

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

сохраняет форму струи и предотвращает ее от разбрызгивания. При этом установлено, что такая ступенчатая форма сопла увеличивает его рабочий ресурс.

*Для проведения лабораторных исследований спроектировано сопло цилиндрической формы переменного сечения в силу трудоемкости изготовления сопел другой формы.*

**Размеры рабочего сопла**

По экспериментальным данным [4,8] оптимальное значение угла конусности конической части насадки составляет 12–15°, согласно [7] оптимальный угол конусности составляет 13°24'.

Согласно [2] длина цилиндрической части сопла определяется по формуле:

$$l_{\text{соп}}^{\text{цил}} = (1 - 2) \cdot d_{\text{соп}}^{\text{цил}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{соп}}^{\text{цил}}$  – диаметр цилиндрической части сопла.

*Планируется проведение исследований струйных аппаратов с использованием сопел диаметром 1,5; 2; 2,5 и 3 мм. Длина сопла для всех выбранных диаметров составляет 4 мм.*

**Оптимальное расстояние между выходным сечением рабочего сопла и входным сечением камеры смешения**

Расчет производится из условия, что при расчетном коэффициенте эжекции конечное сечение свободной струи равно входному сечению камеры смешения.

Согласно [1] расстояние между выходным сечением рабочего сопла и входным сечением камеры смешения определяется по формуле:

$$l_{\text{кп}}^{\text{соп}} = (1 - 1,5) \cdot d_{\text{кп}}. \quad (3)$$

Согласно [3, 4,8] расстояние определяется нижеприведенным выражением:

$$l_{\text{кп}}^{\text{соп}} = (1 - 3) \cdot d_{\text{соп}}^{\text{цил}}. \quad (4)$$

*В соответствии с вышесказанным выбирается расстояние между выходным сечением рабочего сопла и входным сечением камеры смешения, равное 10 мм. Высота технологических окон для свободного прохождения используемых шаров принимается равной 4 мм.*

**Форма входного участка камеры смешения**

Влияние формы входного участка камеры смешения учитывается коэффициентом инжектируемого потока, представляющим собой произведение коэффициентов скорости камеры смешения, диффузора и входного участка. Изменение формы входного участка камеры смешения влияет на величину коэффициента скорости входного участка. При уменьшении коэффициента скорости уменьшается коэффициент инжектируемого потока, падает коэффициент инжекции или уменьшается степень сжатия аппарата.

Согласно данным, представленным в работе [3], наиболее рациональной является коноидальная форма, однако она сложна в изготовлении. Наиболее простой и в тоже время обладающей незначительным сопротивлением является коническая форма с углом конусности 45–60° [4–5].

*По конструктивным соображениям вход в камеру смешения снабжен фаской шириной 0,5 мм под углом 45°.*

**Относительная длина камеры смешения**

Этот параметр играет важную роль в рабочем процессе струйного аппарата. Для уменьшения потерь давления в диффузоре смешанный поток должен поступать из камеры смешения с выравненным профилем скоростей, что достигается при достаточно большом значении длины камеры смешения. В то же время излишняя длина приводит к увеличению потерь на трение в камере смешения. Таким образом, оптимальной является такая длина камеры смешения, при которой гидравлические потери минимальны.

Величина оптимальной длины камеры смешения разными авторами [3, 5–8] определяется по-разному, зависит от геометрического параметра струйного аппарата и требует более глубокого экспериментального изучения.

Наиболее распространенные рекомендуемые значения относительной длины камеры смешения находятся в пределах:

$$l_d^{\text{кп}} = (6 - 8) \cdot d_{\text{кп}} \quad (5)$$

*Для исследования влияния длины камеры смешения на эффективность разрушения горных пород изготовлены камеры смешения длинами 82, 52 и 22 мм.*

**Размеры диффузора**

Наиболее сложной задачей расчета является установление оптимальной формы диффузора, соответствующей безотрывному течению и минимуму потерь энергии при заданных режимных параметрах.

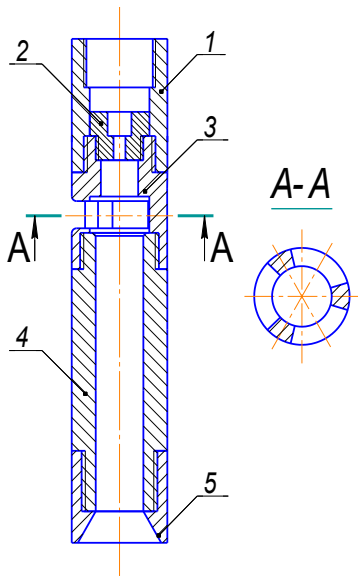
По экспериментальным данным, приведенным в большинстве работ [3,5,6,8], значение оптимального угла раскрытия диффузора составляет 8°. На основании экспериментальных исследований [7] установлено, что наилучшая скорость проходки при шароструйном бурении наблюдается при угле раствора диффузора, равным 30°. Авторы объясняют это тем, что с увеличением угла раствора уменьшается длина диффузора, что в свою очередь ведет к увеличению величины скорости шара, с которой он ударяется о забой скважины.

