

УДК 622.026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВНЕЦЕНТРЕННЫМИ УДАРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ БУРЕНИИ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Головченко Антон Евгеньевич¹,
antong77@yandex.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поисков путей увеличения предельной глубины бурения скважин ударно-вращательным способом и повышения его производительности.

Цель: установление факта роста производительности процесса ударно-вращательного бурения через повышение механической скорости бурения скважин при увеличении эксцентриситета приложения удара; установление основных зависимостей механической скорости бурения и углубления за оборот как откликов системы «бурение» от величин осевой нагрузки, частоты вращения и эксцентриситета приложения ударных импульсов; обоснование расширения диапазона эффективного разрушения пластичных горных пород.

Объект: механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами.

Методы: постановка и описание эксперимента по разрушению горных пород внецентренными ударными импульсами с использованием в качестве генератора внецентренных ударных импульсов высокочастотного гидроударника ГВ-6; измерение полученных в ходе эксперимента эмпирических данных; статистическая обработка полученных экспериментальных данных для установления усреднённых значений откликов системы; обработка полученных данных по методу полного факторного эксперимента, нахождение математических моделей механической скорости бурения и углубления за один оборот в зависимости от величин осевой нагрузки и частоты вращения и их графическая интерпретация; анализ полученных эмпирическими методами данных, формирование основных выводов по результатам проведённого исследования.

Результаты. Установлен факт роста производительности процесса ударно-вращательного бурения путём фиксации факта повышения механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в диапазоне 0–2 миллиметра. Определён характер изменения откликов системы «углубление за оборот, механическая скорость бурения» при изменении режимных параметров бурения и эксцентриситета приложения ударных импульсов.

Ключевые слова:

Бурение, эксцентриситет, производительность, углубление за один оборот, эксперимент, разрушение, горная порода.

Введение

Ударно-вращательное бурение – проверенный, перспективный и развивающийся высокопроизводительный метод проходки скважин в породах широкого диапазона твердости, в особенности твёрдых и очень твёрдых. Целевое назначение таких скважин может быть различным – от бурения неглубоких технических скважин до геологоразведочных, глубина которых достигает четвёртого десятка метров [1–8]. Но, несмотря на высокую по отношению к традиционному вращательному бурению производительность процесса разрушения горных пород на забое скважины, практическое применение ударно-вращательного бурения ограничено ввиду малой предельной глубины буримых скважин. Данное ограничение обусловлено параметрами серийно выпускаемых на данный момент компрессоров высокого давления – их технические характеристики не обеспечивают вынос шлама с забоя скважин, глубиной свыше первых метров четвёртой сотни [9–13].

Одним из методов повышения производительности процесса разрушения горных пород на забое скважины, а вместе с тем и предельной глубины бурения ударно-вращательным способом является изменение механизма разрушения горных пород, достигаемое путём

нанесения по породоразрушающему инструменту не центральных, а внецентренных ударных импульсов. Нанесение ударных импульсов с эксцентриситетом приводит к возникновению тангенциальных сдвиговых ударных усилий в плоскости забоя скважины, что оказывает влияние на объёмы разрушения горных пород, в особенности расширяя диапазон эффективного использования ударно-вращательного бурения пластичных горных пород, в которых формируемая тангенциальная составляющая ударного импульса реализуется наиболее продуктивно.

Разрушение горных пород в условиях ударно-вращательного бурения является сложным многофакторным параметром, реализуется главным образом с помощью осевого удара высокой энергии, величины частоты вращения при этом сравнительно малы и обеспечивают в большей мере перемещение породоразрушающих элементов по забою скважины, а с помощью осевой нагрузки предотвращается отскакивание долота от забоя скважины [14–16].

Одним из главных комплексных параметров процесса бурения, позволяющих оценить эффективность его проведение, является механическая скорость бурения, численно равная произведению углубления за один оборот породоразрушающего инструмента и его частоты вращения [17]:

$$v_m = h_{об} \cdot \omega.$$

За один оборот забой скважины углубится за величину $h_{об}$, определяемую как

$$h_{об} = \frac{F_{л} \cdot Z}{F_{заб}},$$

где $F_{л}$ – объём лунки разрушения, m^3 ; $F_{заб}$ – площадь забоя скважины, m^2 ; Z – число радиальных резцов на торце породоразрушающего инструмента.

Энергия удара может быть представлена в следующем виде:

$$A \geq F_{л} \cdot q,$$

где q – удельная энергоёмкость разрушения породы, Дж/ m^3 .

Таким образом, выражение для определения механической скорости бурения имеет вид:

$$v_m = \frac{A \cdot Z \cdot \omega}{q \cdot F_{заб}}.$$

Согласно полученной зависимости, механическая скорость бурения ударно-вращательным способом прямо пропорциональна энергии и частоте ударных импульсов, передаваемых забоем скважины, но обратно пропорциональна энергоёмкости разрушения горной породы и площади забоя скважины.

Механизм разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами

При разрушении горных пород центральным ударом под породоразрушающими вставками реализуются нормальные перпендикулярные к плоскости забоя напряжения, разрушение пород производится путём смятия и дробления ударами высокой энергии, а тангенциальные сдвиговые усилия в силу симметричности удара компенсируют друг друга. В то же время при нанесении удара с некоторым эксцентризмом меняется механизм разрушения горной породы – удар становится несимметричным относительно породоразрушающего инструмента, вследствие чего тангенциальные сдвиговые усилия на породоразрушающих вставках перестают компенсировать друг друга, приводя к смещению резцов вдоль забоя скважины и формированию тангенциальных сдвиговых усилий, действующих в плоскости забоя, дополняя нормальные.

На основе теории Ж.В. Буссинеска получены зависимости для расчёта нормальных и касательных напряжений под породоразрушающими вставками при внецентренном ударе согласно схеме на рис. 1:

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \Psi_i \cdot \cos^2 \Delta}{2 \cdot \pi \cdot r_i^2},$$

$$\tau_i = \frac{3 \cdot Q \cdot \cos^2 \Psi_i \cdot \cos \Delta \cdot \sin \Delta}{2 \cdot \pi \cdot r_i^2},$$

где i – номер породоразрушающей вставки, определяющий значение r_i и Ψ_i .

Согласно представленным формулам, очевидно, что при нанесении внецентренного удара напряжения под породоразрушающими вставками будут не равны,

принимая максимальные значения со стороны приложения удара и минимальные в противоположной точке нанесения удара стороне. При этом также важно отметить, что в сравнении с уровнем напряжений под породоразрушающими вставками при центральном ударе (где все напряжения равны между собой) при внецентренном нанесении удара максимальные напряжения значительно выше, а минимальные существенно ниже среднего, установившегося при центральном ударе уровня напряжений под породоразрушающими вставками. Формируемые при нанесении внецентренного ударного импульса тангенциальные ударные усилия оказывают влияние на форму и объёмы лунок разрушения, а также обеспечивают отделение частей массива горных пород, которые испытывали разрушающее воздействие, разделены трещинами, но удерживаются в лунках разрушения силами внутренних связей породы. Таким образом, появление отклоняющей силы, которая действует в плоскости забоя в момент нанесения внецентренного удара и внедрения резцов в породу, приводит к повышению производительности процесса разрушения горных пород на забое скважины [18].

