

УДК [621.835+621.888].001.5:622.243

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАССТОЯНИЯ ОТ СНАРЯДА ДО ЗАБОЯ

Урниш Виктор Викторович¹,
madvic93@mail.ru

Саруев Лев Алексеевич¹,
saruevla@tpu.ru

Саруев Алексей Львович¹,
saruev@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. При бурении шароструйным способом одним из главных технологических параметров является расстояние от снаряда до забоя. Известно несколько методов и конструкций шароструйного снаряда, которые позволяют поддерживать это расстояние при помощи опорных элементов. Струйный аппарат при этом жёстко удерживается на определённом расстоянии от вооружения, разрушающего периферийную или центральную часть забоя вращательным способом. Однако ни один способ не даёт возможность точно определить значение оптимального расстояния. Так как рассчитать необходимое расстояние для разных пород с учетом их механических характеристик довольно сложно, большое значение приобретает выявление и поддержание оптимального расстояния от снаряда до забоя непрерывно, в процессе бурения.

Цель: провести анализ основных способов и конструкций для поддержания расстояния от снаряда до забоя, сформулировать на их основании требования к снаряду. С учетом требований предложить способ поддержания расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении, позволяющий непрерывно определять необходимое расстояние для текущих условий.

Объектом исследования являются призабойные процессы шароструйного бурения.

Методика: обобщение и анализ литературных источников; исследование технологических процессов шароструйного бурения; исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения горных пород; исследование колонны бурильных труб в качестве акустического канала связи, в котором распространяются упругие колебания при ударах отскакивающих от забоя шаров по долоту; разработка технологической схемы для повышения эффективности шароструйного бурения; экспериментальные исследования с применением датчика акустических колебаний и осциллографической приставки; считывание и анализ осциллограмм.

Результаты. Исследовано расстояние от снаряда до забоя, которое оказывает влияние на эффективность шароструйного бурения. Проведен анализ основных способов и конструкций, на основе которого сформулированы требования к буровому снаряду. С учетом разработанных требований предложен способ поддержания оптимального расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении. Представлены результаты проведения эксперимента предложенным способом, доказывающие эффективность его использования с целью непрерывного определения расстояния от снаряда до забоя. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования технологии непрерывного поддержания оптимальных режимов бурения.

Ключевые слова:

Разрушение горных пород, породоразрушающий инструмент, шароструйное бурение, шароструйный снаряд, расстояние от снаряда до забоя, датчик акустических колебаний.

Введение

В настоящее время активно проводится поиск новых способов бурения скважин различного назначения. Повышение эффективности бурения в крепких горных породах может быть реализовано за счет разработки новых материалов и новых конструктивных решений для породоразрушающего инструмента (ПРИ). Несмотря на постоянное совершенствование ПРИ, бурение механическими способами в твердых горных породах остается недостаточно эффективным, так как характеризуется низкой механической скоростью бурения и величиной рейсовой проходки на долото. Поэтому актуальность приобретает разработка альтернативных способов разрушения твердых горных пород [1–5]. Одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ разрушения горных пород, осуществляемый высокоскоростной струей жидкости [6, 7]. Данным способом на забой скважины

можно передавать значительные мощности, при этом скорость бурения и проходка на долото возрастают. Кроме того, этот способ легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами, при которой для очистки скважины от шлама на забой подается промысловая жидкость. Однако гидродинамический способ в традиционном виде малоэффективен для бурения скважин в твердых горных породах [8].

Шароструйный способ бурения скважин, заключающийся в разрушении горных пород высокоскоростными ударами шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне, позволит решить ряд технических и технологических проблем, возникающих при разрушении твердых горных пород [6, 8].

На кафедре бурения скважин Томского политехнического университета А.В. Ковалевым разработана оптимальная конструкция шароструйно-

эжекторного бурового снаряда (ШЭБС), исследованы основные технические и технологические параметры, предложена оригинальная методика расчета процессов шароструйного бурения [8], что является хорошим фундаментом для дальнейших исследований.

В работах, посвященных шароструйному бурению [8–10], отмечается, что на эффективность разрушения горных пород при шароструйном бурении оказывает влияние ряд технологических параметров, одним из которых является оптимальное расстояние от снаряда до забоя (РСЗ).

