

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;  $\alpha_{pd}$  – угол раскрытия диффузора.

Снижение объема разрушения керамической плитки поясняется тем, что шары, разогнавшиеся в камере смешения, вылетая из диффузора, тормозятся в потоке жидкости, движущейся с меньшей скоростью. Причем тормозящее действие тем больше, чем больше путь движения шаров.



Рис. 1. Классификация факторов, определяющих эффективность шароструйного бурения

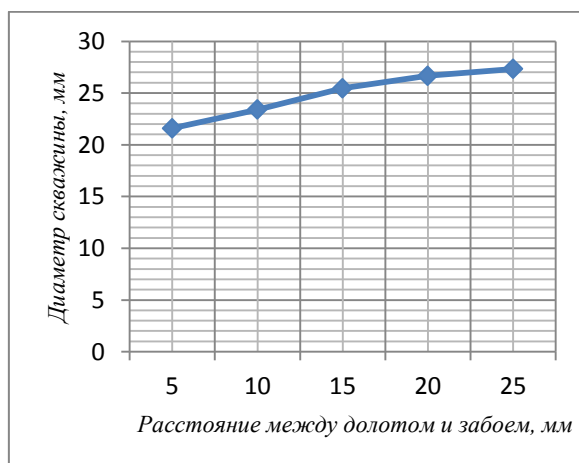


Рис. 2. Зависимость диаметра скважины от расстояния между долотом и забоем

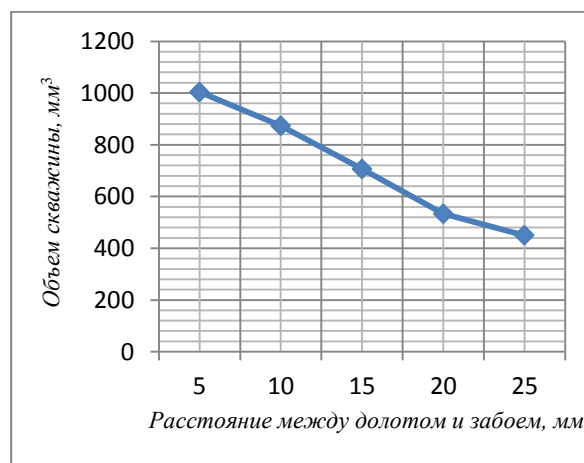


Рис. 3. Зависимость объема скважины от расстояния между долотом и забоем

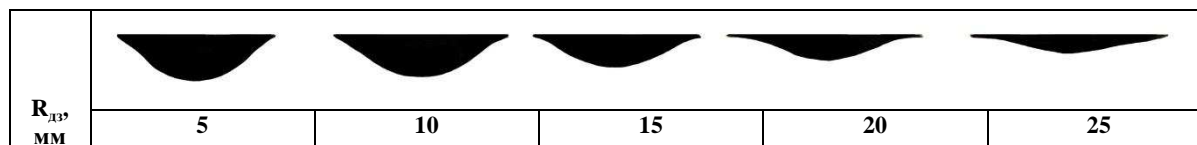


Рис. 4. Изменение формы криволинейной части забоя при увеличении расстояния между долотом и забоем

При шароструйном бурении существует оптимальное значение веса порции шаров, при котором скорость бурения максимальна [2]. Определить оптимальный вес порции шаров аналитическим путем очень сложно, поэтому для каждого конкретного случая необходимо устанавливать эту характеристику опытным путем.

Было проведено исследование влияния массы порции шаров на эффективность разрушения керамической плитки. Исходные параметры оставались такими же, как в предыдущих исследованиях, кроме расстояния между долотом и забоем, которое составляло 10 мм.

Установлено, что диаметр скважины слабо зависит от массы порции шаров. Независимо от длины камеры смешения 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 (рис. 5). Вследствие недостаточного количества ударов шаров в начале эксперимента наблюдается небольшой объем скважины. При увеличении массы порции шаров наблюдается увеличение объема скважины до определенного предела. Дальнейшее повышение массы порции шаров приводит к снижению объема

скважины и прекращению процесса проходки. При пояснении данной закономерности необходимо отметить о скоплениях шаров в затрубном пространстве, что приводит к уменьшению их скорости в момент всасывания, большому времени их подъема. Кроме того при высоком значении массы порции шаров бурение прекращается из-за их заклинивания в затрубном пространстве (рис. 6). Заклинивание происходит вследствие того, что поднимаемые восходящим потоком шары прижимаются к задерживающему устройству.