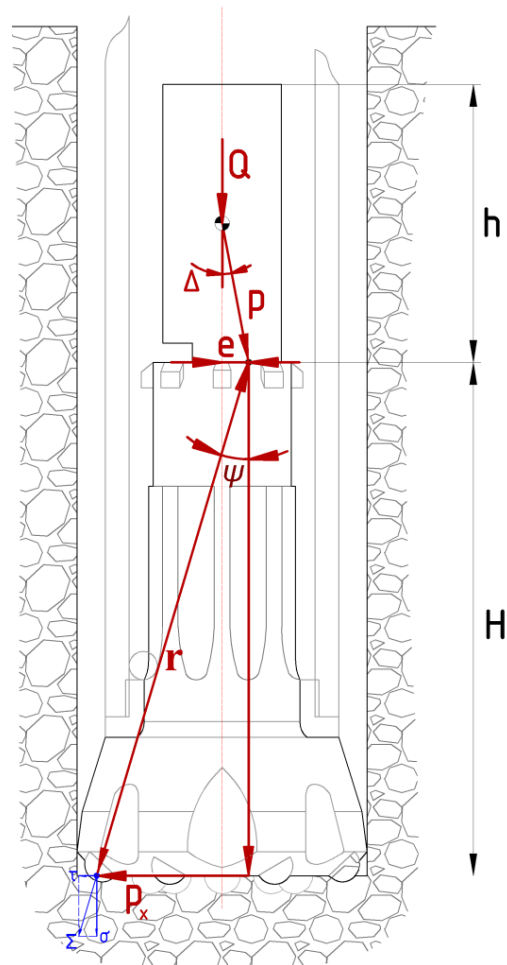


Рис. 1. Схема передачи ударных импульсов и создания напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударе

Fig. 1. Scheme of the transfer of impact pulses and creation of stresses under the picks with a point impact

Также необходимо отметить факт снижения силы удара при росте величины эксцентриситета приложения ударного импульса (рис. 1):

$$P = Q \cdot \cos \Delta = \frac{Q \cdot h}{2 \cdot \sqrt{e^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}},$$

где Q – сила удара, Н; h – высота ударника, м; e – эксцентриситет приложения удара.

Тангенциальное усилие, действующее в плоскости торца породоразрушающего инструмента вследствие нанесения внецентренного ударного импульса и неравенства тангенциальных сдвиговых усилий на породоразрушающих элементах, растёт при увеличении эксцентриситета приложения удара:

$$P_x = \frac{2 \cdot P \cdot e}{\sqrt{4 \cdot e^2 + H^2}} = \frac{Q \cdot e}{\sqrt{(4 \cdot e^2 + H^2) \left(e^2 + \frac{h^2}{4}\right)}} \approx \frac{P \cdot e}{H},$$

где H – высота породоразрушающего инструмента, м.

Согласно полученной зависимости, величина отклоняющей силы прямо пропорциональна силе удара и эксцентриситету приложения ударного импульса, при этом обратно пропорциональна высоте породоразрушающего инструмента (кратчайшему расстоянию от точки приложения внецентренного ударного импульса до забоя скважины). Следовательно, наиболее эффективное применение механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами возможно в условиях пневмоударного бурения, имеющего значительно большую энергию удара по отношению к гидроударному бурению, а также меньшее расстояние от точки его приложения до забоя скважины.

Графическая интерпретация величин силы удара и тангенциального усилия в зависимости от величины эксцентриситета приложения удара представлена на рис. 2.

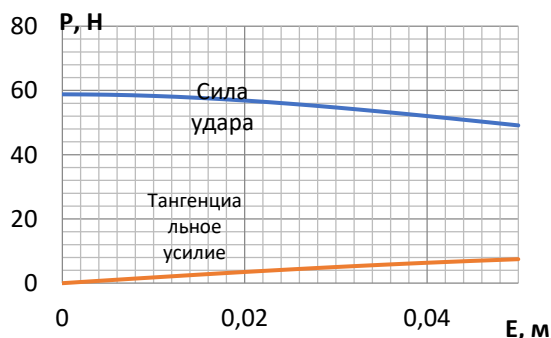


Рис. 2. Зависимость силы удара и тангенциального усилия на породоразрушающих вставках от величины эксцентриситета приложения удара при следующих параметрах ударной системы: вес ударника $Q=58,8$ Н, высота ударника $h=0,152$ м, высота породоразрушающего инструмента $H=0,65$ м

Fig. 2. Dependence of the impact force and the tangential force on the value of the eccentricity of impact application with the following parameters of the impact system: impactor weight $Q=58,8$ N, impactor height $h=0,152$ m, height of the rock-breaking tool $H=0,65$ m

Степень исследованности механизма внецентренного разрушения горных пород

На данный момент известно несколько экспериментальных исследований, каждое из которых чётко указывает на повышение производительности процесса разрушения горных пород при смещении точки нанесения удара от соосного положения на некоторое расстояние. Причём для различных параметров ударной системы и различных физико-механических свойств разрушаемых горных пород оптимальные величины эксцентриситета (смещения от соосного расположения) приложения удара будут различаться.

Так, например, известны результаты стендовых испытаний разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при нанесении единичных ударов (рис. 3). Испытания подвергались мрамор (имеющий твёрдость 765 МПа и коэффициент пластичности 3,3) и гранодиорит (с твёрдостью 2 489 МПа и коэффициентом пластичности 1,1). Удар наносился с двумя уровнями энергии – 0,17 и 0,2 кДж, величина эксцентриситета его приложения варьировалась в диапазоне от 0 до 42 мм, долото снабжено восьмью породоразрушающими вставками с полусферической рабочей поверхностью из сплава ВК и имеет диаметр 90 мм [18].

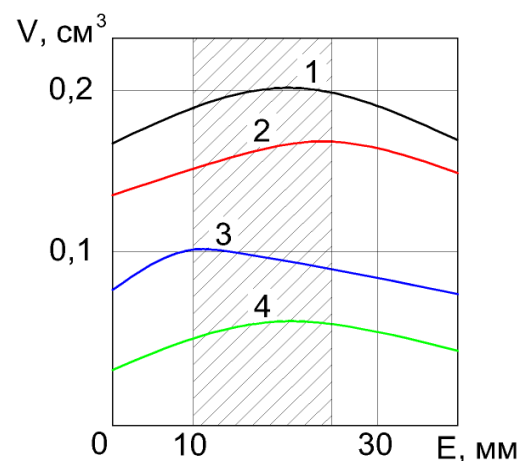


Рис. 3. Зависимости объёма разрушения мрамора – линии 1, 3 и гранодиорита – линии 2, 4 от эксцентриситета приложения ударов при энергии удара 0,2 кДж (две верхние линии) и 0,17 кДж (две нижние линии) [18]

Fig. 3. Dependence of the marble destruction volume – lines 1, 3 and granodiorite – lines 2, 4 on the eccentricity of impact application at impact energy of 0,2 kJ (two upper lines) and 0,17 kJ (two lower lines) [18]

Представленные графики свидетельствуют о том, что для каждой конкретной практической ситуации (совокупность геологических факторов и технических характеристик ударной системы) существует определённая величина эксцентриситета приложения внецентренного ударного импульса, которая приведёт к максимальному приросту объёма разрушения горной породы. Также, по представленным зависимостям объёмов разрушения горных пород от эксцентриситета приложения удара, можно отметить, что с увели-

чением энергии единичного удара оптимальная величина эксцентриситета также увеличивается.

Также известны результаты опытного бурения на стенде с наложением внецентренных ударных импульсов при гидроударном бурении алмазными коронками долерита и мрамора, где отмечен рост производительности бурения при определённых, в интервале от 1 до 3 мм, величинах эксцентриситета приложения удара [19].