Методика исследований

Результаты американских исследований [11, 12] показывают, что приближение долота к забою скважины сопровождается увеличением скорости бурения. Однако чрезмерное уменьшение РСЗ приводило к снижению скорости бурения, что объяснялось тем, что вылетающим из вторичного сопла шарам препятствуют шары, отскакивающие от забоя скважины. К тому же при малом значении

расстояния от долота до забоя площадь сечения скважины будет уменьшаться, т. е. будет снижаться диаметр скважины, что приведет к невозможности бурения в связи с заклиниванием шаров в затрубном пространстве. Американские исследователи [11 и др.] выяснили, что для обеспечения равномерного потока шаров в призабойной зоне скважины зазор между долотом и забоем должен составлять 2,8–3,4 от диаметра камеры смещения.

Для проверки этих данных было проведено исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения [13]. Исходные геометрические и технологические параметры: диаметр бурового снаряда $d_{bc}^n=16$ мм, диаметр камеры смещения $d_{kc}=8$ мм, диаметр сопла $d_c=2$ мм, длина камеры смещения $l_{kc}=100$ мм, угол раскрытия диффузора $\alpha_{pd}=10^\circ$, диаметр шаров $D_{ш}=3$ мм, масса порции шаров $m_{ш}=25$ г, расход промывочной жидкости $Q_p=6,7$ л/мин, разрушаемый материал – мрамор, промывочная жидкость – вода.

Как видно из рис. 1, 2, с увеличением расстояния до забоя объем скважины уменьшается, а диа-

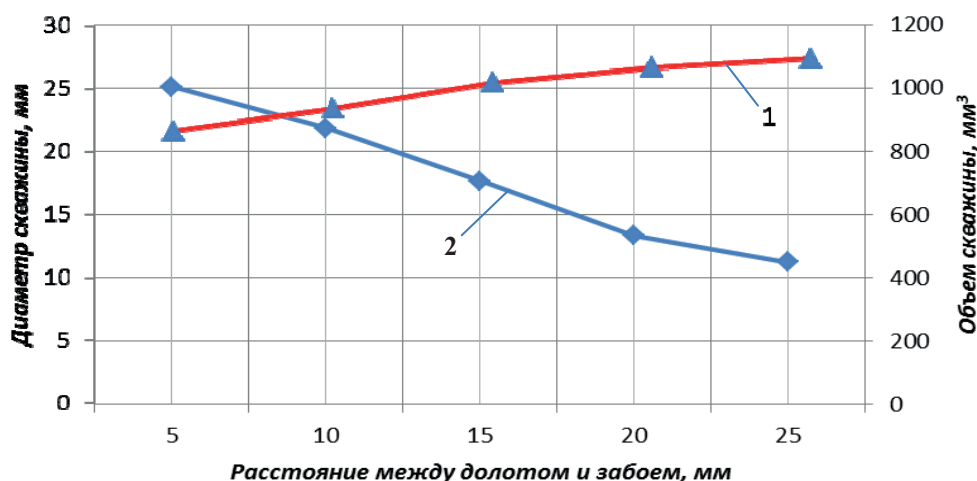


Рис. 1. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

Fig. 1. Dependence of the well diameter (1) and volume (2) on spacing between the drill bit and the hole bottom

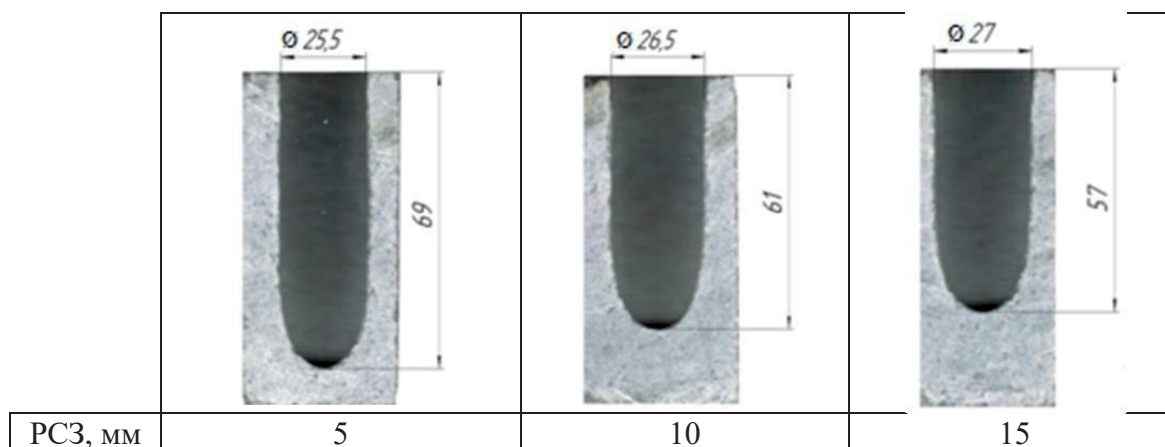


Рис. 2. Профиль скважин, пробуренных при варьировании РСЗ

Fig. 2. Profile of wells drilled with varying the spacing between the drill bit and the hole bottom

