

Литература

1. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография / М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2013. – 110 с.
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. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Усков Ю.Б. Оценка потенциальных возможностей прогрессивных методов бурения // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1985. – 28 с.
4. Ковалев А.В., Якушев Д.А. Анализ технических средств для шароструйного бурения с целью выбора перспективных направлений для проведения опытно-конструкторских работ // Проблемы геологии и освоения недр: труды Восемнадцатого международного симпозиума им. М. А. Усова. – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – Т. 2. – С. 412–414.
5. Патент № 417599, Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / А.Б. Уваков, В.В. Штрассер – № 1451266; Заявлено 15.06.1970; Оpubл. 28.02.1974.
6. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
7. 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.
8. 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.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ****Е.Д.Исаев, А.В. Ковалев, Ф.Р. Алиев**

Руководитель профессор Рябчиков С.Я.

***Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, Россия***

В настоящее время на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета активно ведутся работы по разработке и исследованию шароструйного способа бурения. Данный способ, потенциально, может дать значительный прирост скорости бурения в интервалах твердых и крепких горных пород, сократить время на проведение спуско-подъемных операций, что приведет к снижению денежных затрат на сооружение скважины. 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. Исследования в данном направлении велись еще с середины XX века. Однако шароструйный способ бурения не был в должной мере изучен и все еще находится на стадии разработки.

На эффективность разрушения горных пород при шароструйном бурении оказывает влияние ряд технологических параметров режима бурения (рис. 1).

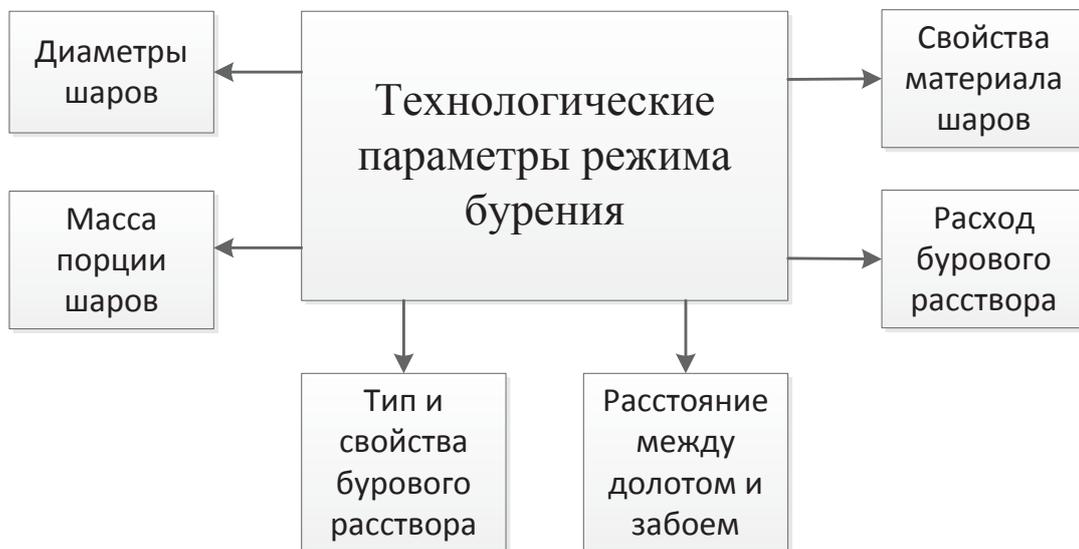


Рис.1 Классификация технологических параметров режима бурения, определяющих эффективность шароструйного бурения

Результаты исследований различных технологических параметров шароструйного бурения, представленные в работах [1, 4–6], а также интерпретация полученных ими результатов выглядят достаточно противоречивыми и неубедительными. На момент проведения

исследований отсутствовали технические средства, позволяющие более детально изучить динамику движения шаров во время процесса бурения. Вследствие этого, выводы и рекомендации, представленные исследователями, базировались, главным образом, на их умозаключениях, и могут нести в себе ошибочную информацию. В связи с этим необходимо проверить правильность ранее полученных результатов и разработать рекомендации для выбора рациональных режимных параметров бурения, исходя из информации, полученной с помощью визуализации быстротекающего процесса движения шаров.