Проведённые испытания разрушения долерита показали, что максимальные значения механической скорости бурения при всех значениях эксцентриситета приложения удара (в эксперименте реализовывались ударные импульсы с величиной эксцентриситета 0; 2,4; 6,8; 11 мм) были наибольшим значении частоты вращения породоразрушающего инструмента. При этом максимальная интенсивность роста механической скорости (являющейся комплексным показателем производительности процесса разрушения горных пород) наблюдалась при увеличении эксцентриситета приложения удара от 0 (центральный удар) до 2,4 мм. При испытании менее прочного и более пластичного мрамора получены аналогичные результаты.

Методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных

Опытное исследование разрушения горных пород производилось на буровом стенде (рис. 4). К основным узлам, комплектующим стенд, относятся: буровой станок СКБ-4, установленный на эстакаде высотой около двух метров и оборудованный прибором ИСБ для измерения механической скорости бурения; насос буровой НБ-3, обеспечивающий подачу промывочной жидкости в диапазоне от 15 до 120 л/мин; устройство фиксации блока буримой горной породы размером 0,7×0,7×0,7 м; зумпф.

В рамках эксперимента производилось бурение интервала l_b , составляющего 0,01 м с измерением затраченного на этот процесс времени t . Измерение производилось вручную механическим секундомером второго класса точности «Агат». Количество подаваемой в ходе эксперимента промывочной жидкости – воды – оставалось неизменным – 70 л/мин.

Компоновка для экспериментального исследования бурения интервала 0,01 м мрамора и долерита включала в себя трёхшарошечное долото 3Ш-59-К-ЦА в качестве породоразрушающего инструмента и высокочастотный гидроударник ГВ-6 [20]. Эксцентриситет приложения удара в 1 и 2 мм обеспечивался модификацией торца ударника путём удаления определённой части его нижнего торца (рис. 5).

Обработка результатов опытного исследования разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами в условиях ударно-вращательного бурения скважин выполнялась по плану полного факторного эксперимента. В соответствии с ним для реализации всех возможных комбинаций уровней факторов общее минимальное количество опытов равно $N=2^k$, где k – число факторов. В приведённом опыте в качестве факторов приняты два параметра режима

бурения: частота вращения бурового снаряда ω , осевая нагрузка P_{oc} , соответственно число необходимых опытов равно четырём. Для того чтобы факторный эксперимент считался полным, в нём должны быть учтены все возможные комбинации на двух уровнях.

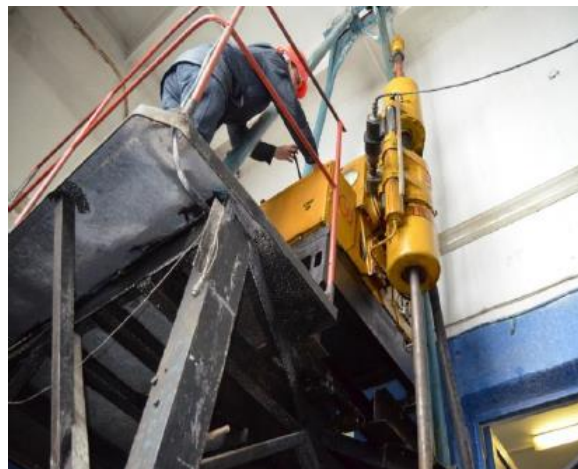


Рис. 4. Стенд для проведения экспериментальных работ на базе станка СКБ-4

Fig. 4. Stand for experimental work on the basis of the SKB-4 drill rig



Рис. 5. Модифицированный ударник для нанесения внецентренного ударного импульса

Fig. 5. Modified impactor for applying an eccentric impact pulse

При проведении исследований непосредственно фиксируемым показателем являлась скорость бурения блока горной породы на интервале длиной 0,01 м. В качестве откликов системы приняты величины механической скорости бурения v_m (1) и углубления за один оборот $h_{об}$ (2). План экспериментальных работ представлен в табл. 1.

$$v_m = \frac{36 \cdot l_b}{t} \text{ м/ч}, \quad (1)$$

$$h_{об} = \frac{v_m}{60 \cdot \omega} \text{ м}. \quad (2)$$

Таблица 1. План экспериментальных работ

Table 1. Plan of experimental work

Номер опыта Experiment number	Значения факторов в кодовых обозначениях Factor values in code notation				Отклики Feedback	
	B_0	P_{oc}	ω	ωP_{oc}	v_m	$h_{об}$
1	+	–	–	+	–	–
2	+	–	+	–	–	–
3	+	+	–	–	–	–
4	+	+	+	+	–	–

Факторами, наиболее значительно влияющими на процесс бурения, являются основные режимные параметры – осевая нагрузка P_{oc} , даН, фиксируемая на уровнях 800 и 1200 даН, и частота вращения ω , мин^{–1}, фиксируемая при значениях 155 и 390 мин^{–1}. Так как для проведения эксперимента выбрано два фактора, число опытов, необходимое для его проведения, – 4. Сочетания выбранных величин факторов позволили установить четыре режима бурения (табл. 2):

Таблица 2. Сочетания факторов при различных режимах бурения

Table 2. Combinations of factors for different drilling modes

Фактор/Factor	Режим/Mode			
	1	2	3	4
Осевая нагрузка, даН Axial load, daN	800	1200	800	1200
Частота вращения, мин ^{–1} Rotational frequency, min ^{–1}	155	155	390	390

Результаты экспериментального исследования разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами в условиях ударно-вращательного бурения

Для повышения достоверности полученных эмпирических результатов при каждом установленном режиме была проведена серия опытных исследований, состоящая из трёх повторений. Достоверным значением отклика системы считалось среднее значение по результатам трёх повторений эксперимента с относительным отклонением отдельных значений от среднего не более 7 % (3). При превышении обозначенного порога относительного отклонения значение не принималось как достоверное и не учитывалось в расчётах.

$$\varepsilon = \frac{v_{mi} - v_m}{v_m} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Обобщённые значения механической скорости бурения как отклика системы при различных режимах бурения долерита и мрамора представлены в табл. 3.

На основании анализа результатов экспериментального исследования по методу полного факторного эксперимента построены математические модели механической скорости бурения долерита для величин эксцентриситета приложения удара, равных 0 мм: $E=0$ мм

$$v_m = 1,316 + 0,719 \cdot P_{oc} + 0,389 \cdot \omega + 0,196 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$v_m = 1,627 + 0,98 \cdot P_{oc} + 0,551 \cdot \omega + 0,321 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$v_m = 1,788 + 1,067 \cdot P_{oc} + 0,561 \cdot \omega + 0,285 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Таблица 3. Обобщённые значения откликов системы

Table 3. Generalized system response values

Долерит/Dolerite				
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	Осевая нагрузка, даН Axial load, daN	Механическая скорость при, м/ч Mechanical speed at, m/h		
		$E=0$ мм (mm)	$E=1$ мм (mm)	$E=2$ мм (mm)
155	800	0,403	0,417	0,445
	1200	0,790	0,877	0,997
390	800	1,450	1,735	2,010
	1200	2,620	3,480	3,700
Мрамор/Marble				
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	Осевая нагрузка, даН Axial load, daN	Механическая скорость при, м/ч Mechanical speed at, m/h		
		$E=0$ мм (mm)	$E=1$ мм (mm)	$E=2$ мм (mm)
155	800	0,817	0,925	1,090
	1200	1,810	1,940	2,243
390	800	2,070	3,267	3,665
	1200	3,460	5,673	6,690

В ходе анализа полученных эмпирических результатов по методу полного факторного эксперимента выявлены основные закономерности изменения механической скорости бурения долерита от величин осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов. Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рис. 6.

