

**А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков, В.М. Горбенко,
Е.Д. Исаев, Ф.Р. Алиев**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ НА ДИАМЕТР СКВАЖИНЫ

Рассмотрен шароструйный способ бурения скважин, который в перспективе может повысить механическую скорость и проходку на долото при бурении скважин различного назначения в твердых и крепких горных породах. Он заключается в разрушении горных пород ударами высокоскоростных шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины за счет струйного аппарата, положенного в основу конструкции шароструйно-эжекторного долота. Цель работы: определить степень влияния различных технологических параметров на разработку скважины по диаметру; разработать рекомендации по обеспечению требуемого диаметра скважины; выявить основные параметры режима шароструйного бурения, посредством изменения которых можно корректировать диаметр скважины. Методы исследований: экспериментальные исследования процессов шароструйно-эжекторных бурения проводились на специально разработанном масштабированном лабораторном стенде. Результаты: установлено, что на разработку скважины по диаметру наибольшее влияние оказывают расстояние между долотом и забоем, периодичность расхаживания бурового снаряда и угол раскрытия диффузора; представлены результаты экспериментальных исследований влияния данных параметров на эффективность шароструйного бурения. Полученные результаты использованы для разработки методики инженерного расчета геометрических параметров шароструйно-эжекторных буровых снарядов, а также для формирования рекомендаций к корректировке диаметра скважины в процессе бурения.

Ключевые слова: разрушение горных пород, породоразрушающий инструмент, шароструйное бурение, шароструйно-эжекторный буровой снаряд, струйный аппарат, твердые и крепкие горные породы.

Введение

В настоящее время на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета проводятся теоретические и экспериментальные исследования шароструйного способа бурения, который может дать значительный прирост скорости бурения в твердых и крепких горных породах, увеличить проходку на долото. Кроме того, шароструйный способ бурения легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами с промывкой и не потребует значительного переоборудования буровой установки.

Шароструйный способ бурения основан на разрушении горных пород посредством воздействия металлических шаров, обладающих большой кинетической энергией непосредственно перед контактом с породой и многократно циркулирующих в призабойной зоне скважины за счет струйного аппарата.

Способ разрушения горных пород ударами шаров был предложен в 1955 г. группой ученых американской нефтяной компании «Картер Ойл» [1]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было сделано заключение о

возможности производить разрушение горных пород с высокой скоростью, что может успешно использоваться для бурения скважин различного назначения. В дальнейшем С.А. Заурбековым [2] и А.Б. Уваковым [3] было доказано, что бурение данным способом характеризуется большими значениями механической скорости и проходки на долото по сравнению с традиционными породоразрушающими инструментами.

Вопросы скважинообразования при шароструйном способе бурения нашли отражение в работах [2, 3]. Установлено, что забой скважины при шароструйном бурении состоит из цилиндрической и криволинейной частей (рис. 1).

Криволинейный забой скважины имеет форму, близкую к сферической. Дело в том, что шары, соударяющиеся с поверхностью забоя по нормали, действуют на него со скоростью $V_{ш}$. При соударении с забоем в крайних точках шары воздействуют с меньшей скоростью, равной $V_{ш1} = V_{ш} \cdot \cos \alpha_{\max}$. С.А. Заурбековым [2] было установлено, что в центральной части забоя скважины наблюдается максимальная частота ударов шаров и их скорость в момент соударения с забоем, что объясняет образование криволинейной части забоя скважины.

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что одной из проблем шароструйного бурения является сложность формирования периферийной части забоя скважины. Анализ литературных источников позволил выявить основные способы решения данной проблемы:

- разрушение периферийной части забоя ударами шаров, вылетающих из струйного аппарата, расположенного параллельно оси скважины [4] и под некоторым углом [5];
- разрушение периферийной части забоя механическим вооружением

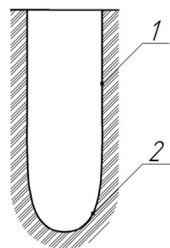


Рис. 1. Забой скважины при шароструйном бурении: 1 – цилиндрическая часть; 2 – криволинейная часть

лопастного [6] или дробового [7] типов.

