

Рис. 6. Зависимость объема скважины от времени бурения

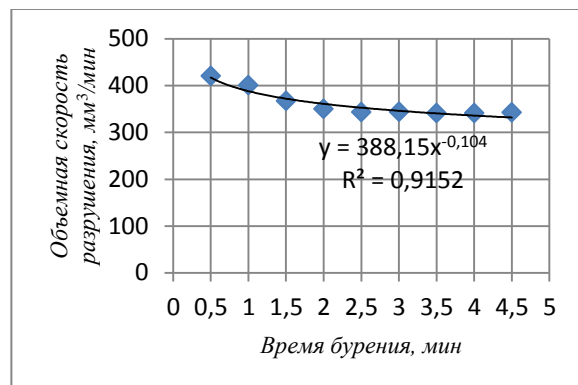


Рис. 7. Зависимость объемной скорости разрушения от времени бурения

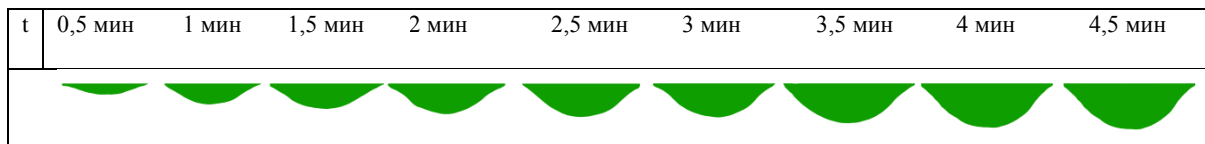


Рис. 8. Изменение формы криволинейной части забоя при увеличении времени бурения

Полученные результаты исследований будут использованы в дальнейшем при разработке оптимальных конструкций шароструйного снаряда и рациональных режимных параметров.

Литература

1. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
2. Квеско Н.Г., Чубик П.С. Методы и средства исследования. – Томск: издательство Томского политехнического университета, 2007. – 124 с.
3. Ковалев А.В., Алиев Ф.Р., Горбенко В.М., Якушев Д.А. Лабораторный стенд для исследования процессов абразивного разрушения горных пород // Проблемы геологии и освоения недр: труды Семнадцатого международного симпозиума им. М. А. Усова. – Томск: Изд. ТПУ, 2013. – С. 263–266.
4. Столяров Р.В., Ковалёв А.В. Установка для абразивного бурения с применением долота гидромониторно-эжекционного типа // Проблемы геологии и освоения недр: труды Четырнадцатого международного симпозиума им. М.А. Усова. – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – С. 520–521.
5. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

Е.Д. Исаев

Научные руководители: профессор С.Я. Рябчиков, ассистент А.В. Ковалев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

На кафедре бурения скважин Томского политехнического университета ведутся исследования процессов шароструйного бурения. Предложенный в середине прошлого столетия шароструйный способ бурения скважин является весьма перспективным для бурения в интервалах твердых и крепких горных пород. В силу слабого развития электронного оборудования на тот момент наши предшественники не уделили должного внимания основному процессу – процессу циркуляции шаров, который является быстротекущим. Отсюда целью данных исследований является ликвидация этого «пробела» посредством применения высокоскоростного видеорегистратора.

Для видеорегистрации процессов циркуляции шаров был модернизирован стакан для размещения образца горной породы (рис. 1). В средний цилиндр 1 стакана устанавливается образец горной породы 2, который поджимается помощью нижнего цилиндра 3. Для наблюдения процесса циркуляции шаров в среднем цилиндре стакана имеется смотровое окно, а во внутреннюю часть устанавливается прозрачная труба 4, поджимаемая верхним цилиндром 5 стакана. В верхнем цилиндре выполнен отвод жидкости, а также имеется посадочное место для манжеты 6, которая удерживается нажимной гайкой 7. Для наблюдения за циркуляцией шаров под буровым снарядом образец горной породы 2 обработан таким образом, что его верхняя часть входит во внутреннюю часть прозрачной трубы 5. Также были изготовлены буровой снаряд и задерживающее устройство из оргстекла.