Для проведения исследований технологических процессов шароструйного бурения был сконструирован и изготовлен стенд в масштабированном варианте [3], общий вид которого представлен на рис. 2. На поддон 1 устанавливается стакан 10, фиксируемый специальным зажимом 3. Стакан предназначен для размещения образца разрушаемого материала и визуального наблюдения за процессом всасывания и перемещения частиц. На поддон крепится стойка 5, в верхней части закрепляемая кронштейном 4. С целью задания необходимого расстояния от долота до образца разрушаемого материала и обеспечения возможности плавного спуска инструмента в модель скважины по мере ее углубления на стойке установлен механизм подачи долота 6 на основе фрикционной реечной передачи с маховиком 12. Жидкость подводится через напорную магистраль 7 и переводник 8 к буровому снаряду 9, производит полезную работу и с продуктами разрушения истекает из стакана в поддон и далее направляется в сливную магистраль 2. Для измерения давления в напорной магистрали перед долотом установлен манометр 11. Для принудительной подачи шаров в технологические окна в конструкцию шароструйно-

эжекторного бурового снаряда включено задерживающее устройство 13 конусной формы, которое вместе с центратором 14 центрирует долото в стакане 10.

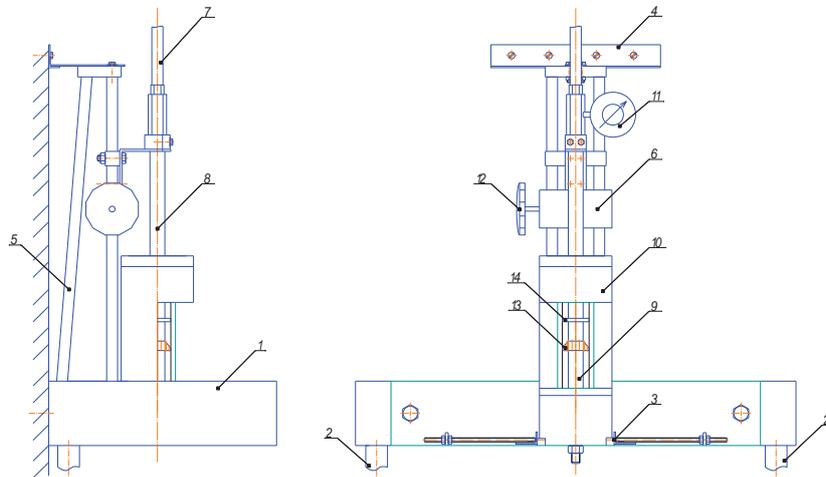


Рис.1 Общий вид лабораторного стенда:

- 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

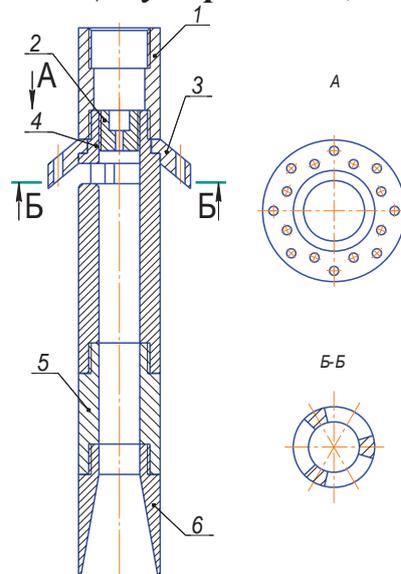


Рис.3 Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:

- 1 – переходник на нагнетательную магистраль; 2 – сопло;
 3 – задерживающее устройство; 4 – камера всасывания;
 5 – камера смешения; 6 – диффузор

Конструкция шароструйно-эжекторного долота представлена на рис. 3.

Экспериментальные исследования проводились по следующим методикам:

1. Забурка скважины. Бурение проводилось на образцах керамической плитки. При этом в течение запланированного времени производилось бурение без опускания бурового снаряда. Далее измерялись геометрические параметры скважины (рис. 4).

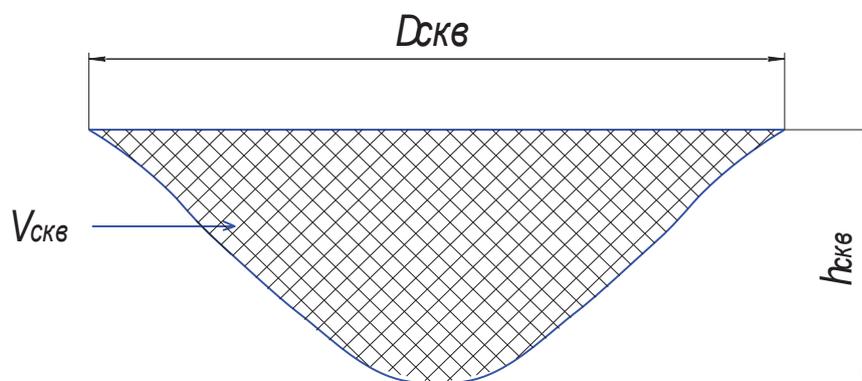


Рис.4 Измеряемые геометрические параметры скважины при забурке

2. Высокоскоростная съемка со скоростью записи 3600 кадров в секунду для визуализации быстропротекающих процессов шароструйного бурения. При этом производилась забурка скважины буровым снарядом, изготовленным из прозрачного материала. Далее при помощи специальных компьютерных программ анализировалось записанное видеоизображение.