Высоту диффузора можно определить по формуле:

$$l_d = \left( \frac{d_{\text{сд}} - d_{\text{кп}}}{2} - r_1 \right) / \text{tg } \alpha, \quad (6)$$

где  $d_{\text{сд}}$  – наружный диаметр струйного аппарата,  $r_1$  – толщина стенки диффузора в выходном сечении,  $\alpha$  – угол раскрытия диффузора.

*Планируется использование диффузоров с углами раскрытия 10°, 20° и 30°.*

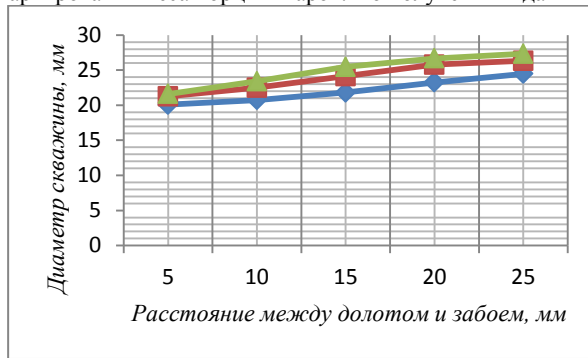


**Рис. 1. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд:**  
 1 – переходник на нагнетательную магистраль;  
 2 – сопло; 3 – камера всасывания; 4 – камера смешения; 5 – диффузор

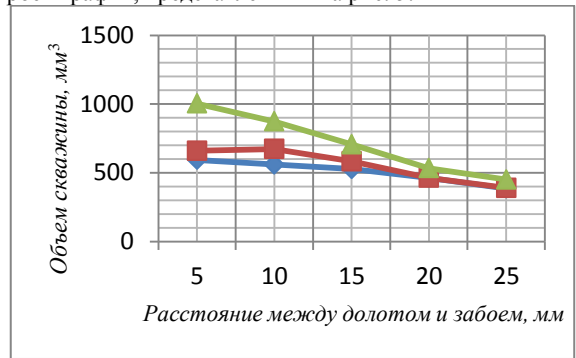
Для изучения влияния геометрических параметров составных частей аппарата на эффективность разрушения горных пород нами разработан струйный аппарат с возможностью смены его частей (рис. 1).  
 На первом этапе исследований было выявлено, что наиболее эффективным диаметром сопла для лабораторных исследований из ряда 1,5; 2; 2,5 и 3 мм является 2 мм (геометрический параметр равен 16).  
 Далее проведено исследование влияния угла раскрытия диффузора на эффективность забуривания керамической плитке. При этом варьировалось расстояние между долотом и забоем. Исходными параметрами являлись: диаметр шаров  $D_{ш} = 3$  мм; масса порции шаров  $m_{ш} = 25$  г; диаметр сопла  $d_c = 2$  мм; диаметр камеры смешения  $d_{кс} = 8$  мм; длина камеры смешения  $l_{кс} = 82$  мм; время бурения  $t = 2$  мин; расход жидкости при истечении из сопла  $Q_c = 6,7$  л/мин; давление перед соплом  $P_c = 1$  МПа. На основе экспериментальных данных построены графики, представленные на рис. 2 и 3. Результаты исследований формы криволинейного забоя представлены на рис. 4.

Из рис. 2–3 видно, что при уменьшении угла раскрытия диффузора в ряду  $30^\circ - 20^\circ - 10^\circ$  диаметр скважины и ее объем увеличиваются. Проинтерпретировать данные зависимости можно следующим образом. Как известно, профиль скоростей в камере смешения весьма неравномерен. Скорость смешанного потока у стенки камеры смешения меньше скорости потока вблизи оси камеры. Причем профиль скоростей выравнивается при отдалении от входа в камеру смешения. Для условия сохранения величины стенки аппарата длина диффузора тем больше, чем меньше угол раскрытия. Таким образом, на периферийную часть забоя будет воздействовать шары с большей скоростью, что и обусловит увеличение разработки скважины и ее объема.

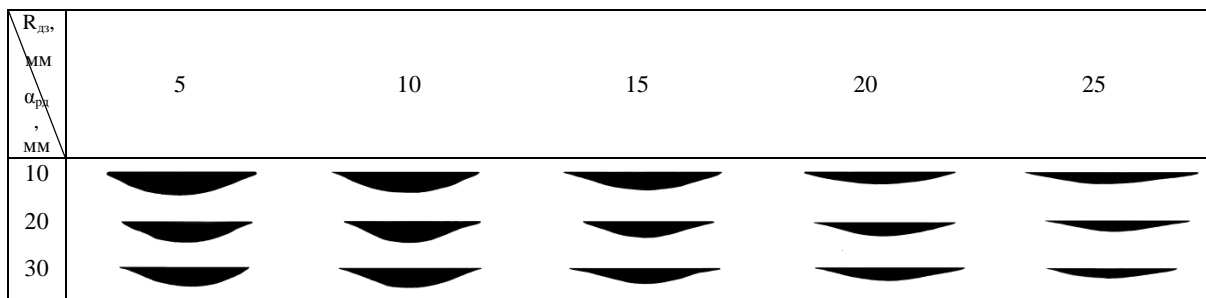
Для определения оптимальной длины камеры смешения были проведены три серии экспериментов при варьировании веса порции шаров. По полученным данным построен график, представленный на рис. 5.