После включения насоса и завершения переходных процессов при подсветке прожекторами 1 мощностью 1000 Вт производится кратковременная запись (1–2 с) с помощью высокоскоростной видеокамеры 2 (рис. 2). Записанное на высокоскоростную камеру видеоизображение при помощи специальных компьютерных программ передается на обработку компьютером 3.

Для высокоскоростной съемки использовалась видеокамера модели MiGo m310. Видеокамера способна производить видеосъемку со скоростью до 3600 кадров в секунду при разрешении 1024x720 точек на дюйм и оснащена устройством хранения данных объемом 64. С помощью компьютерной программы «MeasureDynamics» проводились замеры координаты шаров в двух осях декартовой системы.

Высокоскоростная съемка позволила исследовать следующие процессы: движение шаров в камере смешения, процесс соударения шаров с забоем модели скважины, движение шаров между торцом диффузора и забоем скважины, движение шаров и шлама при подъеме в затрубном пространстве, процесс взаимодействия шаров с задерживающим устройством и последующего всасывания шаров в камеру смешения, а также процесс выноса шлама из призабойной зоны.

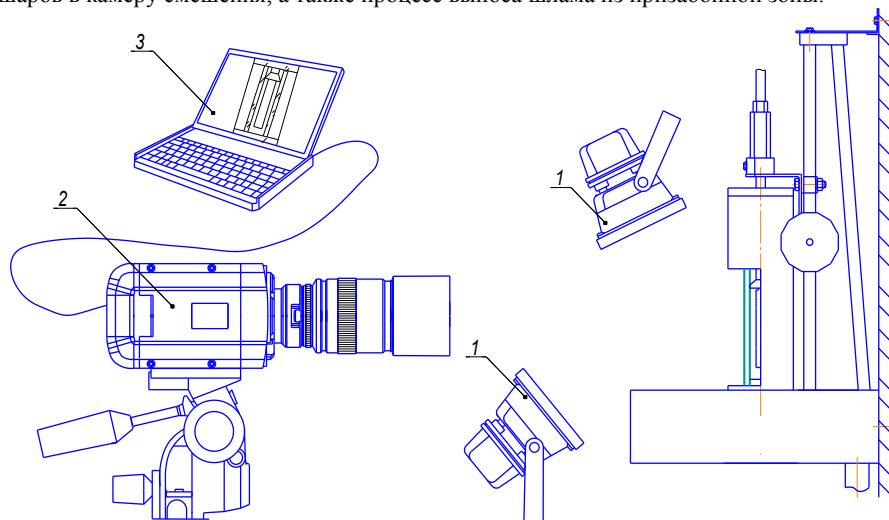


Рис. 1. Стакан для размещения образца горной породы:

- 1 – средний цилиндр стакана;
2 – образец горной породы; 3 – нижний цилиндр стакана; 4 – прозрачная труба; 5 – верхний цилиндр стакана;
6 – манжета; 7 – нажимная гайка

Рис. 2. Расстановка техники для проведения видеосъемки:

- 1 – осветительные прожекторы; 2 – высокоскоростная камера; 3 – персональный компьютер

Исследование движения шаров от входа в камеру смешения до соударения с забоем скважины

С помощью высокоскоростной съемки была исследована траектория движения шаров от входа в камеру смешения до соударения с забоем скважины (рис. 3, 4). Было выявлено, что большинство шаров, поступающих в камеру смешения, движутся не параллельно ее оси, тем самым соударяясь с ее стенками. Отклонения же траектории шаров при прохождении через диффузор не обнаружено. Таким образом, основная функция диффузора – обеспечение пространства для движения шаров на периферийную часть забоя скважины.