Согласно полученным математическим моделям механической скорости бурения долерита при максимальных технологических режимах зафиксированы следующие предельные значения v_m :

- 2,62 м/ч при центральном ударе ($E=0$ мм);
- 3,479 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 33 %);
- 3,701 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 41 %, относительно величины механической скорости при $E=1$ мм – 6 %).

Согласно полученным зависимостям механической скорости бурения долерита от осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения удара можно сделать следующие основные выводы:

- максимальные величины механической скорости бурения долерита зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударного импульса;
- при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале от 0 до 2 мм без изменения технологических параметров бурения механическая скорость перманентно возрастает;
- отмечено большее влияние величины осевой нагрузки на механическую скорость бурения, нежели частоты вращения снаряда.

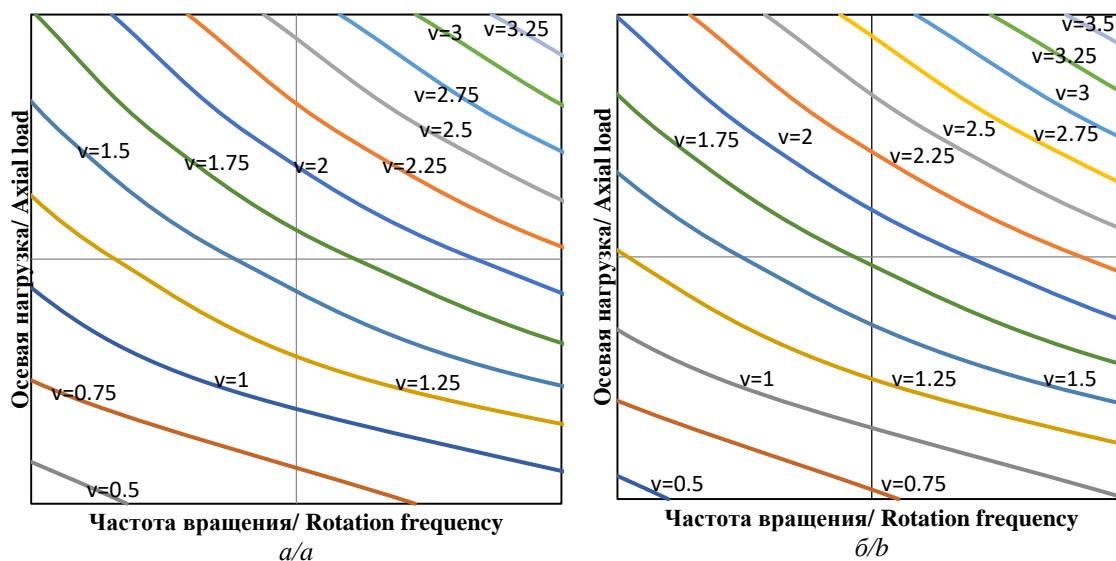


Рис. 6. Механическая скорость разрушения долерита при: а) $E=1$ мм; б) $E=2$ мм

Fig. 6. Mechanical rate of dolerite destruction at: а) $E=1$ mm; б) $E=2$ mm

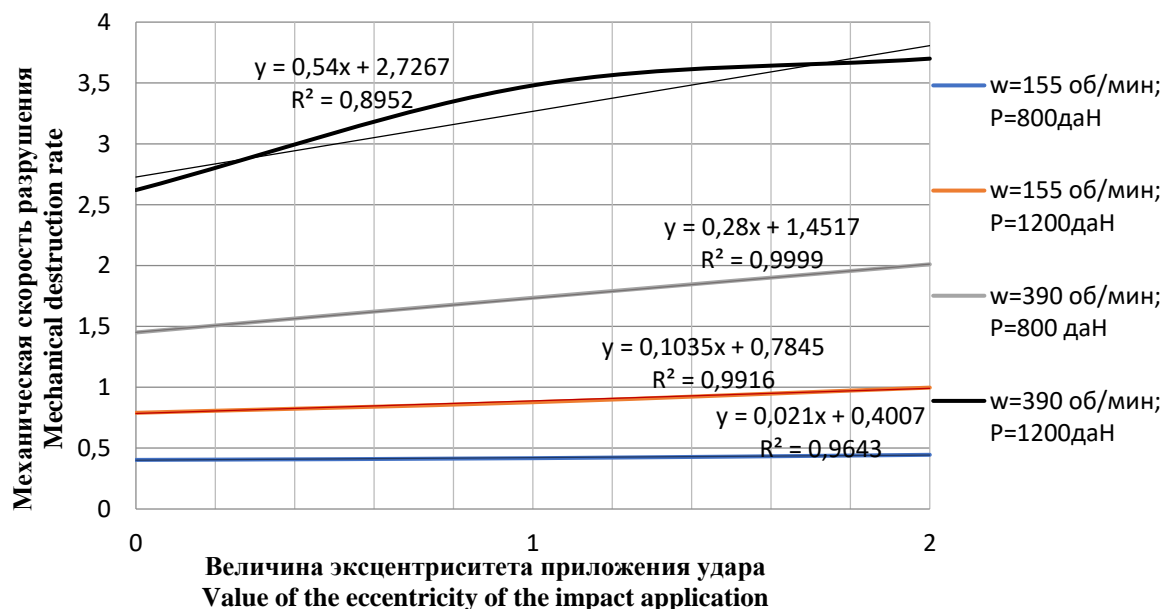


Рис. 7. Механическая скорость разрушения долерита при различных величинах эксцентриситета приложения удара

Fig. 7. Mechanical rate of dolerite destruction at different values of the impact application eccentricity

Анализ данных диаграммы зависимости механической скорости бурения долерита от величины эксцентриситета приложения удара при различных режимах бурения на рис. 7 позволяет сделать следующие выводы:

- интенсивность роста величины механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов повышается с интенсификацией режимных параметров;
- увеличение эксцентриситета приложения удара на всём диапазоне интервала от 0 до 2 мм при различных сочетаниях режимных параметров приводит к повышению механической скорости бурения с определённой эффективностью.

Анализ результатов эмпирического исследования разрушения мрамора согласно представленной выше

методике полного факторного эксперимента позволил определить математические модели механической скорости бурения мрамора для величин эксцентриситета приложения удара, равных

$E=0$ мм:

$$v_m = 2,039 + 0,726 \cdot P_{oc} + 0,596 \cdot \omega + 0,099 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$v_m = 2,951 + 1,519 \cdot P_{oc} + 0,855 \cdot \omega + 0,348 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$v_m = 3,422 + 1,756 \cdot P_{oc} + 1,045 \cdot \omega + 0,468 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Согласно полученным математическим моделям механической скорости бурения мрамора при максимальных технологических режимах зафиксированы следующие предельные значения v_m :

- 3,46 м/ч при центральном ударе ($E=0$ мм);
- 5,673 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 64 %);
- 6,691 м/ч при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение механической скорости относительно соответствующей при центральном ударе равно 93 %, относительно величины механической скорости при $E=1$ мм – 18 %).

Основные выводы по полученным зависимостям механической скорости бурения мрамора от осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения удара в общем схожи с аналогичными выводами по разрушению долерита, не-

смотря на большую разницу физико-механических свойств этих двух горных пород (рис. 8, 9).

