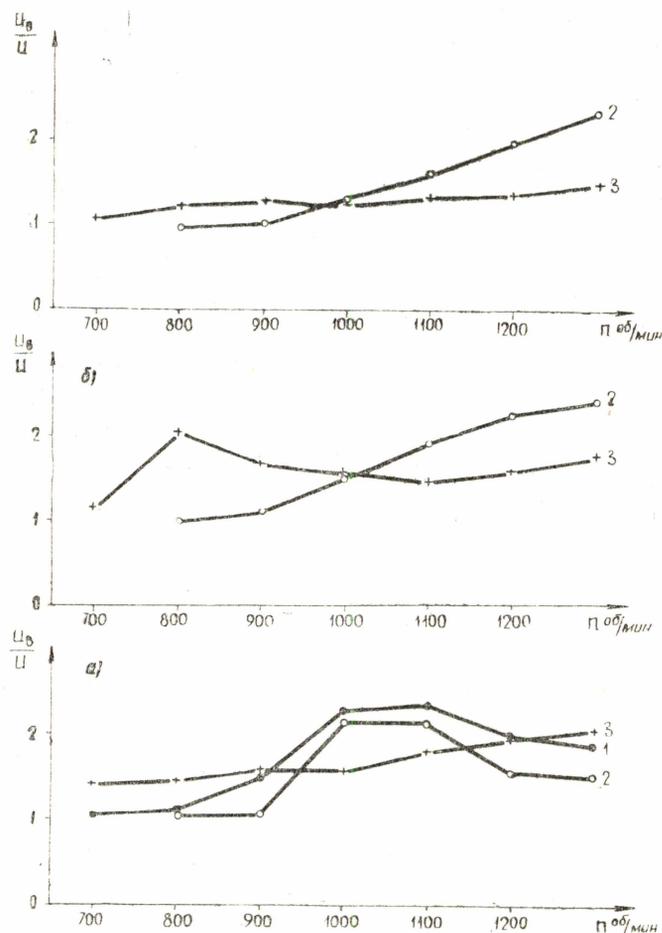


Рис. 3 Графики влияния вибраций на скорость бурения.  
 1—бурение в граните, 2—бурение в гранодиорите, 3—бурение в мраморе. а) 38 об/мин ротора, б) 75 об/мин ротора, в) 148 об/мин ротора,  $U$ —скорость бурения без вибраций,  $U_v$ —с вибрациями.

Вертикальная скорость коронки вычислялась по формулам, приведенным в следующей главе, а также определялась по снятым виброграммам колебаний бурового снаряда.

Из графика на рис. 4 следует, что максимум скорости углубки соответствует следующим оптимальным углам встречи: для гранита— $84^\circ$ , для гранодиорита —  $83^\circ$ , для мрамора —  $78^\circ$ . После того, как угол встречи превысит оптимальный, скорость бурения начинает падать до некоторого предела. При последующем увеличении импульса по абсо-

лутному значению, а также росте числа импульсов в единицу времени скорость бурения начинает снова возрастать. На высоких скоростях вращения при данных параметрах вибратора угол встречи не достигает оптимального.