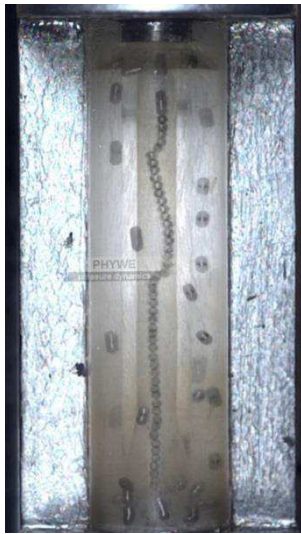


Рис. 3. Стереоизображение, иллюстрирующее траекторию движения шара в камере смешения

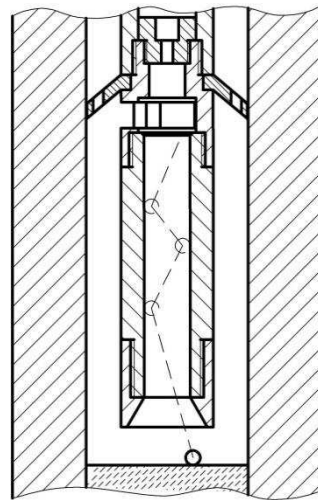


Рис. 4. Траектория движения шара на промежутке от входа в камеру смешения до соударения с забоем

Исследование движения шлама

С помощью видеорегистрации процессов шароструйного бурения удалось проследить за движением частиц разрушенной породы. При ударе шаров о забой скважины образуется шлам, который перемещаясь в затрубное пространство, движется вверх с восходящим потоком жидкости. В области под задерживающим устройством происходит перераспределение шлама: меньшая часть через отверстия в задерживающем устройстве поднимается выше него, большая же часть эжектируется вместе с шарами в камеру смешения. В результате частицы шлама взаимодействуют с забоем скважины, приводит к переизмельчению шлама. Снизить эжектирование шлама возможно путем совершенствования конструкции задерживающего устройства.

Выявление причин заклинивания шаров

Под заклиниванием шаров подразумевается скопление шаров перед впускными окнами, приводящее к прекращению их циркуляции, следовательно, остановке бурения. Заклинка происходит в начальный момент бурения при большом количестве шаров, реже – в процессе бурения. Стоит отметить, что причина заклинка связана с применением задерживающего устройства, не применяемого в иных конструкциях буровых снарядов. На рис. 5. представлены кадры, характеризующие этапы, предшествующие заклиниванию шаров.

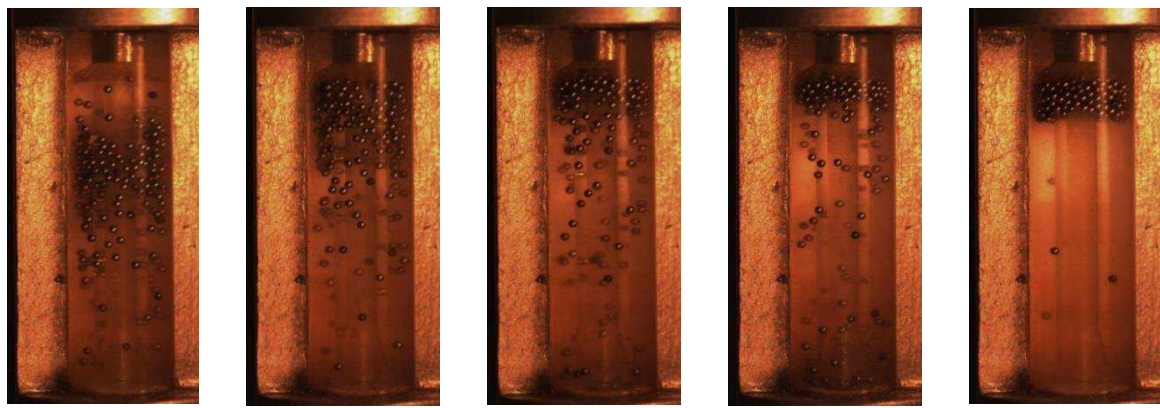


Рис. 5. Кадры, характеризующие этапы, предшествующие заклиниванию шаров начале бурения

Ниже приводится описание этапов, предшествующих заклиниванию шаров:

1. В начальный момент времени шары поднимаются в затрубном пространстве за счет взаимодействия с восходящим потоком жидкости.
2. Шары поднимаются к задерживающему устройству, взаимодействуя с которым, направляются к впускным окнам.
3. Пришедшие первыми к задерживающему устройству шары подсасываются через впускные окна в камеру смешения.
4. Количество шаров, проходящих через впускные окна меньше количества шаров, подходящих к задерживающему устройству. В результате у впускных окон наблюдается скопление шаров.