Нами было доказано [8], что наиболее эффективной для разрушения твердых и крепких горных пород является конструкция шароструйно-эжекторного бурового снаряда с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением. При этом камера смешения должна заканчиваться диффузором, а для направления шаров из затрубного пространства непосредственно в камеру смешения в конструкцию снаряда должно включаться задерживающее устройство.

Для выбранной конструкции бурового снаряда необходимо:

- определить степень влияния геометрических и технологических параметров на разработку скважины по диаметру;
- разработать рекомендации по обеспечению требуемого диаметра скважины;
- выявить основные параметры режима шароструйного бурения, посредством изменения которых можно корректировать диаметр скважины.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован и изготовлен стенд [9] в масштабированном варианте (рис. 2). Особенностью стенда является наличие

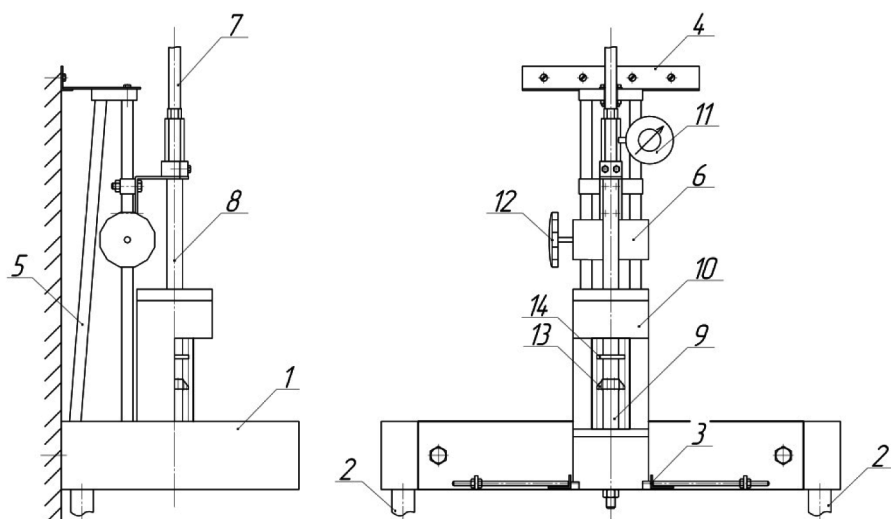


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда: 1 – поддон; 2 – сливная магистраль; 3 – зажим стакана; 4 – кронштейн; 5 – стойка; 6 – механизм подачи долота; 7 – напорная магистраль; 8 – переводник; 9 – шароструйно-эжекторный буровой снаряд; 10 – стакан; 11 – манометр; 12 – маховик для управления механизмом подачи; 13 – задерживающее устройство; 14 – центратор

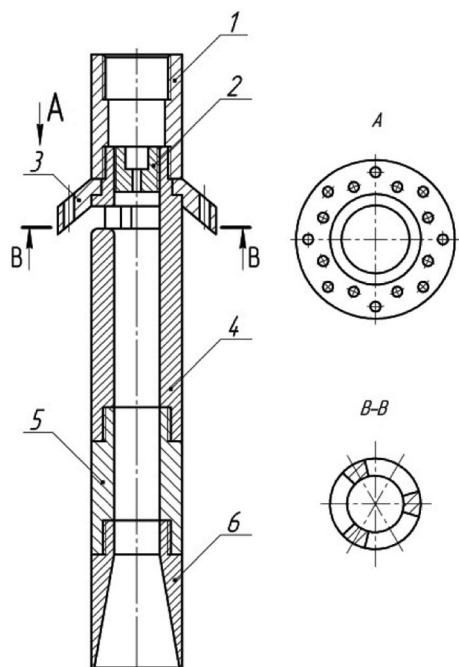


Рис. 3. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд: 1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – камера всасывания; 5 – камера смешения; 6 – диффузор

стакана 10 для размещения образца разрушаемого материала и визуального наблюдения за процессом всасывания и перемещения рабочих шаров, а также механизма подачи 6 для задания требуемого расстояния между долотом и забоем.

Конструкция шароструйно-эжекторного долота, в котором предусмотрена возможность смены его основных частей, представлена на рис. 3.