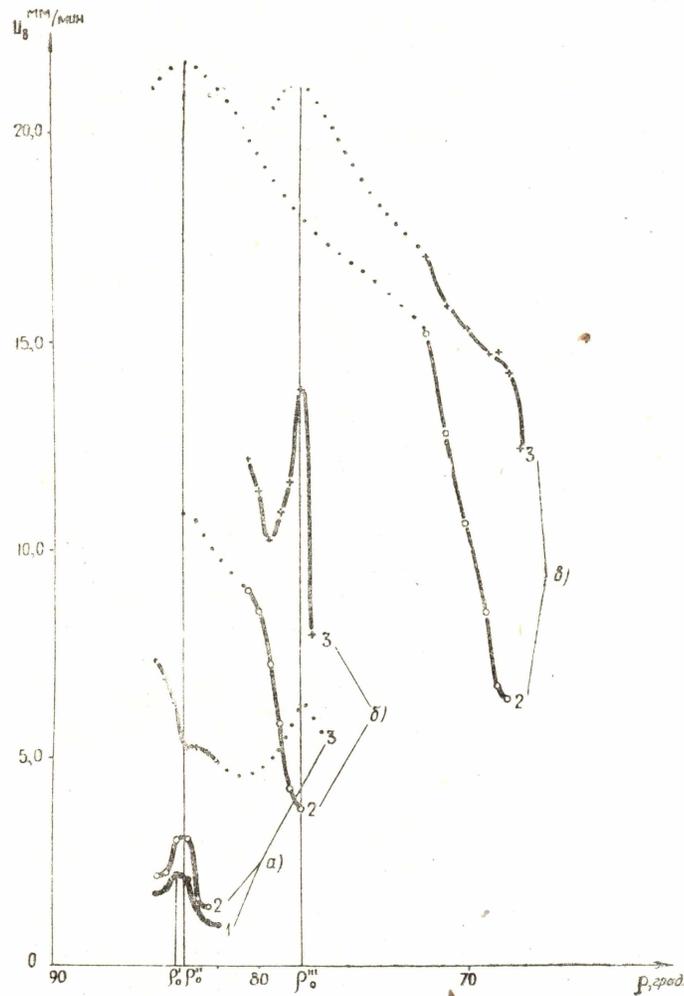


Рис. 4. График зависимости скорости бурения от угла встречи.

Следующая серия опытов преследовала цель определения расхода мощности при наложении вибраций на буровой инструмент. Замеры мощности, снимаемой с вала двигателя при статическом бурении, приведены в табл. 2.

Графики изменения расхода мощности в зависимости от частоты колебаний бурового снаряда при бурении в различных породах приве-

Таблица 2

Горная порода	Осевая нагрузка, кг	Мощность, квт		
		38 об/мин	75 об/мин	148 об/мин
Гранит	120	0,38	0,83	1,20
	240	0,45	1,00	1,50
Мрамор	240	4,75	5,25	5,80

дены на рис. 5. Как следует из этих графиков, мощность, снимаемая с вала двигателя, уменьшается при наложении вибраций на буровой инструмент, причем более интенсивно в крепких породах.