**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 криволинейного забоя при варьировании расстояния между долотом и забоем с использованием диффузоров с различным углом раскрытия**

В процессе исследований было установлено, что при уменьшении длины камеры смещения оптимальное количество шаров в скважине уменьшается, что поясняется более быстрым подъемом шаров в затрубном пространстве для последующего всасывания. Кроме того, значения объема скважины при оптимальной массе порции шаров при бурении снарядом с длиной камеры смещения, равной 82 мм, примерно равен объему скважины при использовании камеры смещения длиной 22 мм. При использовании короткой камеры смещения несмотря на меньшее значение оптимальной массы шаров, количество шаров, совершивших рабочий цикл в единицу времени, будет больше. Из рис. 6 видно, что при бурении снарядом с камерой смещения длиной 22 мм диаметр скважины максимален, а глубина скважины минимальна, что объясняется относительно меньшей скоростью шаров.

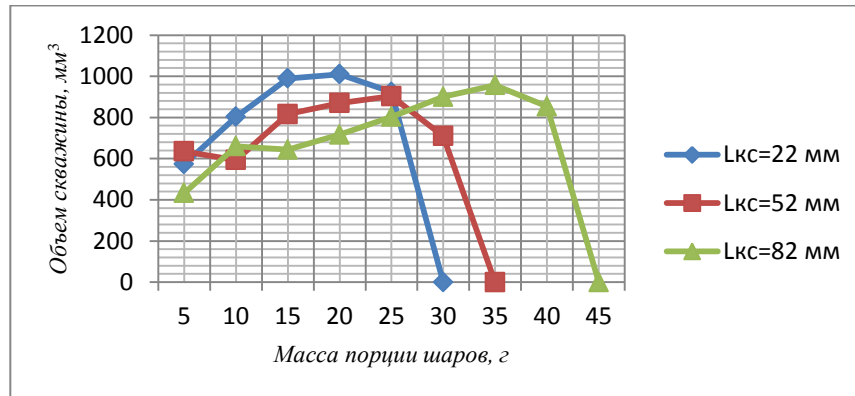


Рис. 5. Зависимость объема скважины от веса порции шаров

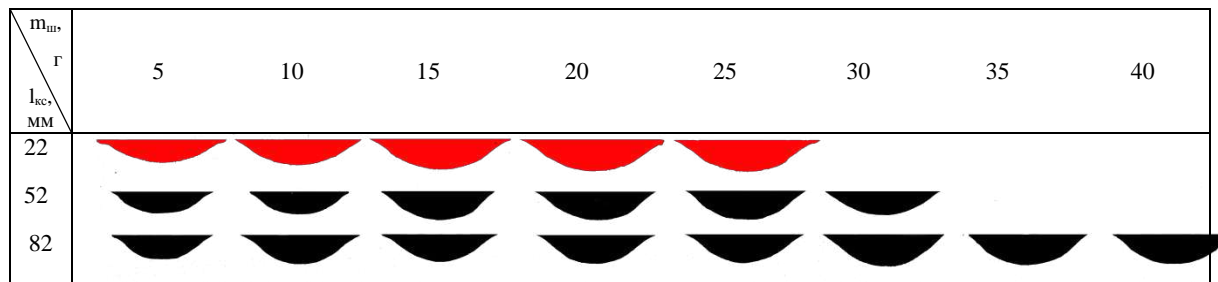


Рис. 6. Изменение формы криволинейного забоя при варьировании массы порции шаров и длины камеры смещения

Таким образом, выполненные исследования позволили получить качественную и количественную оценку влияния различных геометрических параметров на эффективность разрушения горных пород, что позволяет формировать рекомендации для проектирования реальных снарядов для шароструйного бурения и разрабатывать методики инженерного расчета их геометрических параметров.

#### Литература

1. Арбит В. С. Исследование и разработка методики расчета азекторных буровых устройств с целью создания эффективных технических средств для бурения и освоения скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1974. – 204 с.
2. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 671 с.
3. Кирилловский Ю.Л., Подвидз Л.Г. Рабочий процесс и основы расчета струйных насосов // Труды ВНГМ.– 1960.– Вып. 26. – С. 96–135.
4. Помазкова З.С. Расчет струйных насосов к установкам для нефтяных скважин. – М.: б.и., 1961. – 66 с.
5. Сазонов Р. П. Экспериментальное исследование водоструйных насосов с цилиндрической камерой смещения // Изв. ВТИ, 1949. – № 11. – С. 13–17.
6. Соколов Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 350 с.
7. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
8. Фридман Б. Э. Гидроэлеваторы. – М.: Машгиз, 1960. – 323с.