В качестве обобщённого сравнения по внецентренному разрушению мрамора и долерита можно отметить следующую тенденцию – большая интенсивность роста механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в интервале от 0 до 2 мм наблюдалась для имеющего более низкие прочностные характеристики относительно долерита мрамора, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров. Исходя из интенсивности роста механической скорости бурения представленных пород, можно предположить, что оптимальная величина эксцентриситета приложения внецентренного удара для мрамора несколько выше, чем для долерита.

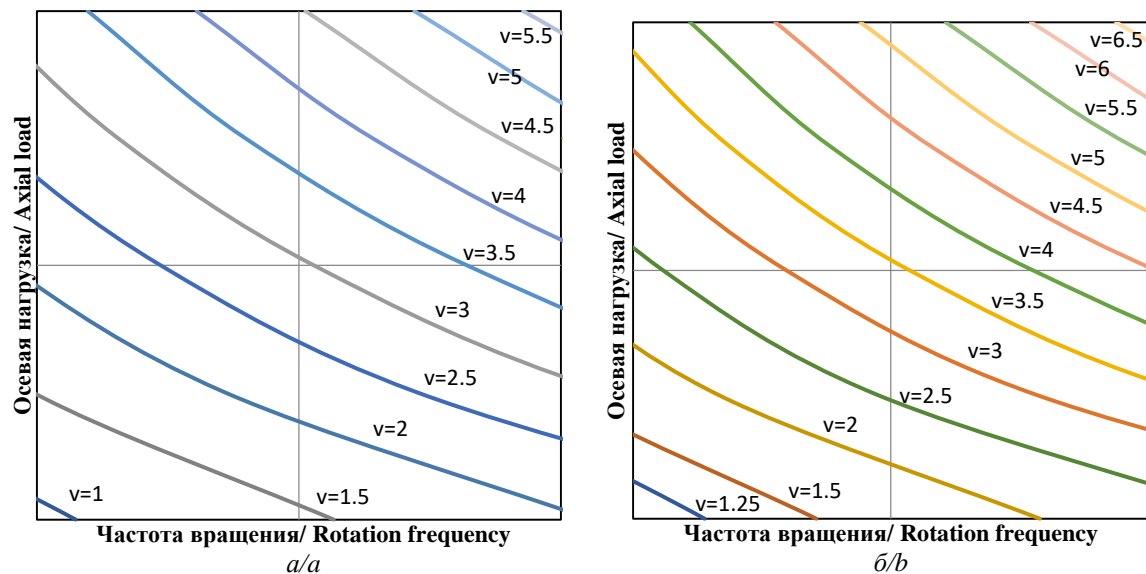


Рис. 8. Механическая скорость разрушения мрамора при: а) $E=1$ мм; б) $E=2$ мм

Fig. 8. Mechanical rate of marble destruction at: a) $E=1$ mm; b) $E=2$ mm

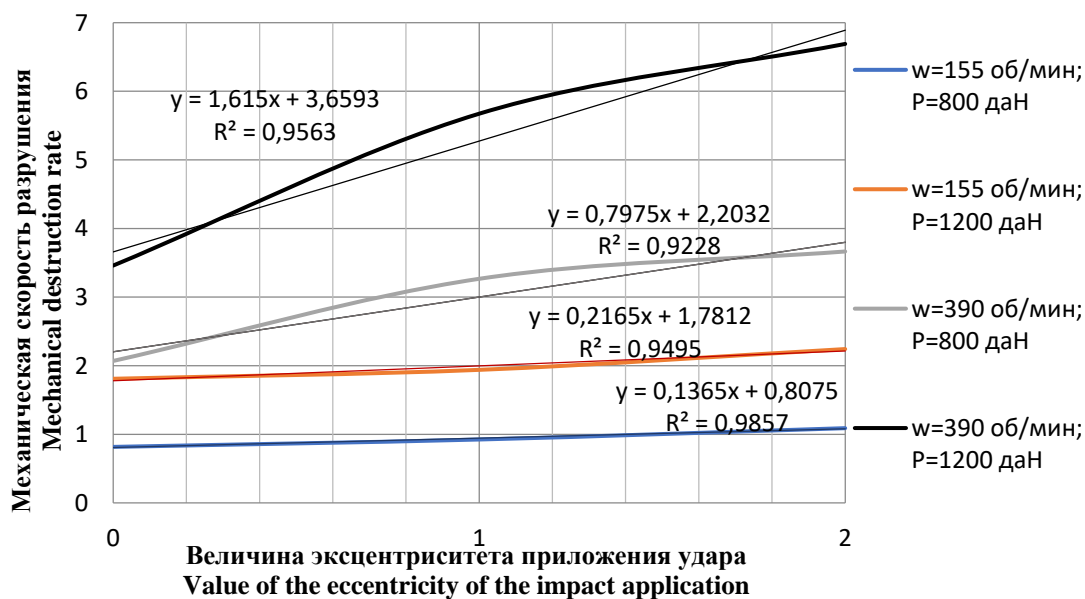


Рис. 9. Механическая скорость разрушения мрамора при различных величинах эксцентриситета приложения удара

Fig. 9. Mechanical rate of marble destruction at different values of the impact application eccentricity

Обобщённые значения углубления за один оборот как отклика системы при различных режимах бурения долерита и мрамора представлены в табл. 4.

Таблица 4. Обобщённые значения откликов системы

Table 4. Generalized system response values

Долерит/Dolerite				
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	Осевая нагрузка, даН Axial load, daN	Углубление за оборот при, мм/об Recess per rev. at, mm/rev		
		E=0 mm/mm	E=1 mm/mm	E=2 mm/mm
155	800	0,0433	0,0447	0,0475
	1200	0,085	0,0943	0,1073
390	800	0,0623	0,074	0,086
	1200	0,112	0,1485	0,1583
Мрамор/Marble				
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	Осевая нагрузка, даН Axial load, daN	Углубление за оборот при, мм/об Recess per rev. at, mm/rev		
		E=0 mm/mm	E=1 mm/mm	E=2 mm/mm
155	800	0,0877	0,0995	0,117
	1200	0,1912	0,193	0,2413
390	800	0,0885	0,1393	0,1565
	1200	0,148	0,2427	0,2857

На основании обработки результатов экспериментального исследования разрушения блока горной породы построены математические модели углубления за оборот при бурении долерита для величин эксцентриситета приложения удара, равных $E=0$ мм:

$$h_{00} = 0,07565 + 0,0115 \cdot P_{oc} + 0,02285 \cdot \omega + 0,002 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$h_{01} = 0,09038 + 0,02088 \cdot P_{oc} + 0,03103 \cdot \omega + 0,0249 \cdot P_{oc} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$h_{02} = 0,09978 + 0,02238 \cdot P_{oc} + 0,03303 \cdot \omega + 0,00313 \cdot P_{oc} \cdot \omega.$$

Максимальные расчётные величины углубления за оборот при бурении долерита при максимальных режимных параметрах составляют:

- 0,112 мм/об при центральном ударе ($E=0$ мм);
- 0,1672 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение углубления за оборот относительно соответствующей при центральном ударе равно 49 %);
- 0,1583 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение углубления за оборот относительно соответствующей при центральном ударе равно 41 %)

Графическая интерпретация полученных зависимостей углубления за один оборот при бурении долерита от величин осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов, полученные при обработке эмпирических результатов по методу полного факторного эксперимента, представлены на рис. 10.