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике:

1. Забурка скважины. Бурение проводилось на образцах модельного материала, в качестве которого использовалась керамическая плитка. При этом бурение в течение определенного времени производилось без опускания бурового снаряда. Далее замерялись геометрические параметры скважины.

2. Бурение с расхождением бурового снаряда. Бурение проводилось на образцах мрамора. После проходки определенного интервала буровой снаряд кратковременно опускался на

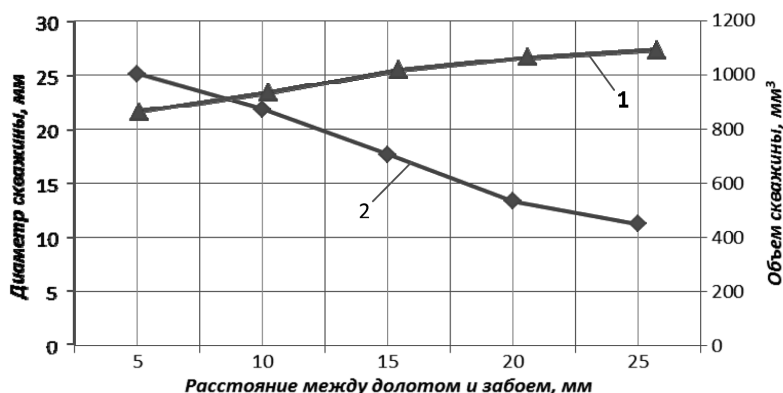


Рис. 4. Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

забой скважины и поднимался до запланированного расстояния между долотом и забоем. Далее замерялись геометрические параметры скважины.

Эффективность шароструйного бурения определяется геометрическими параметрами бурового снаряда и технологическими параметрами режима. Результаты экспериментальных исследований показали, что параметрами, оказывающими наибольшее влияние на разработку скважины по диаметру, являются расстояние между долотом и забоем, периодичность расхаживания бурового снаряда и угол раскрытия диффузора.

Исследование влияния расстояния от долота до забоя на эффективность шароструйного бурения

Данное исследование проводилось при забурке скважины в керамической плитке.

Результаты исследования представлены на рис. 4. Установлено, что при увеличении расстояния между долотом и забоем возрастает диаметр скважины, снижается глубина и уменьшается ее объем.

Характер изменения диаметра скважины при этом можно отразить формулой:

$$R_{\text{скв}} = R_{\text{кс}} + R_{\text{дз}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\text{рд}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{скв}}$ – радиус скважины, мм; $R_{\text{кс}}$ – радиус камеры смешения, мм; $R_{\text{дз}}$ – расстояние между долотом и забоем, мм; $\alpha_{\text{рд}}$ – угол раскрытия диффузора.

Исследование влияния периодичности расхаживания бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения

Исследование влияния периодичности расхаживания бурового снаряда на эффективность разрушения горных пород проведено при бурении скважин в мраморе. По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин и сканировалась их форма (рис. 5). Установлено, что при увеличении периодичности расхаживания $t_{\text{рас}}$ при относительно постоянном объеме скважины увеличивается диаметр скважины и уменьшается глубина скважины. Кроме того, можно отметить значительные неровности стенок скважины при больших значениях времени между расхаживаниями.

Исследование влияния угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения

Исследования влияния угла раскрытия диффузора на эффективность разрушения мрамора проводились при

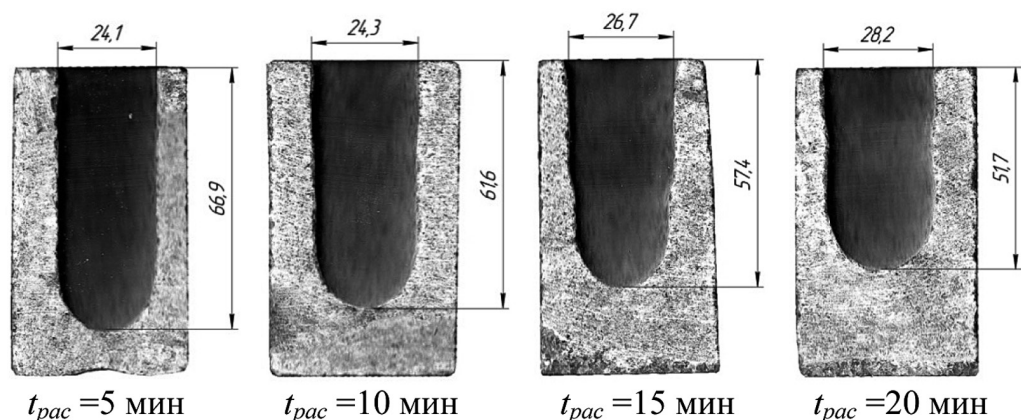


Рис. 5. Геометрические параметры скважин при варьировании периодичности расхаживания