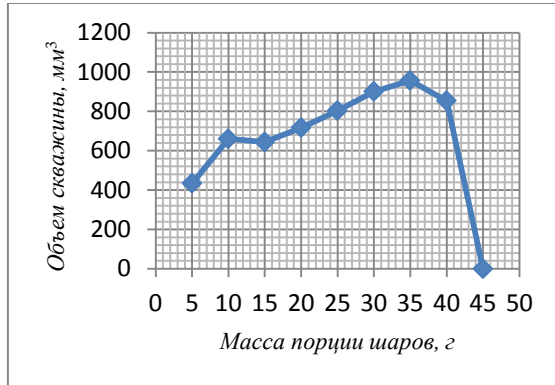


Рис. 5. Зависимость объема скважины от веса порции шаров



Рис. 6. Заклинивание шаров в затрубном пространстве

На рис. 5 можно выделить участки кривой, на которых при меньших значениях массы порции шаров наблюдается больший объем разрушения. Несмотря на малое количество шаров, участвующих в процессе разрушения, при малой порции шары будут быстрее уходить из пространства под аппаратом и подниматься в затрубном пространстве. При выходе из аппарата они будут обладать большей скоростью вследствие малого количества столкновений с другими шарами.

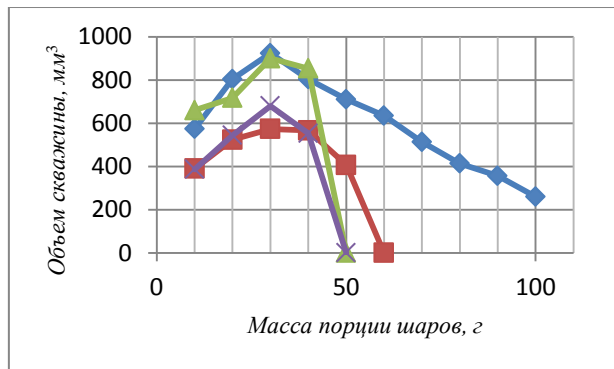


Рис. 7. Зависимость объема скважины от веса порции шаров

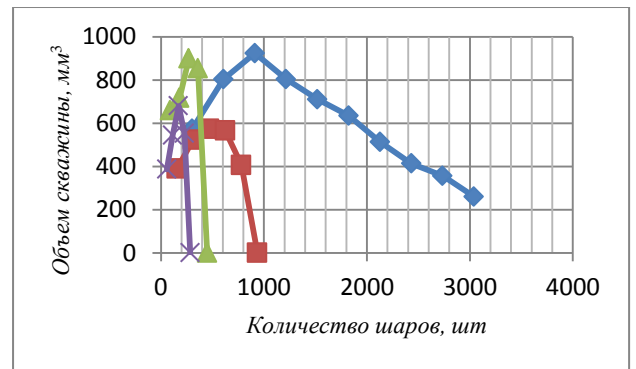


Рис. 8. Зависимость объема скважины от количества шаров

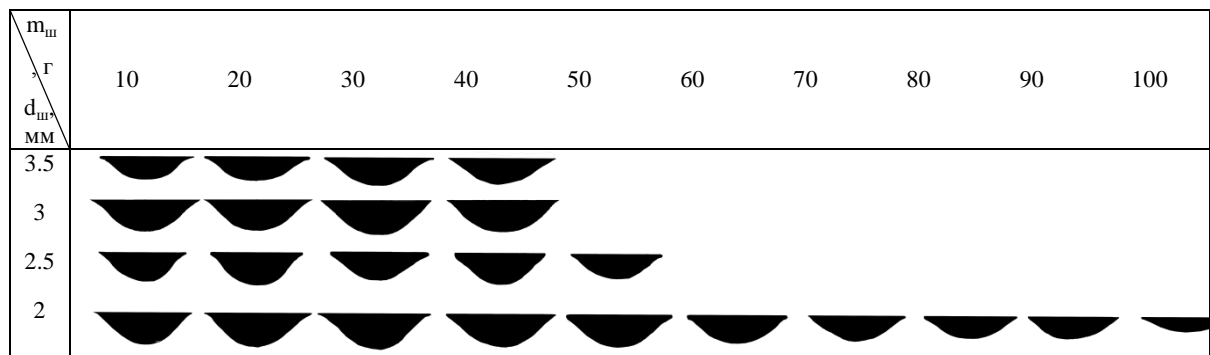


Рис. 9. Изменение формы забоя при варьировании массы порции шаров для разных значений диаметров шаров