Согласно полученным зависимостям углубления за оборот при бурении долерита от осевой нагрузки, частоты вращения и величины эксцентриситета приложения удара сформулированы следующие выводы:

- максимальные величины углубления за оборот при бурении долерита зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударных импульсов;
- при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале 0–1 мм наблюдается повышение углубления за оборот на 49 %, дальнейшее повышение эксцентриситета в интервале 1–2 мм привело к понижению углубки за оборот на 5 %;
- отмечено несколько большее влияние величины частоты вращения на формирование величины углубления за один оборот, нежели осевой нагрузки.

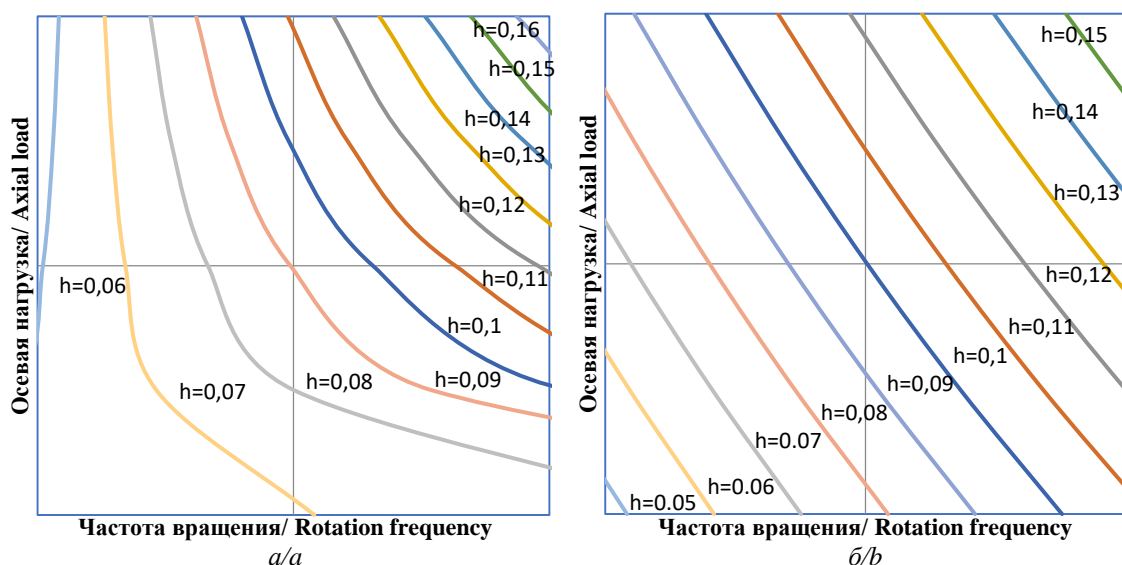


Рис. 10. Углубление за один оборот при разрушении долерита при: а) $E=1$ мм; б) $E=2$ мм

Fig. 10. Recess per one revolution in dolerite destruction at: а) $E=1$ mm; б) $E=2$ mm

Согласно полученным графикам зависимости углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения при бурении долерита (пример для эксперимента с нанесением ударных импульсов с величиной эксцентриситета $E=2$ мм приведён на рис. 11) разрушение горных пород производится в зоне усталостно-поверхностного режима (так как большая величина углубления за один оборот при постоянной осевой нагрузке достигается при максимальной частоте вращения).

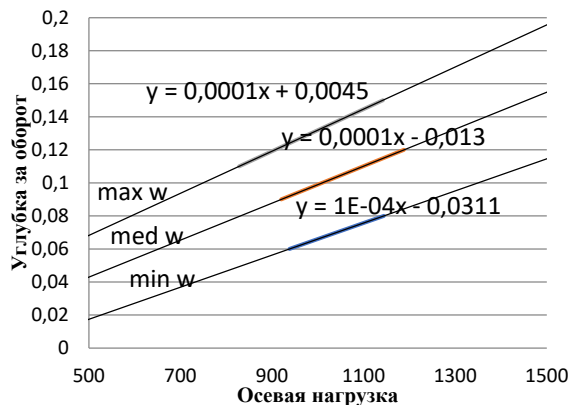


Рис. 11. Углубление за один оборот в зависимости от осевой нагрузки и частоты вращения при: $E=2$ мм (долерит)

Fig. 11. Dependence of the recess per revolution on the axial load and rotation speed at: $E=2$ millimeters (dolerite)

На основании результатов исследования разрушения блока горной породы были построены математические модели углубления за оборот при бурении

мрамора для величин эксцентриситета приложения удара, равных

$E=0$ мм:

$$h_{об} = 0,12885 - 0,0106 \cdot P_{ос} + 0,04075 \cdot \omega - 0,011 \cdot P_{ос} \cdot \omega,$$

$E=1$ мм:

$$h_{об} = 0,168625 + 0,022375 \cdot P_{ос} + 0,049225 \cdot \omega + 0,002475 \cdot P_{ос} \cdot \omega,$$

$E=2$ мм:

$$h_{об} = 0,2 + 0,020975 \cdot P_{ос} + 0,06338 \cdot \omega + 0,00123 \cdot P_{ос} \cdot \omega.$$

Максимальные расчётные величины углубления за оборот при бурении мрамора при максимальных режимных параметрах составляют:

- 0,0934 мм/об при центральном ударе ($E=0$ мм);
- 0,2427 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=1$ мм (повышение углубления за оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 160 %);
- 0,2856 мм/об при эксцентриситете приложения удара $E=2$ мм (повышение углубления за оборот относительно соответствующего при центральном ударе равно 206 %, относительно величины $h_{об}$ при $E=1$ мм – 18 %).

Значение углубления за один оборот при разрушении мрамора с нанесением центральных ударных импульсов в сравнении с соответствующими значениями для долерита представляется аномально низким. Вероятно, данное обстоятельство связано с ненадлежащим выполнением эксперимента, так как при расчёте данного параметра было зафиксировано и не учтено в расчётах три аномальных значения.

Графическая интерпретация полученных зависимостей углубления за один оборот при бурении мрамора от величин осевой нагрузки, частоты вращения бурового инструмента и величины эксцентриситета приложения ударных импульсов представлены на рис. 12.

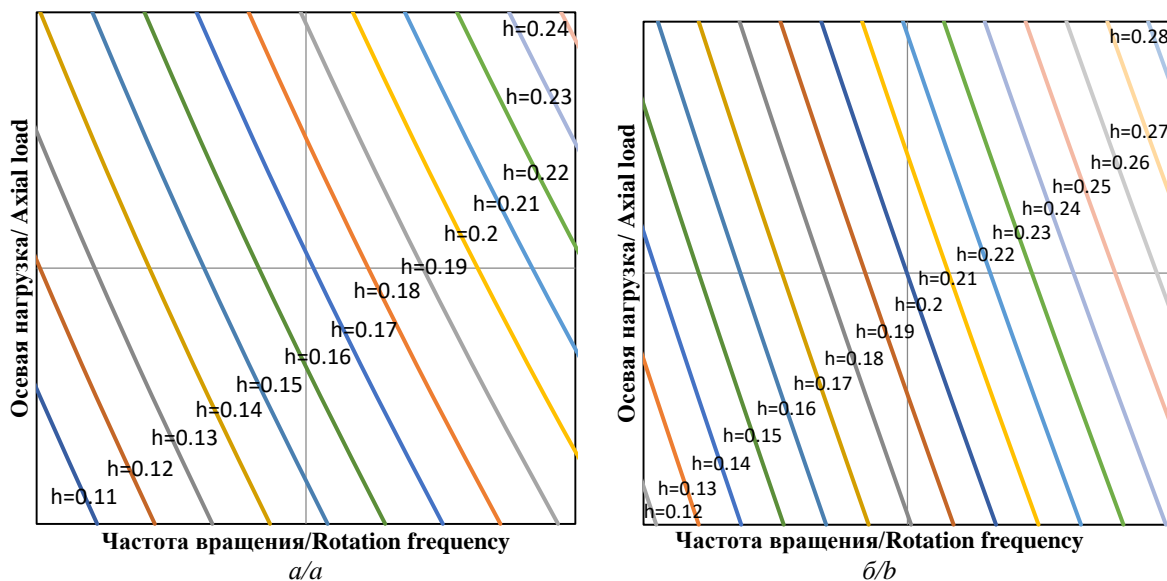


Рис. 12. Углубление за один оборот при разрушении мрамора при: а) $E=1$ мм; б) $E=2$ мм