5. В определенный момент времени перед задерживающим устройством скапливается критическое количество шаров, когда нижерасположенные шары оказывают давление на вышележащие слои с силой, направленной вертикально вверх. В результате этого процесса шары, находящиеся перед впускными окнами, располагаются таким образом, что не имеют возможности проходить через впускные окна. Происходит их заклинивание.

Вышеописанные наблюдения позволили сделать следующие выводы. 1. Заклинка происходит в результате переизбытка шаров в системе, когда их количество больше оптимального, соответствующего наибольшей эффективности бурения. Следовательно, при правильном расчете оптимального количества шаров она не является серьезной проблемой. 2. Заклинка безусловно связана с использованием задерживающего устройства, поэтому избежать ее возможно путем совершенствования его конструкции и расположения относительно впускных окон.

Исследование влияния расстояния от долота до забоя на эффективность шароструйного бурения

Как известно [1], объем скважины $V_{скв}$ вычисляется по формуле:

$$V_{скв} = V_{ш} \cdot N \cdot t \cdot \rho, \quad (1)$$

где $V_{ш}$ – объем воронки разрушения при ударе одного шара; N – количество соударений шаров с забоем за единицу времени; t – время бурения; ρ – коэффициент, учитывающий снижение скорости разрушения в реальных условиях.

Благодаря высокоскоростной съемке удалось определить величину N при варьировании расстояния между долотом и забоем в ряду 5–10–15 мм (табл. 1). Как видно из табл. 1, при увеличении расстояния между долотом и забоем количество шаров, вступающих во взаимодействие с горной породой за единицу времени, падает. При увеличении расстояния с 5 мм до 10 мм, значение N падает на 10,3%, при увеличении расстояния с 5 до 15 мм – на 29,9%. Опираясь на формулу 1, мы можем сделать вывод, что при уменьшении количества шаров, участвующих в разрушении при увеличении расстояния между долотом и забоем должно наблюдаться уменьшение объемной скорости образования скважины, что подтверждено экспериментально. 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, что в свою очередь приводит к уменьшению количества шаров, проходящих в камере смешения в единицу времени.

Таблица 1

Количество шаров, проходящих в камере смешения за единицу времени, при разных значениях расстояния между долотом и забоем

Расстояние между долотом и забоем, мм	5	10	15
Количество шаров, проходящих в камере смешения в единицу времени, шт	583	529	497

Исследование влияния массы порции шаров на эффективность шароструйного бурения

Была проведена видеорегистрация процесса бурения при варьировании массы порции шаров. Обработка видео позволила подсчитать количество шаров, проходящих через камеру смешения в единицу времени (табл. 1). По полученным данным видно, что с увеличением количества шаров в системе их количество, проходящее в единицу времени, увеличивается, что должно приводить к большей эффективности бурения. Данные наблюдения подтверждены экспериментально. 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, находящимися под снарядом. В результате этого скорость падающих шаров значительно снижается, что приводит к уменьшению объема скважины.

Таблица 2

Количество шаров, проходящих в камере смешения за единицу времени, при разных значениях расстояния между долотом и забоем

Масса порции шаров, г	5	15	25
Количество шаров, проходящих в камере смешения в единицу времени, шт	176	525	824

Исследование влияния диаметра используемых шаров на эффективность шароструйного бурения

При исследовании влияния диаметра используемых шаров на эффективность шароструйного бурения большую роль играет скорость шара в момент выхода из камеры смешения. Для ее фиксации использовалась программа «MeasureDynamics». Рассчитываются скорости движения 10 шаров, их значения осредняются. В табл. 3 представлены значения средних скоростей движения шаров различного диаметра на начальном и конечном участках камеры смешения.

По табл. 3 видно, что средняя скорость движения шаров от начального до конечного участка камеры смешения увеличивается. Следовательно, камеру смешения предпочтительно называть камерой разгона шаров. В связи с увеличением массы шара в ряду 2–2,5–3–3,5 мм наблюдается уменьшение скорости шара на конечном участке камеры смешения. В дальнейшем необходимо более детальное исследование влияния диаметра шаров на эффективность шароструйного бурения.