метр выработки увеличивается. Таким образом, подтверждаются результаты исследований американских ученых, и, следовательно, необходимо поддерживать минимальное возможное расстояние, при котором вместе с тем не возникает заклинивание шаров. Однако одно и то же значение РСЗ не применимо к различным по механическим свойствам породам, а также технологическим условиям. Поэтому в целях повышения эффективности данного способа бурения необходимо решать проблему оптимизации регулирования РСЗ, которая является достаточно сложной. Предлагались различные способы её решения [12–19].

Один из способов был предложен А.Б. Уваковым [17]. Он основан на определении скорости бурения, т. е. ШЭБС опускался на расчетную глубину через равные промежутки времени при известной скорости проходки скважины. Ограничение применения такой технологии связано с уровнем геологической изученности разреза скважины по глубине. В результате экспериментальных исследований А.Б. Увакова и В.В. Штрассера установлено, что оптимальное расстояние аппарата от забоя, при котором скорость бурения максимальна, находится в пределах 1,8–3,3 диаметра камеры смешения.

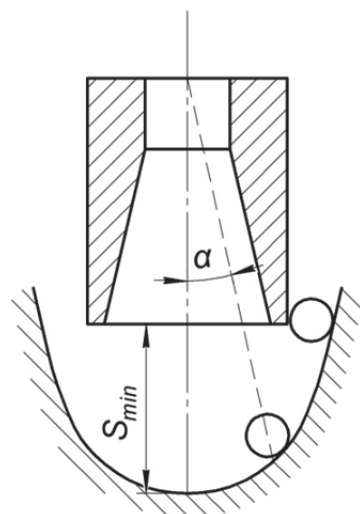


Рис. 3. Расположение аппарата на минимальном расстоянии от забоя

Fig. 3. Position of the drill bit at the minimum distance from the bottom hole

Так, А.Б. Уваков предлагал методику расчета минимального и максимального расстояния от снаряда до забоя [6 и др.], которые являются ограничивающими значениями диапазона выбора оптимального расстояния. Если расстояние между долотом и забоем будет меньше оптимального (рис. 3), процесс углубления скважины будет тормозиться вследствие того, что выходное сечение диффузора находится в области криволинейной части забоя и лишь незначительная часть забоя разрушается непосредственно ударами шаров, разогнавшихся в камере смешения.

При расположении долота в цилиндрической части скважины на таком расстоянии от криволинейного забоя, что вылетающие шары бомбардируют его поверхность полностью (рис. 4), на отскокившие от забоя шары будет воздействовать поток жидкости, вылетающий из диффузора, в результате чего ухудшатся условия их подъема для последующего всасывания. Кроме того, в рассматриваемом случае шары чаще всего будут соударяться с забоем не по нормали, а под некоторым углом α [10].

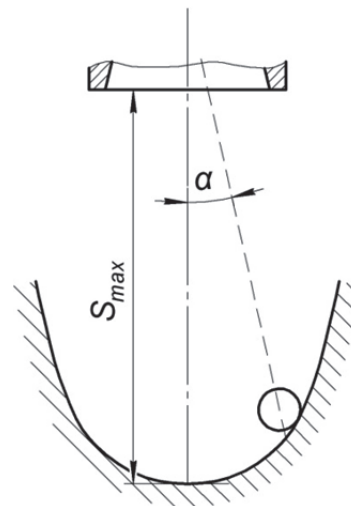


Рис. 4. Расположение аппарата в цилиндрической части скважины

Fig. 4. Position of the drill bit in the cylindrical part of the bottom hole

Другим способом оптимального поддержания РСЗ является расхаживание бурового снаряда, когда в процессе бурения через определённые промежутки времени снаряд опускается до забоя, а затем поднимается на необходимое расстояние. В частности, проводилось бурение на образцах мрамора [20 и др.]. После проходки определенного интервала (рис. 5, б) буровой снаряд кратковременно опускался на забой скважины (рис. 5, в) и поднимался до запланированного расстояния между долотом и забоем (рис. 5, г). Расхаживание производилось с периодичностью $t_{рас}$. В этом случае при контакте снаряда с забоем скважины возникает угроза его деформации под действием осевой нагрузки. Не исключается также возможность гидравлического удара при перекрытии канала бурового снаряда во время его контакта с забоем.