3. Бурение с расхаживанием бурового снаряда (рис. 5). Бурение проводилось на образцах мрамора. 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 $t_{рас}$. После проведения эксперимента измерялись

диаметр скважины $D_{скв}$, глубина скважины h , глубина цилиндрической части $h_{цч}$ и глубина в точке соприкосновения долота с забоем h_{δ} (рис. 6).

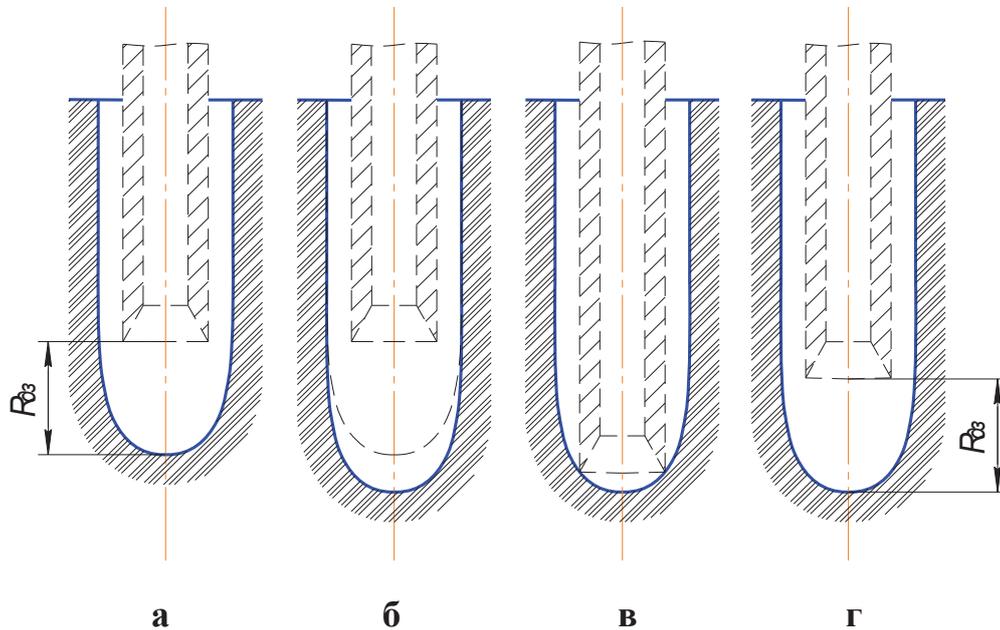


Рис.5 Схема поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем путем расхаживания бурового снаряда

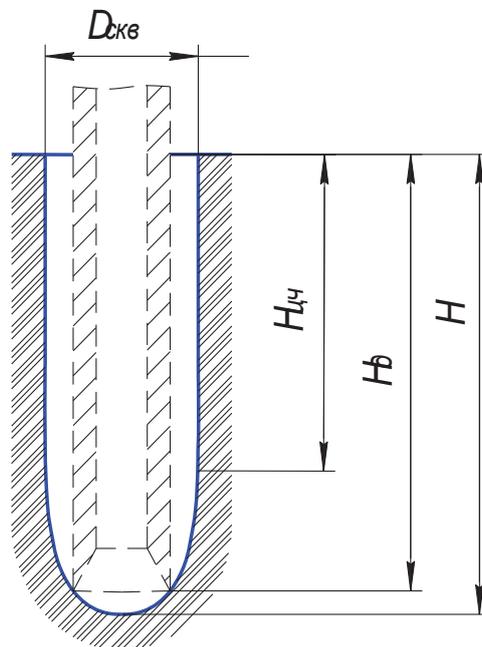


Рис.6 Геометрические параметры скважины при бурении с расхаживанием бурового снаряда

Минимальное количество повторных экспериментов принималось равным трем. Далее рассчитывались среднее арифметическое,

дисперсия, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации измеряемого параметра [2]. Коэффициент вариации не превышал 10%, что говорит о хорошей воспроизводимости полученных результатов.

При прочих равных условиях было проведено исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения при забурке скважин.

Установлено, что при увеличении расстояния между долотом и забоем увеличивается диаметр скважины и уменьшается ее объем (рис. 7). При этом скорость бурения снижается.

Характер увеличения 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.