Fig. 12. Recess per one revolution in marble destruction at: а) $E=1$ mm; б) $E=2$ mm

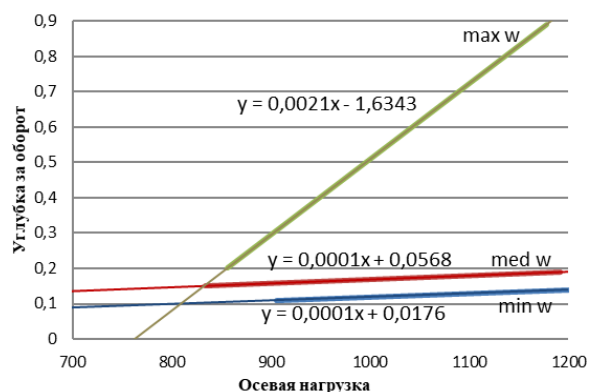


Рис. 13. Зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения при $E=1$ мм (мрамор)

Fig. 13. Dependence of the recess for one revolution on the axial load and rotation frequency at $E=1$ millimeters (marble)

Результаты анализа зависимости параметра углубления за один оборот от величин осевой нагрузки, частоты вращения и эксцентриситета приложения удара (рис. 12, 13) в общем соответствуют результатам, полученным при эксперименте с долеритом – максимальные величины углубления за оборот при бурении мрамора зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударных импульсов, а также отмечено несколько большее влияние величины частоты вращения на формирование величины углубления за один оборот, нежели осевой нагрузки. Режим разрушения мрамора, сообразно режиму разрушения долерита, производится в усталостно-поверхностной зоне.

Заключение

Разрушение горных пород внецентренными ударными импульсами – современный прогрессивный метод повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин. Его практическая верификация произведена серией экспериментов:

- простейшее определение объемов разрушения горных пород одиночными внецентренными ударными импульсами с измерением объема, глубины и площади образующихся лунок разрушения [18];
- анализ внецентренного разрушения горных пород гидроударником с использованием колонковой трубы и алмазной коронки в качестве породоразрушающего инструмента [19];
- в данном исследовании – разрушение горных пород внецентренными ударными импульсами с использованием гидроударника как инструмента, генерирующего ударные импульсы, и трёхшарошечного долота в качестве породоразрушающего инструмента.

Все исследования зафиксировали повышение объемов разрушения горных пород при определённых

величинах эксцентриситета приложения удара, зависящих от физико-механических свойств разрушаемых горных пород и параметров ударной системы. Как правило, оптимальная величина эксцентриситета приложения удара не превышает двадцати миллиметров. При этом с увеличением эксцентриситета приложения удара, очевидно, энергия наносимого удара снижается, с чем, вероятно, в том числе и связано снижение объемов разрушения горных пород при величинах эксцентриситета приложения удара выше оптимального диапазона. Но в то же время тангенциальное усилие на породоразрушающих вставках, приводящее к смещению породоразрушающих элементов, возрастает с увеличением эксцентриситета. Оптимальная его величина, соответствующая максимальному приросту объемов разрушения горных пород, предположительно, соответствует лучшему сочетанию уменьшения силы прикладываемого внецентренного удара и прироста передаваемой забой скважины его тангенциальной составляющей.

Основные выводы по представленным эмпирическим данным, их интерпретации и анализу:

- максимальные величины механической скорости бурения и углубления за один оборот долерита и мрамора зафиксированы при максимальных величинах осевой нагрузки и частоты вращения бурового инструмента независимо от величины эксцентриситета приложения ударного импульса;
- при увеличении эксцентриситета приложения ударного импульса на интервале от 0 до 2 мм без изменения технологических параметров бурения механическая скорость бурения долерита и мрамора перманентно возрастает;
- отмечено большее влияние величины осевой нагрузки на механическую скорость бурения долерита и мрамора, нежели частоты вращения снаряда, в то же время на величину углубления за один оборот несколько большее влияние оказывает частота вращения;
- интенсивность роста величины механической скорости бурения долерита и мрамора при увеличении эксцентриситета приложения ударных импульсов повышается с интенсификацией режимных параметров;
- увеличение эксцентриситета приложения удара на всём диапазоне интервала от 0 до 2 мм при различных сочетаниях режимных параметров приводит к повышению механической скорости бурения долерита и мрамора с определённой эффективностью;
- большая интенсивность роста механической скорости бурения при увеличении эксцентриситета приложения удара в интервале от 0 до 2 мм наблюдалась для имеющего более низкие прочностные характеристики относительно долерита мрамора, независимо от реализуемого сочетания режимных параметров;
- на выбор оптимальной величины эксцентриситета приложения удара влияет тип разрушаемой горной породы – в породах твёрдых, оказывающих

большое сопротивление тангенциальному смещению породоразрушающих элементов, будет более эффективно применение малых величин эксцентриситета, в то время как при разрушении пород более мягких, по тому же принципу, больший эффект будет достигнут при повышенном эксцентриситете приложения ударного импульса;

- отмечено, что и для долерита, и для мрамора, различных по физико-механическим свойствам горных пород, больший прирост механической скорости реализуется на интервале изменения эксцентриситета приложения удара от 0 до 1 мм. Также необходимо отметить, что нанесение внецентренного удара приводит к дестабилизации системы и появлению деструктивного изгибающего