Для решения рассматриваемой проблемы также предлагались различные устройства. Например, Л. Леджервуд предложил конструкцию [15], в основе которой лежит использование механического щупа. При превышении допустимого расстояния до забоя, которое регулируется длиной щупа, опора частично перекрывает канал первичного сопла, вызывая повышение давления в системе подачи бурового раствора, что сигнализирует о необходимости спускать ШЭБС. Из недостатков можно выделить общую ненадёжность конструк-

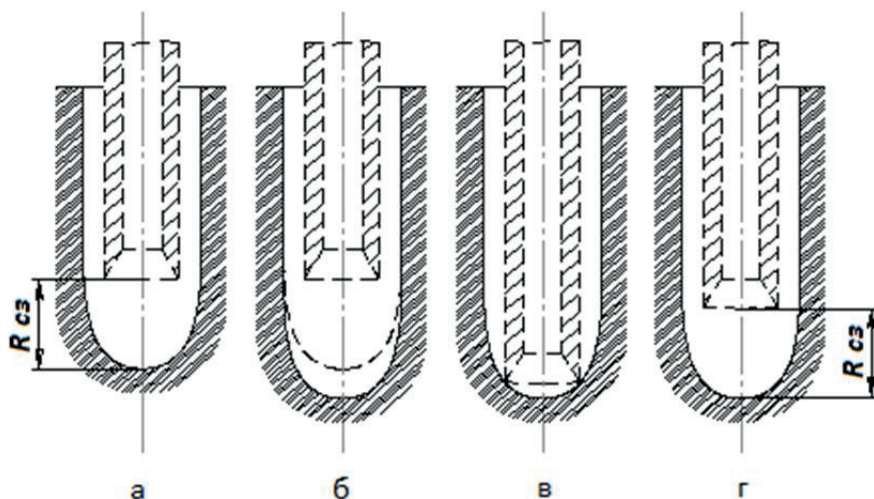


Рис. 5. Схема поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем путем расхождения бурового снаряда

Fig. 5. Scheme for keeping the optimal spacing between the bit and the bottom by pacing the drilling tool

ции, вызванную высокой вероятностью деформации щупа.

Способ поддержания РСЗ посредством счётчика расхода шаров [16] базируется на том, что каждый шар во время движения в камере смещения существенно изменяет индуктивность или ёмкость чувствительного элемента. Оптимальное расстояние от снаряда до забоя устанавливается по максимальному расходу шаров. Предложенная конструкция также имеет недостатки. Первый из них – это необходимость создания канала связи и питания, что усложняет технологическую схему шароструйного бурения. Второй – сложность устройства, как следствие – уменьшение жёсткости и износоустойчивости бурового снаряда за счёт уменьшения его стенок.

Известно несколько конструкций, которые позволяют поддерживать РСЗ при помощи опорных элементов. Струйный аппарат при этом жёстко удерживается на определённом расстоянии от вооружения, разрушающего периферийную или центральную часть забоя вращательным способом.

Недостаток одной конструкции [17] состоит в сложности синхронизации работы долота, реализующего совместное разрушение горных пород вращательным и шароструйным способами. То есть, если центральная часть забоя будет разрушаться быстрее или медленнее периферийной, контроль РСЗ будет осложнён. Кроме того, необходимость вращения инструмента снижает значимость применения шароструйного бурения, одним из основных достоинств которого является отсутствие потребности во вращении снаряда. Недостатком других конструкций [18, 19] является низкая стойкость, обусловленная воздействием породоразрушающих шаров на опорные элементы снаряда, сложность синхронизации работы, бурение шарами малого диаметра. Они также не лишены недостатков предыдущей конструкции, необходимости вращения ШЭБС.

Таким образом, проведённый анализ показал, что каждый из рассмотренных способов поддержания требуемого РСЗ имеет существенные недостатки.