Как известно [4], объем скважины $V_{\text{скв}}$ вычисляется по формуле:

$$V_{\text{скв}} = V_{\text{ш}} \cdot Q_{\text{ш}} \cdot t \cdot \rho, \quad (2)$$

где $V_{\text{ш}}$ – объем воронки разрушения при ударе одного шара; $Q_{\text{ш}}$ – расход шаров в камере смешения, шт/с; t – время бурения; ρ – коэффициент, учитывающий снижение скорости разрушения в реальных условиях.

Благодаря применению высокоскоростной съемки удалось определить величину $Q_{\text{ш}}$ при варьировании расстояния между долотом и забоем в ряду 5–10–15 мм (табл. 1). Как видно, при увеличении расстояния между долотом и забоем расход шаров в камере смешения снижается. При увеличении расстояния с 5 мм до 10 мм, значение $Q_{\text{ш}}$ снижается на 10,3%, при увеличении расстояния с 5 до 15 мм – на 29,9%. В связи с уменьшением расхода шаров согласно формуле (2) должен

уменьшаться объем скважины, что подтверждается результатами, представленными на рис. 7.

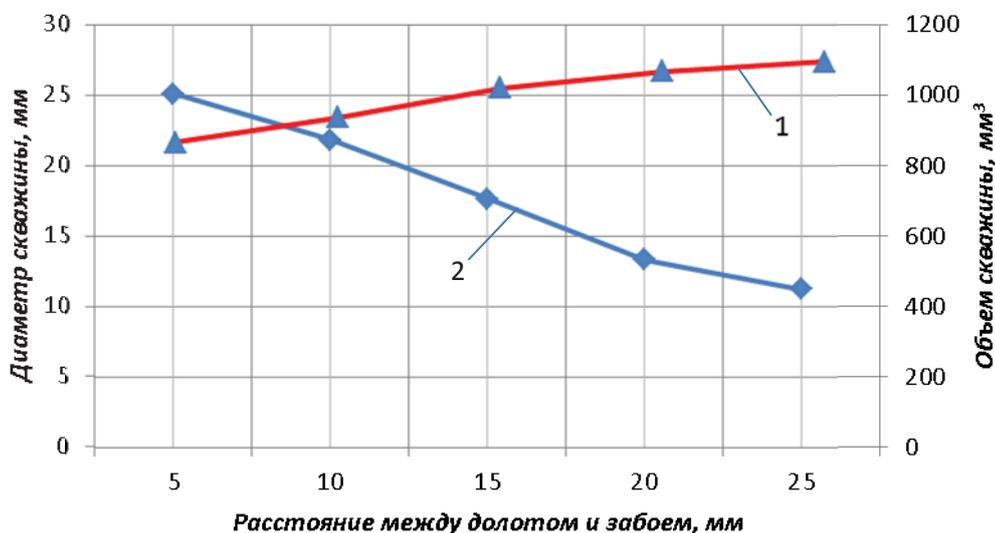


Рис. 7 Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от расстояния между долотом и забоем

Таблица 1

Расход шаров в камере смешения при разных значениях расстояния между долотом и забоем

Расстояние между долотом и забоем, мм	5	10	15
Расход шаров в камере смешения, ш/с	583	529	497

Наблюдения за процессом движения шаров показали, что в области под буровым снарядом наблюдаются скопления шаров, которые не могут быстро покинуть эту область. Причем при увеличении расстояния между долотом и забоем скоплений больше (рис. 8), что в свою очередь приводит к уменьшению расхода шаров в камере смешения. Взаимодействие нисходящего и отраженного потоков при малом расстоянии ведет к тому, что шары, отскочившие от горной породы, быстрее направляются в затрубное пространство, а при

большом расстоянии – падающие шары бомбардируют шары, отскочившие от горной породы, что ведет к их скоплениям под долотом.