На рис. 7–8 представлены графики зависимости объема скважины от веса порции шаров и количества шаров с диаметром 2; 2,5; 3 и 3,5 мм. Установлено, что в ряду диаметров используемых шаров 2–2,5–3–3,5 мм значение оптимального количества шаров уменьшается. При этом объем скважины, пробуренной шарами

диаметром 2 мм максимален (рис. 9), что объясняется большим количеством ударов шаров. Причем заклинивание шаров в затрубном пространстве при бурении шарами диаметром 2 мм не произошло, что говорит о работоспособности задерживающего устройства. Однако при бурении шарами 2 мм наблюдается меньшая разработка скважины по диаметру по сравнению с шарами диаметром 3 мм, что говорит о низком значении кинетической энергии шаров.

В дальнейшем необходимо:

1. Разработать рекомендации по определению оптимального расстояния от долота до забоя для конкретных геологотехнических условий.
2. Разработать инженерный способ расчета оптимальной массы порции шаров.
3. Найти причины заклинок при больших значениях массы порции шаров.
4. Определить максимально эффективный диаметр используемых шаров.
5. Разработать способ опускания снаряда на забой в процессе углубки скважины.

#### Литература

1. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 18 с.
2. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
3. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. – Vol. 207. – 1956. – p. 135.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШАРОСТРУЙНО-ЭЖЕКТОРНЫХ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ РАБОТЫ

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

Научный руководитель: профессор С.Я. Рябчиков

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

В настоящее время струйные аппараты применяются в различных отраслях, в том числе при бурении и опробовании скважин. В частности известны следующие устройства: струйные насосы для откачки жидкостей из скважины, эжекторные колонковые снаряды для увеличения выхода керна, наддолотные эжекторные насосы для лучшего выноса шлама из призабойной зоны, смесители для ввода в буровой раствор порошковых материалов, струйные гидроуловители для извлечения из скважин крупных кусков металла, гидроэлеваторы для подъема пульпы при гидродобыче.

Одной из областей применения струйного аппарата является его использование в конструкции шароструйных снарядов, которые непрерывно подсаживая породоразрушающие шары и направляя их на забой скважины, обеспечивают разрушение горных пород. Известно, что эффективность работы шароструйных снарядов будет определяться точностью расчетов геометрических параметров струйного аппарата. Литературный обзор выявил значительное количество различных методик расчета струйных аппаратов [1–8], обладающих различной точностью и используемых при решении конкретных задач.

Ниже приводятся основные геометрические параметры снаряда и пояснения к их выбору и расчету.

**Отношение площадей поперечного сечения камеры смешения и выходного сечения сопла (основной геометрический параметр струйного аппарата)**

Геометрический параметр является важнейшей характеристикой и является критерием подобия струйных аппаратов. По рекомендациям многих авторов значение геометрического параметра трактуется по-разному. В связи с этим возникает необходимость в исследовании влияния геометрического параметра струйного аппарата на эффективность разрушения.

*Выбирается диаметр камеры смешения, равный 8 мм. Выбор диаметра камеры смешения проводился посредством оценки возможностей имеющегося насосного оборудования.*

По экспериментальным данным Увакова А.Б. [7] для избежания заклинивания шаров в камере смешения ее диаметр должен определяться по формуле:

$$d_{\text{кс}} \geq 2,2 \cdot d_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шара.

*В соответствии с этим для лабораторных исследований возможно использование шаров диаметром не более 3,5 мм.*

**Форма выходного сечения рабочего сопла**

От выбора геометрической формы сопла зависит изменение перепадов давлений и расхода жидкости. Наиболее распространенными являются цилиндрические, конические и коноидальные насадки. Коноидальные насадки дают наибольшие выходные скорости и расходы, однако они трудоемки в изготовлении. Цилиндрические насадки, увеличивая расход жидкости, уменьшают скорости истечения, т.к. увеличиваются потери напора. Благодаря незначительному внутреннему сжатию потери напора в конической сходящейся насадке меньше, чем в цилиндрической, коэффициент скорости больше, а коэффициент сжатия меньше. По [2,7] наилучшие результаты дает сопло, выполненное в виде конической насадки, заканчивающейся коротким цилиндрическим срыском. Коническая насадка увеличивает выходную скорость, а цилиндрическая часть