бурении скважин с расхаживанием снаряда. Геометрические параметры скважины представлены в таблице.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при угле раскрытия диффузора 10° диаметр, глубина и объем скважины имеют максимальные значения. Диаметр скважины в ряду углов раскрытия 10° – 20° – 30° – 0° уменьшается, что связано с усложнением условий нанесения ударов шаров по периферийной части забоя скважины. Кроме того, сопоставление реальных геометрических размеров долота, шаров и расстояния между долотом и забоем скважины, а также наблюдения за траекторией шаров показало, что разрушение периферийной части забоя скважины обуславливается количеством рикошетов отскочивших от

породы шаров с поступающими на забой шарами. Это еще раз подтверждает необходимость бурения с минимальным расстоянием между долотом и забоем.

Основные выводы

Для разработки скважины до требуемого диаметра при минимальном расстоянии между долотом и забоем необходимо проектировать шароструйно-эжекторные буровые снаряды со следующими соотношениями геометрических параметров:

- отношение диаметра камеры смешения к диаметру породоразрушающих шаров должно составлять не менее 2,2. Данное соотношение определяет характер движения шаров в камере смешения. Наличие соударе-

Влияние угла раскрытия диффузора на эффективность шароструйного бурения

Угол раскрытия диффузора, град	Объем скважины, мм ³	Диаметр скважины, мм	Длина цилиндрической части скважины, мм	Глубина скважины до точки соприкосновения долота с забоем, мм	Общая глубина скважины, мм
10	28 600	25,3	50,4	59,7	62,5
20	21 370	24,9	38,4	48,2	52
30	21 516	24	40,9	49,8	53,6
0	21 010	23,7	41,2	50	54,1

ний о стенки камеры смещения (зигзагообразная траектория движения) приводит к большому числу ударов шаров по периферийной части скважины;

- зазор между стенками скважины и буровым снарядом должен быть минимальным и составлять $1,1 \div 1,2$ от диаметра шаров. При увеличении значения данного зазора на разрушение периферийной части забоя скважины будет затрачиваться больше времени, что снизит скорость бурения. Кроме того, увеличение зазора приведет к усложнению контроля за разработкой скважины до требуемого диаметра;

- толщина стенки диффузора в выходном сечении должна быть минимальна, а угол раскрытия диффузора должен составлять не более 10° . Это обеспечит более интенсивное разрушение периферийной части забоя скважины.

Бурение скважин необходимо проводить при расхаживании бурового

снаряда. При этом корректировать диаметр скважины можно за счет изменения следующих технологических параметров режима бурения:

- расстояния между долотом и забоем. При увеличении этого расстояния возрастает диаметр скважины. Т.е. при заданных геометрических параметрах бурового снаряда следует поддерживать минимальное расстояние между долотом и забоем;

- расхода бурового раствора, увеличение которого будет приводить к повышению скорости и расхода шаров в камере смещения, следовательно, интенсивному разрушению периферийной части забоя скважины;

- периодичности расхаживания бурового снаряда, при увеличении которого возрастает диаметр скважины. Поэтому бурение необходимо проводить при минимальном времени расхаживания, достаточном для разработки скважины до требуемого диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – Dallas, 1956. – Vol. 207. – p. 15.

2. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.

3. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.

4. Зубкова Т.Н. Патент № 2114274, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин. № 96123178/03; Заявлено 05.12.1996; Опубл. 27.06.1998.

5. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.

6. Уваков А.Б., Штрассер В.В. Патент № 417599, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин. № 1451266; Заявлено 15.06.1970; Опубл. 28.02.1974.

7. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – 110 с.

8. Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev Ye.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Strelnikova A.B. Designing the ejector pellet impact drill bit for hard and tough rock drilling [Электронный ресурс] / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 24. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/24/1/012016>.

9. Ковалев А.В., Рябчиков С.Я. и др. Патент № 143090, Е 21 В 7/18. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения. № 2014106459/03; Заявлено 20.02.2014; Опубл. 10.07.2014. **ПАТ**

Ковалев Артем Владимирович – ассистент кафедры, e-mail: arteka011287@mail.ru,
Рябчиков Сергей Яковлевич – доктор технических наук, e-mail: kafedrabs@mail.ru,
Горбенко Вячеслав Михайлович – студент, e-mail: gorbenkovm92@mail.ru,
Исаев Евгений Дмитриевич – студент, e-mail: pelletdrilling@gmail.com,
Алиев Фарух Рамизович – студент, e-mail: faruhaliev@mail.ru,
ИПР НИ ТПУ.

UDC 622.243.95

EXPERIMENTAL STUDIES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS INFLUENCE ON WELL DIAMETER DURING PELLET IMPACT DRILLING

Kovalyov A.V.¹, Assistant of Chair, e-mail: arteka011287@mail.ru,
Ryabchikov S.Ya.¹, Doctor of Technical Science, e-mail: kafedrabs@mail.ru,
V.M. Gorbenko¹, Student, e-mail: gorbenkovm92@mail.ru,
Isaev E.D.¹, Student, e-mail: pelletdrilling@gmail.com,
Aliev F.R.¹, Student, e-mail: faruhaliev@mail.ru,

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

This article is devoted to the study of pellet impact drilling method that could enhance rate of penetration and bit footage significantly while well construction in hard and tough rocks. Rock destruction while using this method of drilling is caused by hits of hardmetal pellets continuously circulating in wellbottom zone due to jet device, that underlies the structure of pellet impact drill bit.

The main aim of the study: to determine effect of various technological parameters on the well diameter; develop recommendations to provide the required well diameter; identify main parameters of drilling technique varying which we can adjust well diameter.

Research methods: experimental studies were carried out on specially designed laboratory bench.

The results: In the framework of this research, it was found that well diameter depends significantly on the distance between bit and well bottom, the frequency of drilling assembly reciprocation and diffuser opening angle. This article presents experimental studies results of technological parameters influence on drilling efficiency. These results could be used to develop methodology of pellet impact bits geometrical parameters calculation and recommendations for well diameter adjusting.

Key words: rock failure, rock destruction tool, pellet impact drilling, pellet impact apparatus, jet apparatus, hard and tough rocks.

REFERENCES

1. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*. Dallas, 1956. Vol. 207. p. 15.
2. Zaurbekov S.A. *Povyshenie effektivnosti prizaboinnykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruinom burnii skvazhin* (Improving the efficiency of hydrodynamic bottomhole processes in the pellet impact drilling), Candidate's thesis, Almaty, 1995, 18 p.
3. Uvakov A.B. *Sharostruinoe burnie* (Pellet impact drilling), Moscow, Nedra, 1969, 207 p.
4. Zubkova T.N. *Patent RU 2114274, E 21 B 7/18, 27.06.1998.*
5. Shtrasser V.V. *Issledovanie protsessov razrusheniya gornyykh porod udarami sharov (k teorii sharostruinogo burniya)* (Investigation of the processes of rock destruction hit balls (the theory pellet impact drilling)), Candidate's thesis, Alma-Ata, 1966, 217 p.
6. Uvakov A.B., Shtrasser V.V. *Patent RU 417599, E 21 B 7/18, 28.02.1974.*
7. Davidenko A.N., Ignatov A.A. *Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burnie skvazhin: monografiya* (Abrasive-mechanical percussion drilling, monograph), Dnepropetrovsk, NGU, 2013, 110 p.
8. Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev Ye.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Strelnikova A.B. Designing the ejector pellet impact drill bit for hard and tough rock drilling. *IOP Conferense Series: Earth and Environmental Science*. 2015. Vol. 24, available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/24/1/012016>.
9. Kovalev A.V., Ryabchikov S.Ya. *Patent RU 143090, E 21 B 7/18, 10.07.2014.*