Таблица 3

Средняя скорость движения шаров различного диаметра на разных участках камеры смещения

Диаметр шара $d_{ш}$, мм	Масса шара $m_{ш}$, г	участок движения в камере смещения	Средняя скорость движения шара $V_{с}$, м/с
2	0,0329	начальный	7,42
		конечный	9,03
2,5	0,0642	начальный	7,16
		конечный	8,03
3	0,111	начальный	7,08
		конечный	7,95
3,5	0,176	начальный	6,62
		конечный	7,48

Основные выводы

Высокоскоростная съемка позволила исследовать процессы движения шаров и шлама при работе бурового снаряда. Была установлена причина заклинивания шаров предложены способы ее предупреждения. Исследована траектория движения шаров в камере смещения. Также полученная информация позволила скорректировать полученные ранее экспериментальные данные.

Литература

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ**

А.В. Ковалев, А.А. Яцкив, Е.Д.Исаев, А.А. Симон

Научный руководитель: профессор С.Я. Рябчиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Одним из наиболее перспективных гидродинамических способов разрушения горных пород является абразивный способ, реализуемый с помощью шароструйного бурения. Данный способ был предложен американскими исследователями И.Э. Эскемем, Ф.Г. Дэйли, Л.У. Леджервудом и др. [3]. Результаты лабораторных и полевых исследований данного способа бурения А.Б. Уваковым [2] показали возможность достижения высоких механических скоростей бурения (до 20 м/час в крепких горных породах), а результаты работы казахского ученого С.А. Заурбекова показали превышение механической скорости на 20% и проходки на долото на 43% по сравнению с серийными долотами при бурении пород средней твердости [1].

Эффективность шароструйного бурения определяется свойствами горных пород, геометрическими параметрами скважины, геометрическими параметрами бурового снаряда и технологическими режимами бурения (рис. 1).

Одним из важнейших технологических параметров при шароструйном бурении является расстояние между долотом и забоем. Результаты исследований по изучению влияния данного параметра на эффективность разрушения горных пород приведены в различной литературе [1–3]. Известно, что существует оптимальное значение расстояния, при котором эффективность бурения максимальна. Оно зависит от многих факторов и предшествующими исследователями определялось опытным путем. Американские исследователи [3] предлагают принимать его в пределах 2,8–3,4 от диаметра камеры смещения. В результате экспериментальных исследований Уваковым А.Б. [2] установлено, что оптимальное расстояние аппарата от забоя, при котором скорость бурения максимальна, находится в пределах 1,8–3,3 диаметра камеры смещения. Заурбековым С.А. [1] установлен оптимальный зазор от долота до забоя, равный 3,6–4,5 от диаметра камеры смещения. Большой разброс значений указывает на необходимость более детальных исследований.

Нами проведено несколько серий опытов по исследованию влияния расстояния между долотом и забоем на эффективность разрушения керамической плитки при образовании криволинейного забоя. При этом исходными параметрами являлись: диаметр шаров $D_{ш}=3$ мм; масса порции шаров $m_{ш}=25$ г; диаметр сопла $d_c=2$ мм; диаметр камеры смещения $d_{кc}=8$ мм; длина камеры смещения $l_{кc}=82$ мм; угол раскрытия диффузора $\alpha_{pd}=10^\circ$; время бурения $t=2$ мин; расход жидкости при истечении из сопла $Q_c=6,7$ л/мин; давление перед соплом $P_c=1$ МПа.

Установлено, что при увеличении расстояния между долотом и забоем увеличивается диаметр скважины (рис. 2) и уменьшается ее объем (рис. 3). Изменение формы забоя при увеличении расстояния между долотом и забоем представлено на рис. 4. Характер увеличения диаметра скважины при этом можно отразить формулой (1):

$$R_{скв} = R_{кc} + R_{дз} \cdot tg\alpha_{pd}, \quad (1)$$

$R_{скв}$ – радиус скважины, мм; $R_{кc}$ – радиус камеры смещения, мм; $R_{дз}$ – расстояние между долотом и забоем, мм; α_{pd} – угол раскрытия диффузора.