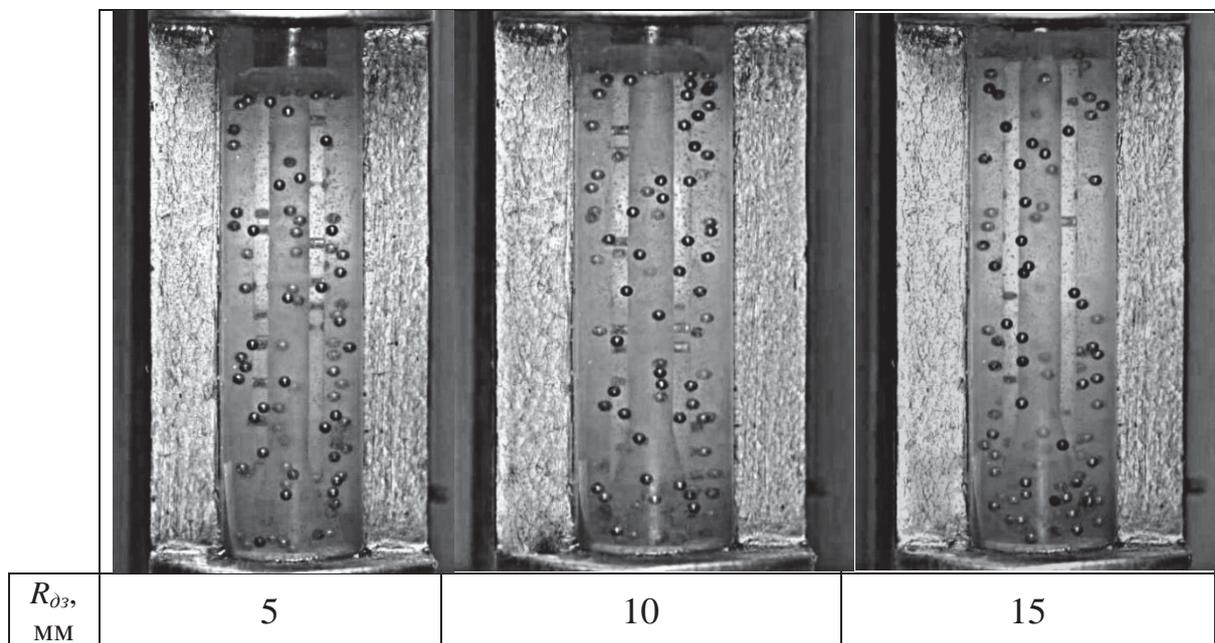


Рис.8 Кадры, иллюстрирующие концентрацию шаров в затрубном пространстве при варьировании расстояния между долотом и забоем

Было проведено исследование влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения мрамора при бурении с расхаживанием бурового снаряда. Расстояние между долотом и забоем составляло 5, 10, 15 мм.

По окончании бурения замерялись геометрические параметры скважин (табл. 2) и сканировалась их форма (рис. 9). По полученным результатам можно сделать вывод, что при увеличении расстояния между долотом и забоем увеличивается диаметр скважины, уменьшаются ее объем и глубина. Т.е. подтверждаются зависимости, полученные при забурке скважин с образованием криволинейного забоя, представленные выше.

Таблица 2
Геометрические параметры скважин при варьировании расстояния между долотом и забоем

Расстояние между долотом и забоем $R_{дз}$, мм	Геометрические параметры скважины				
	Объем скважины $V_{скв}$, мм ³	Диаметр скважины $D_{скв}$, мм	Глубина цилиндрической части скважины $h_{цч}$, мм	Глубина в точке соприкосновения долота с забоем $h_{д}$, мм	Полная глубина скважины h , мм
5	31800	25,5	52	65,2	69,9
10	29800	26,5	44	57	61
15	27000	27	36	52,1	56,7