Сопоставив результаты исследований, можно наблюдать большой разброс рекомендуемых значений расстояния между долотом и забоем скважины, что указывает на необходимость более детальных экспериментальных исследований с использованием современных технических средств. Учитывая то, что данный параметр считали ключевым для поддержания требуемого диаметра скважины, рекомендуемые значения расстояния между долотом и забоем являются завышенными. Поэтому необходимо разработать способ непрерывного поддержания оптимального РСЗ.

Это можно осуществить, рассмотрев колонну бурильных труб как акустический канал связи, в котором распространяются упругие колебания при ударах шаров [19, 21]. Оптимизация процесса регулирования расстояния от снаряда до забоя скважины достигается благодаря непрерывной регистрации упругих колебаний, вызванных ударами циркулирующих в призабойной зоне породоразрушающих шаров и фиксируемыми датчиком акустических колебаний, установленным на колонне бурильных труб (рис. 6). В качестве датчика – 7 (Д) могут быть использованы пьезорезистивные акселерометры, которые подходят для измерения длительных переходных процессов и кратковременных ударных воздействий. В данном случае использовался акселерометр Bruel&Kjaer 4383, осциллографическая приставка Velleman PCS500, программное обеспечение для ПК Pc-Lab 2000.

На забой скважины засыпают порцию шаров – 6, спускают буровой снаряд, насосом подается промывочная жидкость. В процессе циркуляции в призабойной зоне скважины шары постоянно взаимодействуют с буровым снарядом, в котором формируются продольные волны деформации в ре-

зультате их отскока от забоя скважины. Формирующиеся упругие колебания передаются по колонне бурительных труб – 1 на устье скважины, где регистрируется датчиком акустических колебаний – 7 (Д), усиливаются с помощью усилителя – 8 (У) и посредством осциллографической приставки – 9 (ОП) направляются на систему управления – 10, задача которой состоит в том, чтобы передавать управляющее воздействие буровому инструменту на основании обратной связи от породы, изменения технологических параметров.

Рис. 6. Способ регулирования РСЗ с применением датчика акустических колебаний: 1 – колонна бурительных труб; 2 – центраторы; 3 – сопло; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары; 7 – датчик акустических колебаний; 8 – усилитель сигнала; 9 – осциллографическая приставка; 10 – система управления

Fig. 6. Method of spacing regulation using an acoustic oscillation sensor: 1 are the drill pipes; 2 are the centralizers; 3 is the nozzle; 4 is the mixing chamber; 5 is the diffuser; 6 are the balls; 7 is the sensor of acoustic oscillations; 8 is the signal amplifier; 9 is the oscillograph attachment; 10 is the control system