момента как проявлению деструктивной функции внецентренного удара, отрицательно влияющей на конструкцию. Ввиду этого, для систем с большим ударным импульсом оптимален малый эксцентриситет приложения удара, в то время как для систем с малым ударным импульсом оптимальной будет более значительная величина эксцентриситета приложения удара. В качестве решения проблемы проявления деструктивной функции внецентренного удара предложена конструкция породоразрушающего инструмента, содержащего «плавающий» элемент», применение которого призвано снять изгибающий момент с буровой компоновки, не препятствуя передаче внецентренного ударного импульса [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bu C.G., Qu Y.G., Liu B.L. Dynamic modeling and simulation of DTH hammer // Proc. of 16th CIRP International Design Seminar. – Kananaskis, Canada, 2006. – P. 810–813.
2. Bu C.G. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling // Journal of Earth Science. – 2009. – V. 20. – № 5. – P. 868–878.
3. Saadati M. Granite rock fragmentation at percussive drilling – experimental and numerical investigation // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2014. – V. 38. – № 8. – P. 1–33.
4. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – V. 37. – № 3. – P. 309–324.
5. Kivade S.B., Murthy Ch.S., Vardhan H. Laboratory investigations on percussive drilling // Journal of The Institution of Engineers. – 2013. – V. 94. – № 2. – P. 81–87.
6. Experimental study and analysis on a fluidic hammer – an innovative rotary-percussion drilling tool / X. Zhang, S. Zhang, Y. Luo, D. Wua // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 173. – P. 362–370.
7. Aalizad S.A., Farshad R. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks – a case study // Archives of Mining Sciences. – 2012. – V. 57. – № 3. – P. 715–728.
8. Рябчиков С.Я., Храменков В.И., Брылин В.И. Технология и техника бурения геологоразведочных и геотехнологических скважин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 514 с.
9. Леонов С.О., Нескоромных В.В. Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 397–403.
10. Васильев А.Н., Шишляев В.В., Кирильченко А.В. Внедрение ударно-вращательного способа бурения и эффективных методов геолого-промысловых исследований при разведке метанугольных месторождений // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 7. – С. 45–49.
11. Опарин В.Н., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 60–74.
12. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement / C. Song, J. Chung, J. Cho, Y. Nam // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 2018. – P. 1–13.
13. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency / H. Kang, J. Park, J. Cho, J. Jang, K. Kim, J. Lee // Journal of Mechanical Engineering Science. – 2018. – V. 232. – № 16. – P. 2887–2898.
14. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 129 с.
15. Тимонин В.В., Карпов В.Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 172–176.
16. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 8. – С. 216–219.
17. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учебное пособие. – Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2015. – 396 с.
18. Нескоромных В.В. Результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами // Известия ВУЗов «Геология и разведка». – 1999. – № 6. – С. 115–120.
19. Романов Г.Р. Повышение эффективности алмазного бурения на основе результатов исследования влияния асимметричных статических и динамических ударных нагрузок на процесс разрушения горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2018. – 20 с.
20. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: в 2-х т. / под ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – Т. 1. – 512 с.
21. Буровое долото для ударно-вращательного бурения: пат. 2682824 Рос. Федерация. № 2018118680; заявл. 21.05.2018; опубл. 21.03.2019, Бюл. № 9.

Поступила 02.12.2019 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор кафедры технологии и техники разведки Института горного дела геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Головченко А.Е., ассистент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 622.026

EXPERIMENTAL STUDY OF ROCK DESTRUCTION BY ECCENTRIC IMPACT PULSES DURING ROTARY-PERCUSSION DRILLING

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Anton E. Golovchenko¹,
antong77@yandex.ru

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to find the ways to increase the maximum depth of well drilling by the rotary-percussion method and its productivity.

The main aim of the research is to establish the fact of growth of rotary-percussion drilling productivity through rising the mechanical speed of drilling while increasing the impact application eccentricity; determine the basic dependencies of the mechanical drilling speed and recess per one revolution as responses of the drilling system on the values of axial load, rotation frequency and eccentricity of impact application pulses; justify the expansion of the range of effective destruction of plastic rocks.

Objects: mechanism of rock destruction by eccentric impact pulses.

Methods: formulation and description of the experiment on rock destruction by eccentric impact pulses using the high-frequency hydro-hammer HV-6 as a generator of eccentric impact pulses; measurement of empirical data obtained during the experiment; statistical processing of the obtained experimental data to establish the average values of the system responses; processing the data obtained by the method of a full factorial experiment, finding mathematical models of the mechanical drilling speed and recess per one revolution, depending on the values of the axial load and rotational speed and their graphical interpretation; analysis of the data obtained by empirical methods, formation of the main conclusions on the results of the study.

Results. The authors have established the fact of increasing the productivity of the rotary-percussion drilling by determining the fact of mechanical drilling speed growth with rising eccentricity of the impact application in the range of 0–2 millimeters. The main dependences of the mechanical drilling speed and recess per one revolution on the values of axial load, rotation frequency and eccentricity of application of impact pulses were established.

Key words:

Drilling, eccentricity, productivity, recess per one revolution, experiment, destruction, rock.

REFERENCES

1. Bu C.G., Qu Y. G., Liu B. L. Dynamic modeling and simulation of DTH hammer. *Proc. of 16th CIRP International Design Seminar*. Kananaskis, Canada, 2006. pp. 810–813.
2. Bu C.G. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling. *Journal of Earth Science*, 2009, vol. 20, no. 5, pp. 868–878.
3. Saadati M. Granite rock fragmentation at percussive drilling – experimental and numerical investigation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2014, vol. 38, no. 8, pp. 1–33.
4. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37, no. 3, pp. 309–324.
5. Kivade S.B., Murthy Ch.S., Vardhan H. Laboratory investigations on percussive drilling. *Journal of the Institution of Engineers*, 2013, vol. 94, no. 2, pp. 81–87.
6. Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer – an innovative rotary-percussion drilling tool. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 362–370.
7. Aalizad S.A., Farshad R. Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks – a case study. *Archives of Mining Sciences*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 715–728.
8. Ryabchikov S.Ya., Khramenkov V.I., Brylin V.I. *Tekhnologiya i tekhnika bureniya geologorazvedochnykh i geotekhnologicheskikh skvazhin* [Technology and technique of drilling exploration and geotechnological wells]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 514 p.
9. Leonov S.O., Neskoromnykh V.V. Ways to improve the efficiency of rotary-percussion drilling. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 397–403. In Rus.
10. Vasilev A.N., Shishlyayev V.V., Kirilchenko A.V. Introduction of rotary-percussion drilling method and effective methods of geological and field research in the exploration of methane-coal deposits. *Razvedka i ohrana nedr*, 2014, no. 7, pp. 45–49. In Rus.
11. Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N. Kolichestvennaya otsenka effektivnosti protsessa razrusheniya gornykh porod pri udarno-vrashatelnom burenii skvazhin [Quantitative assessment of the effectiveness of the process of destruction of rocks during rotary-percussion drilling of wells]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, no. 6, pp. 60–74.
12. Song C., Chung J., Cho J., Nam Y. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, pp. 1–13.
13. Kang H., Park J., Cho J., Jang J., Kim K., Lee J. Optimal button arrangement of a percussive drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, vol. 232, no. 16, pp. 2887–2898.
14. Sulakshin S.S. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Rock destruction in the well drilling]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2009. 129 p.
15. Timonin V.V., Karpov V.N. Assessment of the process of destruction of rocks during rotary-percussion drilling of wells. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 172–176. In Rus.
16. Borisov K.I. Experimental quantitative assessment of the power characteristics of cutting rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 8, pp. 216–219. In Rus.
17. Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Rock destruction during exploration]. Krasnoyarsk, Siberian State University Publ., 2015. 396 p.
18. Neskoromnykh V.V. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy razrusheniya gornykh porod vneshennymi udarnymi impulsami [The results of experimental studies of the destruction of rocks by eccentric impact pulses]. *Izvestiya VUZov «Geologiya i razvedka»*, 1999, no. 6, pp. 115–120.

19. Romanov G.R. *Povyshenie effektivnosti almaznogo bureniya na osnove rezultatov issledovaniya vliyaniya assimetrichnykh staticheskikh i dinamicheskikh udarnykh nagruzok na process razrusheniya gornykh porod*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of diamond drilling based on the results of a study of asymmetric static and dynamic shock loads influence on rock destruction. Cand. Diss Abstract]. Irkutsk, 2018. 20 p.
20. *Spravochnik inzhenera po bureniyu geologorazvedochnykh skvazhin* [Reference of engineer for drilling exploration wells]. Ed. by E.A. Kozlovsky. Moscow, Nedra Publ., 1984. Vol. 1, 512 p.
21. Neskoromnykh V.V., Golovchenko A.E. *Burovye dolota dlya udarno-vrashchatelnogo bureniya* [Drill bit for rotary-percussion drilling]. Patent RF no. 2018118680, 2019.

Received: 2 December 2019.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

Anton E. Golovchenko, assistant, Siberian Federal University.