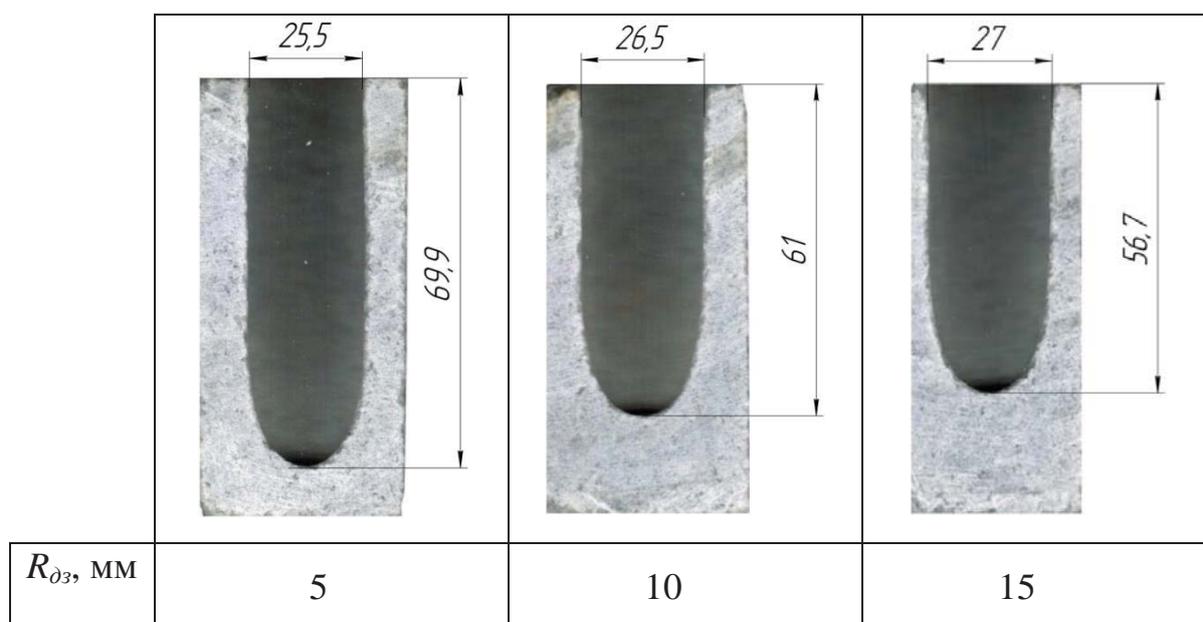


Рис.9 Скважины, пробуренные при варьировании расстояния между долотом и забоем

Экспериментальные исследования влияния массы порции шаров на эффективность шароструйного бурения проводились при забурке скважины в керамической плитке.

Установлено, что при увеличении массы порции шаров диаметр скважины слабо зависит от массы порции шаров (рис. 10). При увеличении массы порции шаров объем скважины вначале

увеличивается, а потом уменьшается, что говорит о наличии оптимального значения массы порции шаров для конкретных условий бурения. Вследствие меньшего количества ударов шаров в начале эксперимента наблюдается меньший объем скважины. При увеличении массы порции шаров до оптимального значения наблюдается увеличение объема скважины до определенного предела. Дальнейшее повышение массы порции шаров приводит к снижению объема скважины, а при достижении критической массы порции шаров бурение вовсе прекращается в связи с заклиниванием шаров в затрубном пространстве под задерживающим устройством.

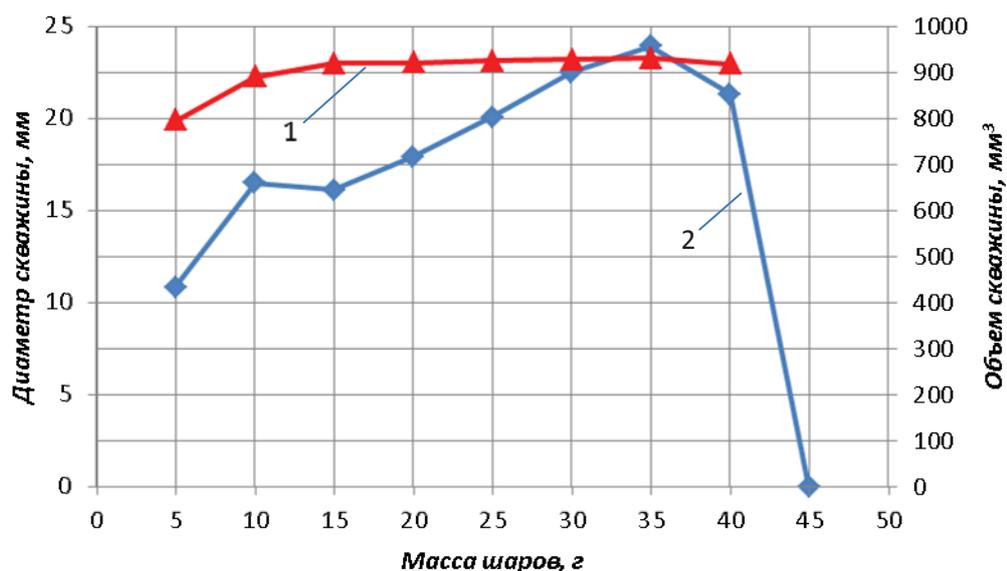


Рис.10 Зависимость диаметра (1) и объема (2) скважины от массы порции шаров

Была проведена видеорегистрация процесса бурения при варьировании массы порции шаров в ряду 5–15–25 г. Обработка видео позволила определить количество шаров, проходящих через камеру смешения в единицу времени (табл. 3). По полученным данным видно, что с увеличением массы порции шаров их расход в камере смешения увеличивается, что приводит к повышению эффективности бурения.

Таблица 3

Расход шаров в камере смешения при разных значениях массы порции шаров

Масса порции шаров, г	5	15	25
Расход шаров, шт/с	176	525	824

Также найдена причина уменьшения эффективности разрушения при большой массе порции шаров. Дело в том, что при увеличении общего количества шаров в призабойной зоне наблюдаются скопления шаров под буровым снарядом. В результате шары, движущиеся в сторону забоя, не долетая до него, сталкиваются с шарами, отскочившими от забоя скважины. Кроме того, при большом значении порции шаров наблюдаются их скопления в затрубном пространстве напротив технологических окон, что приводит к уменьшению их расхода в камере смешения в связи с неравномерным их поступлением.