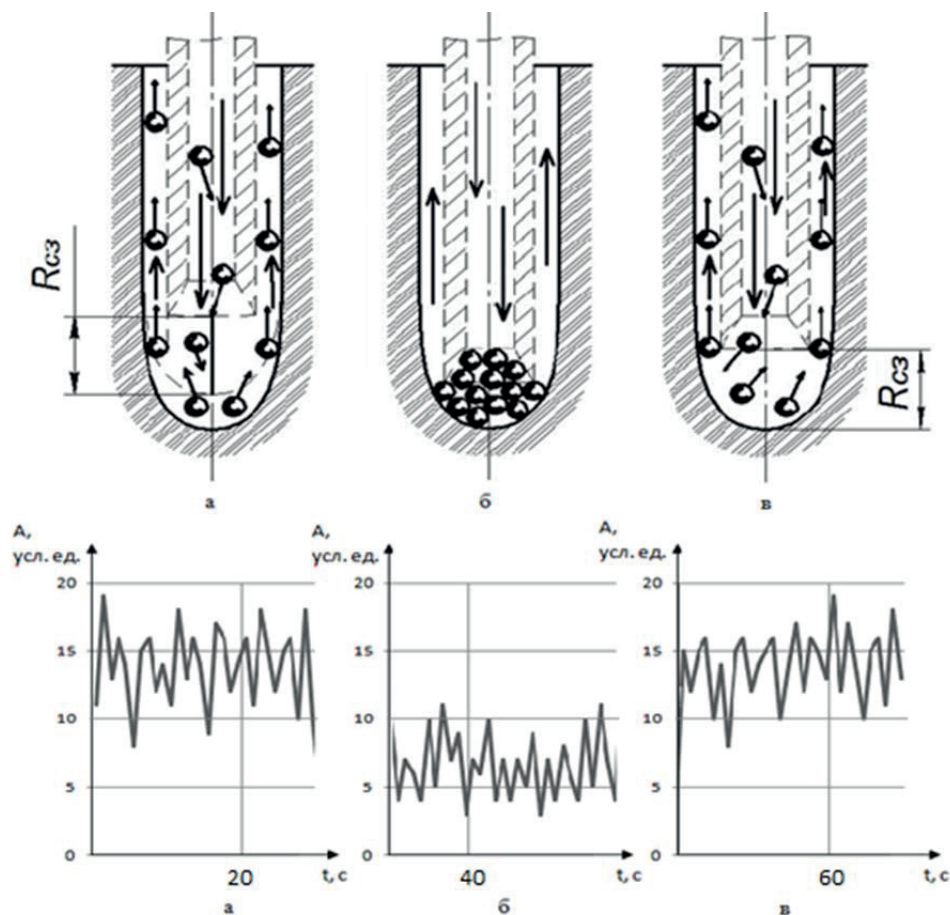
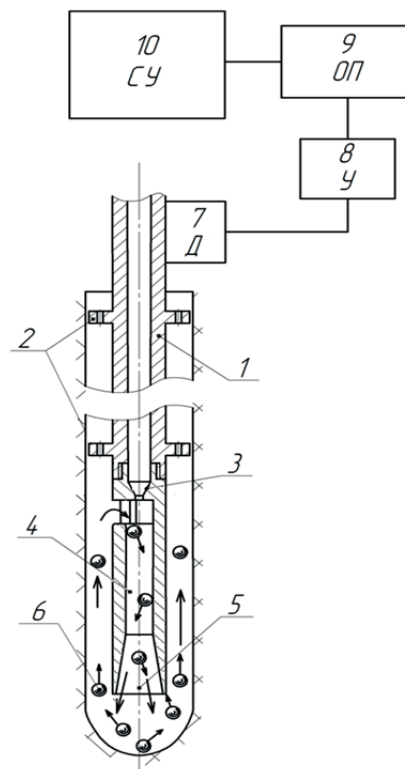


Рис. 7. Схема регулирования расстояния между снарядом и забоем скважины

Fig. 7. Scheme of regulation of the spacing between the bit and the bottom

После забуривания скважины и проходки определенного интервала (рис. 7, а) буровой снаряд кратковременно опускают до момента заклинивания шаров (рис. 7, б), сопровождающегося снижением амплитуды сигнала, регистрируемого датчиком акустических колебаний – 7, и поднимают до возобновления их циркуляции (рис. 7, в), сопровождающегося увеличением амплитуды сигнала, что свидетельствует о достижении оптимального расстояния между снарядом и забоем скважины. При этом процесс управления механизмом подачи может осуществляться оператором или автоматическим регулятором, оптимальный режим устанавливался непосредственно в процессе бурения по амплитудной характеристике.

Выводы

1. Анализ основных способов и конструкций для поддержания расстояния от снаряда до забоя показал, что на данный момент технология непрерывного поддержания оптимального РСЗ при шароструйном бурении отсутствует. В связи с этим были исследованы призабойные процессы шароструйного бурения, а также рассмо-

трена колонна бурильных труб в качестве акустического канала, в котором при ударах по долоту отскочивших от забоя шаров распространяются упругие колебания.