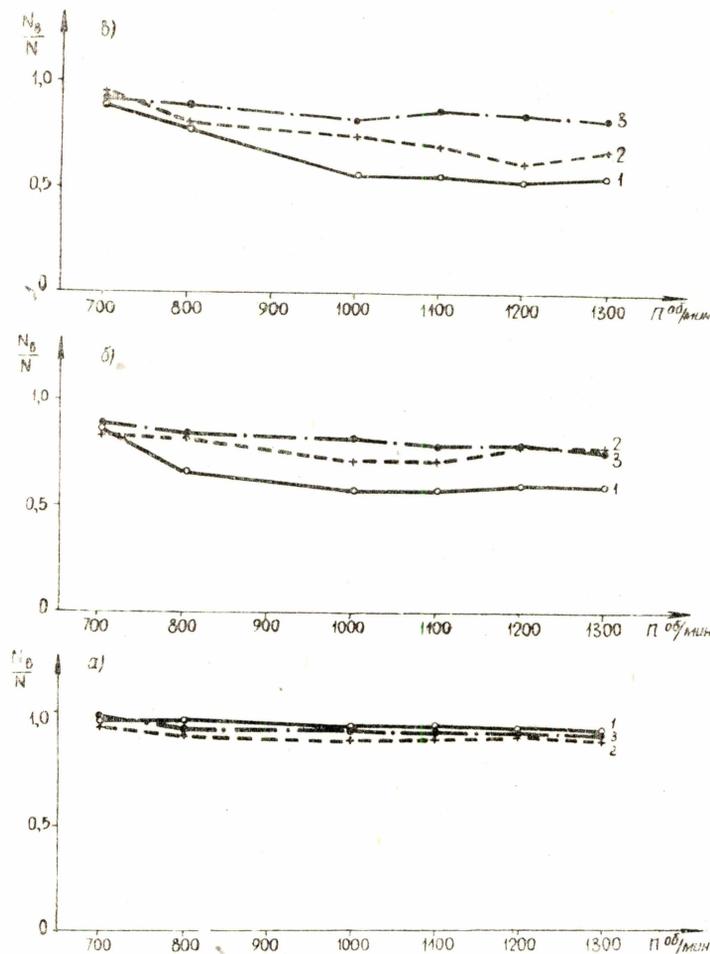


Рис. 5. Графики зависимости расхода мощности от частоты колебаний: а) бурение в мраморе,  $Q = 240$  кг; б) бурение в граните,  $Q = 120$  кг; в) бурение в граните,  $Q = 240$  кг. 1—38 об/мин ротора, 2—75 об/мин ротора, 3—148 об/мин ротора.  $N_v$  — расход мощности при вибрациях,  $N$  — расход мощности без вибраций.

#### Формула, связывающая основные параметры оптимального режима вибрационно-вращательного бурения кольцевым забоем

В свете изложенного представления о механизме разрушения горных пород при бурении вибрационно-вращательным способом кольцевым забоем в крепких породах имеется возможность вывести общую формулу, связывающую основные параметры технологии бурения. Эти параметры следующие:

$P_{\text{макс}}$  — максимальная возмущающая сила вибратора, кг;

$Q$  — осевая нагрузка на забой, кг;

$n$  — частота колебаний вибратора, об/мин;

$W$  — окружная скорость коронки, м/сек.

Проявление эффекта вибраций начинается с того момента, когда максимальная возмущающая сила вибратора  $P_{\text{макс}}$  превысит величину осевой нагрузки  $Q$ . Под действием возмущающей силы буровой снаряд приходит в колебания с отрывом от забоя и передачей динамического импульса забою всей колеблющейся массой. При этом с некото-

рым допущением полагаем, что коронка жестко связана с вибратором и совершает колебания той же амплитуды, как и вибратор. В случае бурения неглубоких скважин с применением поверхностных вибраторов, а также при бурении глубоких скважин с забойными вибраторами сделанное допущение не будет иметь существенного значения.

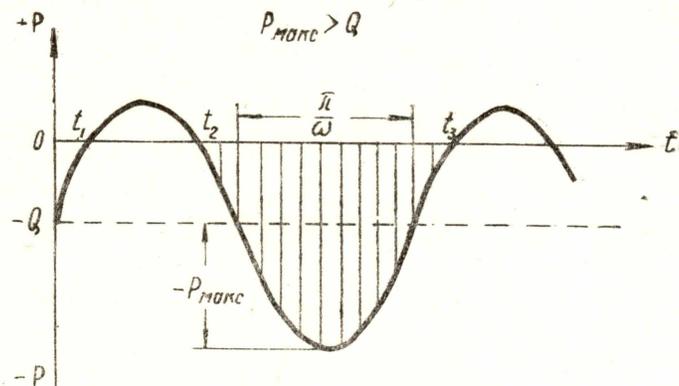


Рис. 6. Диаграмма действующих сил.

Диаграмма действующих сил будет представлена синусоидой, смещенной вниз на величину осевой нагрузки  $Q$  (рис. 6).

Для вычисления динамического импульса, передаваемого коронкой на забой, воспользуемся уравнением этой синусоиды и путем интегрирования определим площадь, ограниченную синусоидой и осью времени (заштрихована на рис. 6). Импульс будет численно равен этой площади

$$y = P_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) - Q.$$

$$\begin{aligned} P \cdot t &= P_{\max} \cdot \int_{t_2}^{t_3} \sin(\omega \cdot t) \cdot dt - Q \cdot \int_{t_2}^{t_3} dt = \\ &= -\frac{P_{\max}}{\omega} \cos(\omega \cdot t_3) + \frac{P_{\max}}{\omega} \cos(\omega \cdot t_2) - Q (t_3 - t_2). \end{aligned}$$

Здесь  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  — угловая скорость эксцентриков, 1/сек.