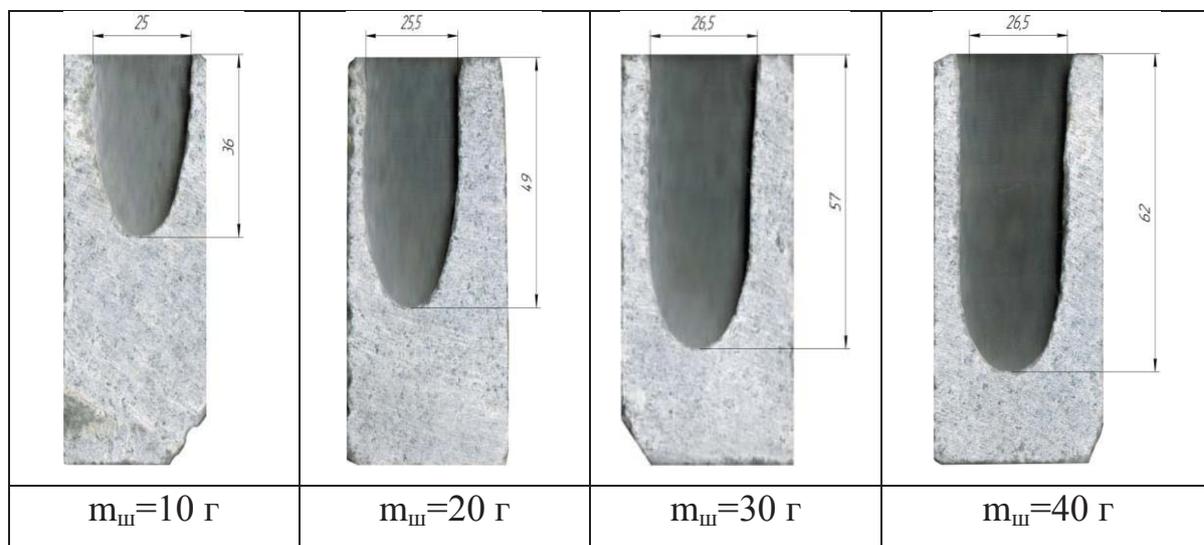


Рис.11 Форма скважин при варьировании массы порции шаров

Исследование влияния массы порции шаров на эффективность разрушения также проводились при бурении скважин в образцах мрамора с расхаживанием снаряда. Результаты исследований подтвердили полученные при забурке скважины зависимости (рис. 11).

Экспериментальные исследования влияния диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения проводились при забурке скважины с образованием криволинейного забоя. В связи с тем, что при использовании шаров различных диаметров оптимальная масса порции шаров будет иметь разные значения, исследования проводились при варьировании массы порции шаров.

На рис. 12 представлен график зависимости объема скважины от массы порции шаров диаметрами 2; 3 и 3,5 мм. При бурении шарами диаметром 2,5 мм наблюдались значительные их скопления в затрубном пространстве под задерживающим устройством, в связи с чем было принято решение о нецелесообразности их дальнейшего использования. Установлено, что в ряду диаметров используемых шаров 2–3–3,5 мм значение оптимальной массы порции шаров имеет одинаковое значение: 30 г. Диаметр скважины и ее объем при оптимальной массе шаров в ряду диаметров 2–3–3,5 мм имеют почти одинаковую величину. Также следует отметить, что в пределах измерений заклинивание шаров диаметром 2 мм не было выявлено.