2. Разработана технологическая схема для повышения эффективности шароструйного бурения, включающая в себя датчик акустических колебаний и осциллографическую приставку.
3. Был впервые предложен способ поддержания расстояния от снаряда до забоя при шароструйном бурении, позволяющий непрерывно определять необходимое расстояние для текущих условий.
4. Представлены результаты эксперимента предложенным способом, доказывающие эффективность его использования с целью непрерывного определения расстояния от снаряда до забоя. В ходе экспериментальных исследований получены зависимости влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность шароструйного бурения, которые могут быть использованы при конструировании буровых снарядов и определения оптимальных режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 367 с.
2. Experimental study on the rock-breaking mechanism of disc-like hybrid bit / Shiwei Niua, Hualin Zhenga, Yingxin Yanga, Lian Chena // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517309671> (дата обращения 10.12.2017).
3. A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking / Risheng Long, Shaoni Sun, Zisheng Lian, Yaoyao Liao, Xiaofeng Qin // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861500172X> (дата обращения 10.12.2017).
4. Herrera M.P., Gómez-Martín M.E., Medina J.R. Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions // Coastal Engineering. – 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383916302629> (дата обращения 10.12.17)
5. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография. – Д.: НГУ, 2013. – 110 с.
6. Уваков А. Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
7. Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозионный способы разрушения горных пород при бурении скважин. – М.: ВИЭМС, 1987. – 45 с.
8. Ковалев А.В. Теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов шароструйного бурения скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 143 с.
9. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. ... канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
10. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
11. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – 1956. – V. 207. – P. 15–21.
12. Ledgerwood W. Jr. Efforts to Develop Improved Oilwell Drilling Methods // Journal of Petroleum Technology. – 1960. – V. 12. – P. 62–74.
13. Расчет технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков, В.М. Горбенко, М.В. Горбенко, Л.А. Саруев // Георесурсы, научно-технический журнал. – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 102–106.
14. Monitoring of Acoustic Emission during the Disintegration of Rock / R. Tripathi, M. Srivastava, S. Hloch, P. Adamčík, S. Chattopadhyaya, A. Kumar Das // Procedia Engineering. – 2016 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312127> (дата обращения 10.12.2017).
15. Hydraulic standoff control for pellet impact drilling: пат. США № 2724574; заявл. 29.01.1952; опубл. 22.11.1955.
16. А. с. № 870705, Е 21 С 37/16, Е 21 С 21/00, Е 21 В 7/18. Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления № 2798122/22–03; заявл. 18.07.1979; опубл. 07.10.1981.
17. А. с. № 417599, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин № 1451266/22–3; заявл. 15.06.1970; опубл. 28.02.1974.
18. А. с. № 1002498, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд № 3278854/22–03; заявл. 24.04.1981; опубл. 07.03.1983.
19. Pellet impact drilling apparatus: пат. США № 2868509; заявл. 07.06.1956; опубл. 13.01.1959.
20. Pellet impact drilling operational parameters: experimental research / A.V. Kovalyov, S.Ya. Ryabchikov, Ye.D. Isaev, F.R. Aliev, M.V. Gorbenko, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – P. 102–106.
21. Способ шароструйного бурения скважин: заявка на изобретение № 2016146972/03 РФ от 29.11.2016; МПК (2016.01) E21B7/18.

Поступила 15.01.2018 г.

Информация об авторах

Урниш В.В., аспирант кафедры теоретической и прикладной механики Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев А.Л., кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC [621.835+621.888].001.5:622.243

OPTIMIZATION OF PELLET IMPACT DRILLING REGIMES BY REGULATION OF SPACING BETWEEN A DRILL BIT AND A HOLE BOTTOM

Viktor V. Urnish¹,
madvic93@mail.ru

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

Alexey L. Saruev¹,
saruev@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research. One of the main technological parameters of the pellet impact drilling is the spacing between a drill bit and a holebottom. There are several methods and constructions of drill bits that allow keeping this distance with bit feet. In this case, the jet apparatus is held at a certain distance from the blades, which destroy the border zone or central part of the rock by a rotary method. However, no method makes it possible to determine the optimal distance precisely. Since it is quite difficult to calculate the necessary distance for different rocks considering their mechanical characteristics it is very important to identify and keep the optimum spacing between the drill bit and the hole bottom continuously when drilling.

The main aim was to analyze the main methods and constructions of keeping the spacing between the drill bit and the hole bottom, also to formulate the requirements. Considering the requirements, to propose a method for keeping the spacing which allows us to determine continuously the necessary distance for current conditions.

Object of researches is a bottomhole drilling.

Methods: compilation and analysis of the sources; research of technological processes of pellet impact drilling; investigation of the influence of the spacing between the drill bit and the hole bottom on the rock breaking efficiency; representation of a string of drill pipes as an acoustic communication channel in which elastic vibrations spread during impacts of the bounced balls; development of a technological scheme for increasing pellet impact drilling efficiency; experimental studies using an acoustic oscillation sensor and an oscilloscope; analysis of the waveform.

Results. The authors have studied the spacing between the drill bit and the hole bottom which affects the efficiency of pellet impact drilling and analyzed the basic methods and constructions. Based on the analysis the requirements were stated. Taking into account the developed requirements the authors proposed the method for keeping the optimal spacing. The paper introduces the experimental results with the proposed method. The results prove the effectiveness of using the method for determining continuously spacing between the drill bit and the hole bottom. The results obtained can be used to select and maintain optimal operating parameters.