Для определения пределов интегрирования уравнение синусоиды приравниваем нулю и находим значения  $t_2$  и  $t_3$

$$\sin(\omega \cdot t) = \frac{Q}{P_{\max}};$$

$$\omega \cdot t = \arcsin \frac{Q}{P_{\max}};$$

$$t_1 = \frac{30}{\pi \cdot n} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}};$$

$$t_2 = \frac{30}{n} - t_1;$$

$$t_3 = \frac{60}{n} + t_1.$$

Значения  $t$  подставляются в формулу для определения импульса

$$P \cdot t = -\frac{30 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot n} \cdot \cos \frac{\pi \cdot n}{60} \left( \frac{60}{n} + \frac{30}{\pi \cdot n} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}} \right) + \\ + \frac{30 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot n} \cdot \cos \frac{\pi \cdot n}{30} \left( \frac{30}{n} - \frac{30}{\pi \cdot n} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}} \right) - \\ - Q \cdot \left( \frac{60}{n} + \frac{30}{\pi \cdot n} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}} - \frac{30}{n} + \frac{30}{\pi \cdot n} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}} \right).$$

После соответствующих преобразований импульс по абсолютной величине будет равен

$$P \cdot t = \frac{60 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot n} \cdot \sqrt{1 - \frac{Q^2}{P_{\max}^2}} + \frac{30 \cdot Q}{n} \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{Q}{P_{\max}} \right) \quad (2)$$

Обозначим

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

Тогда получим

$$P \cdot t = \frac{30}{n} [0,64 \sqrt{P_{\max}^2 - Q^2} + Q \cdot (1 + 2K)]. \quad (3)$$

При оптимальном режиме вибрационно-вращательного бурения должно соблюдаться равенство (3)

$$P \cdot t = \frac{Q}{g} \cdot W \cdot \operatorname{tg} \rho_0. \quad (4)$$

Откуда следует

$$W = \frac{P \cdot t \cdot g}{Q \cdot \operatorname{tg} \rho_0};$$

Подставляем в это выражение значение импульса из формулы 3

$$W = \frac{294,3}{n \cdot \operatorname{tg} \rho_0} \cdot \left[ 0,64 \sqrt{\left( \frac{P_{\max}}{Q} \right)^2 - 1} + (1 + 2K) \right]. \quad (5)$$

Пользуясь данной формулой, можно подобрать и вычислить значения ведущих параметров оптимальной работы виброустановки в зависимости от конкретных условий бурения.

Для примера вычислим, какая была окружная скорость коронки при экспериментальном бурении в граните (рис. 4). Параметры режима бурения, соответствующие максимальной скорости углубки, были следующие:  $P_{\max} = 610$  кг,  $n = 1050$  об/мин,  $Q = 120$  кг,  $\rho_0 = 84^\circ$  (гранит)

$$K = \frac{1}{3,14} \arcsin \frac{120}{610} = 0,06.$$

$$W = \frac{294,3}{1050 \cdot \operatorname{tg} 84^\circ} \left[ 0,64 \sqrt{\left( \frac{610}{120} \right)^2 - 1} + (1 + 2 \cdot 0,06) \right] = \\ = 0,0284 (3,20 + 1,12) = 0,121 \text{ м/сек.}$$

В действительности бурение проводилось при окружной скорости коронки 0,12 м/сек. Следовательно, разница между фактической и расчетной скоростями незначительна.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Механизм разрушения горных пород при вибрационно-вращательном бурении кольцевым забоем имеет свои особенности, отличающие его от других способов бурения. Эти отличия связаны с явлением косоугольного удара резцов коронки по забою.

2. Наблюдаемые при вибрационно-вращательном бурении максимумы скорости углубки обусловлены благоприятным соотношением скоростей (окружной и вертикальной), которое приводит к оптимальному углу встречи резцов с поверхностью забоя.

3. Вибрации бурового снаряда снижают расход мощности, снимаемой с вала вращателя, по сравнению со статическим бурением.

4. Предложенная автором формула может быть использована при конструировании буровых установок вибрационно-вращательного действия и подборе оптимального режима бурения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алимов О. Д., Ляпичев И. Г., Серов Я. А. Исследование вращательно-ударного бурения. Известия ТПИ, т. 106, 1958.
2. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. Госстройиздат. 1959.
3. Молчанов В. И., Матросов В. М. К выбору исходных параметров буровых машин вибрационно-вращательного действия. Журнал Разведка и охрана недр, № 2. 1959.