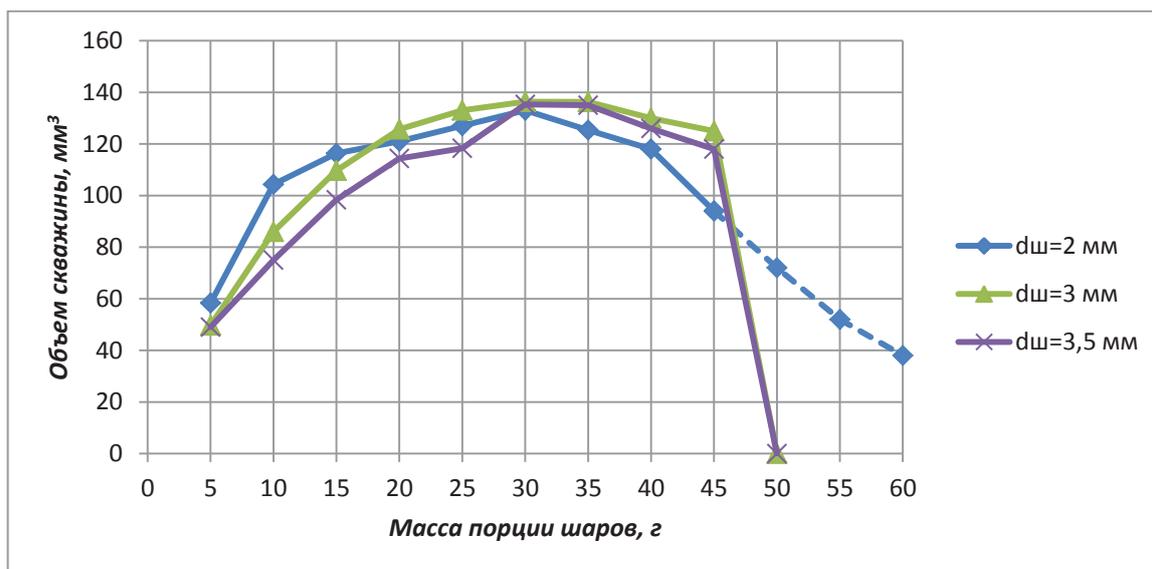


Рис.12 Зависимость объема скважины от массы порции шаров

Результаты исследований влияния диаметра шаров на эффективность разрушения мрамора при бурении скважин с расхаживанием бурового снаряда приведены в табл. 4. Установлено, что при увеличении диаметра шаров увеличивается диаметр скважины, ее глубина и объем.

Таблица 4
Влияние диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения

Диаметр шаров $D_{ш}$, мм	Объем скважины $V_{скв}$, мм ³	Диаметр скважины $D_{скв}$, мм	Глубина цилиндрической части скважины $h_{цч}$, мм	Глубина в точке соприкосновения долота с забоем $h_{д}$, мм	Полная глубина скважины h , мм
2	19000	23	31,2	45	49,9
3	26600	23,9	41,6	55	58,7
3,5	29800	25,8	45,8	58,7	63,3

Таблица 5
Расход шаров и средняя скорость движения шаров различного диаметра на разных участках камеры смешения

Диаметр шара $d_{ш}$, мм	Масса одного шара, г	Расход шаров $Q_{ш}$, шт/с	Общее количество шаров, участвующих в разрушении N , шт	Участок движения в камере смешения	Средняя скорость движения шара V_y , м/с	Средняя кинетическая энергия одного шара $E_{кин}$ при вылете из камеры смешения, мДж
2	0,033	1461	304	начальный	7,42	2,682
				конечный	9,03	
				конечный	8,03	
3	0,111	529	90	начальный	7,08	7,023
				конечный	7,95	
3,5	0,175	252	57	начальный	6,62	9,816
				конечный	7,48	

Для интерпретации полученных результатов была проведена высокоскоростная съемка. Обработка полученных видеофрагментов позволила определить расход и скорости шаров в камере смешения при бурении шарами различных диаметров (табл. 5).

Анализ данных, представленных в табл. 5, показал, что увеличение объема скважины с ростом диаметра шаров достигается за счет большей в момент соударения с забоем кинетической энергии шаров, что приводит к увеличению объема горной породы, разрушенной при ударе одним шаром.

Выводы

В ходе экспериментальных исследований были получены зависимости влияния расстояния между долотом и забоем, массы порции и диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения, которые могут быть использованы при конструировании буровых снарядов и определения оптимальных режимных параметров. Полученные зависимости обоснованы благодаря использованию высокоскоростной съемки.

К числу дальнейших исследований следует отнести:

- разработка методики инженерного расчета оптимальной массы порции шаров;
- исследование причин, а также способов предупреждения и ликвидации заклинивания шаров в затрубном пространстве под задерживающим устройством;
- исследование степени влияния различных параметров на диаметр скважины;
- теоретические и экспериментальные исследования влияния типа и свойств бурового раствора, расхода промывочной жидкости, а также свойства материала шаров.

Литература

1. 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.
2. Квеско Н.Г. Методы и средства исследований: учебное пособие / Н.Г. Квеско, П.С. Чубик; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.
3. Патент № 143090, Е 21 В 7/18. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков и др. – № 2014106459/03; Заявлено 20.02.2014; Оpubл. 10.07.2014.
4. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
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. 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

**БЕЗУДАРНАЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ФОРМИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

И.В Кузнецов

Научный руководитель профессор Л.А Саруев
*Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, Россия*

В настоящее время для бурения скважин, многоцелевое производство и современная промышленность предлагает большой выбор технических средств и технологий, в которых требуется разбираться, чтобы принять правильное решение. Велика потребность в бурении скважин малого диаметра (40...70 мм). Область их применения включает геологоразведочные и технические скважины различного назначения.

При проходке таких скважин в породах средней твердости и выше часто применяют машины вращательно – ударного действия. Прогрессивным направлением в развитии машин и механизмов вращательно – ударного действия является создание силовых