Key words:

Rock breaking, rock-breaking tool, pellet impact drilling, pellet impact apparatus, spacing between the drill bit and the hole bottom, acoustic oscillation sensor.

REFERENCES

- Sulakshin S.S., Chubik P.S. *Razrushenie gornyykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Rock breaking during geological exploration]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 367 p.
- Shiwei Niua, Hualin Zhenga, Yingxin Yanga, Lian Chena. Experimental study on the rock-breaking mechanism of disc-like hybrid bit. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517309671> (accessed 10 December 2017).
- Risheng Long, Shaoni Sun, Zisheng Lian, Yaoyao Liao, Xiaofeng Qin. A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861500172X> (accessed 10 December 2017).
- Herrera M.P., Gómez-Martín M.E., Medina J.R. Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions. *Coastal Engineering*. 2017. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383916302629> (accessed 10 December 2017).
- Davidenko A.N., Ignatov A.A. *Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burenie skvazhin: monografiya* [Abrasive mechanical percussive drilling: a monograph]. D., NGU Publ., 2013. 110 p.
- Uvakov A. B. *Sharostruynoe burenie* [Pellet impact drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 207 p.
- Kozhevnikov A.A., Davidenko A.N. *Gidromekhanicheskiy i eroziorny sposoby razrusheniya gornyykh porod pri burenii skvazhin* [Hydromechanical and erosive methods of rock breaking when drilling]. Moscow, VIEMS Publ., 1987. 45 p.
- Kovalev A.V. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya tekhnologicheskikh protsessov sharostruynogo burenii skvazhin*. Dis. kand. nauk [Theoretical and experimental studies of pellet impact drilling technological processes. Cand. Diss]. Tomsk, 2015. 143 p.
- Shtrasser V.V. *Issledovanie protsessov razrusheniya gornyykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo burenii)*. Dis. kand. nauk. [Study of the balls impacts rock-breaking (to the theory of pellet impact drilling). Cand. Diss]. Alma-Ata, 1966. 217 p.
- Zaurbekov S.A. *Povysheniye effektivnosti prizaboynykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin*. Avtoreferat Dis. kand. nauk. [Increasing the efficiency of bottomhole hydrodynamic processes during pellet impact drilling. Cand. Diss. Abstract]. Almaty, 1995. 18 p.
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*, 1956, vol. 207, pp. 15–21.

12. Ledgerwood L.W. Efforts to Develop Improved Oilwell Drilling Methods. *Journal of Petroleum Technology*, 1960, vol. 12, pp. 62–74.
13. Kovalev A.V., Ryabchikov S.Ya., Gorbenko V.M., Gorbenko M.V., Saruev L.A. Calculation of Ball Jet Drilling Processes in the Optimal Mode of Rock Destruction. *Georesources*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 102–106. In Rus.
14. Rupam Tripathi, Madhulika Srivastava, Sergej Hloch, Pavel Adamčík, Somnath Chattopadhyaya, Alok Kumar Das. Monitoring of Acoustic Emission During the Disintegration of Rock. *Procedia Engineering*. 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312127> (accessed 10 December 2017).
15. Ledgerwood L.W. *Hydraulic standoff control for pellet impact drilling*. Patent US2724574A, 1955.
16. Derbenev L.S., Bogolyubov A.A., Kapustin A.A., Karkashadze G.G., Yanchenko G.A. *Sposob erozionnogo bureniya skvazhin i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of erosion well drilling and device for its realization]. Patent RF, no. 2798122/22–03, 1981.
17. Uvakov A.B., Shtrasser V.V. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact bit for drilling wells]. Patent RF no. 1451266, 1974.
18. Maylibayev M.M. *Sharostruyny snaryad* [Pellet impact drilling bit]. Patent RF no. 3278854, 1983.
19. Williams P.S. *Pellet impact drilling apparatus*. Patent US2868509, 1959.
20. Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Baranova A.V. Pellet impact drilling operational parameters: experimental research. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, pp. 102–106.
21. Kovalev A.V., Urnish V.V., Saruev L.A., Gorbenko M.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Vagapov A.R., Epikhin A.V. *Sposob sharostruynogo bureniya skvazhin* [Method of pellet impact well drilling]. Patent RF no. 2640445, 2018.

Received: 15 January 2018.

Information about the authors

Viktor V. Urnish, post-graduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey L. Saruev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.