

В качестве системы контролируемого осевого и бокового сжатия выступает гидронасос с электронным манометром, сжатие осуществляется подачей порции гидравлического масла в полость камеры и гидроцилиндра, тарировка системы производится перед серией экспериментов с помощью датчиков давления фирмы Siemens. Использование системы гидравлического сжатия позволяет нагружать образцы горных пород до давлений в 600 Бар, что в несколько раз превышает значения при использовании сжатого воздуха.

Подача сжатого газа осуществляется через баллон, оснащенный электронным манометром, подключенным к компьютеру для записи изменения перепада давления в течение всего эксперимента. Регистрация профильтрованного объема газа осуществляется за счет использования фоточувствительных датчиков на платформе Arduino. В настоящее время разрабатывается ПО на языке программирования Python, что позволит оперативно формировать готовый бланк отчета по серии эксперимента с сохранением информации в необходимом формате файла. Профильтрованный газ вытесняя подкрашенную жидкость с одного резервуара в другой приводит в действие датчики, времена срабатывания которых записываются программой в журнал эксперимента. При завершении эксперимента переключают вход с пустого резервуара на полный.

Разработанные технические средства позволяют проводить серии экспериментов с различными образцами горных пород для исследования зависимостей изменения газопроницаемости от всестороннего сжатия, наличия в образцах трещин гидроразрыва с последующим заполнением их расклинивающим материалом. Результаты данных исследования будут полезны при проектировании систем шахтной дегазации, дизайну шахтного гидроразрыва, а также при составлении плана закачки рабочих жидкостей в трещину гидроразрыва с последующим закреплением ее бортов пропантом различной плотности.

#### Литература

1. Шилова, Т. В., Рыбалкин Л.А., Яблоков А.В. Прогнозирование проницаемости трещиноватых углей в условиях естественного залегания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 2. – С. 75-85.
2. Serdyukov S. V., Shilova T. V., Drobchik A. N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks // Journal of mining science. – 2017. – Т. 53. – № 5. – С. 954-961.
3. Pan Z., Connell L. D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data // International Journal of Coal Geology. – 2012. – Т. 92. – С. 1-44.
4. Shilova T. V., Rybalkin L. A., Yablokov A. V. Prediction of In-Situ Cleaved Coal Permeability // Journal of Mining Science. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 226-235.
5. Sander R., Pan Z., Connell L. D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – Т. 37. – С. 248-279.
6. Рыбалкин, Л. А., Сердюков С.В. Лабораторные исследования влияния вибрации на проницаемость угольного керна, содержащего сквозную трещину // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 2. – С. 180-186.

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

**Исаев Е.Д.**

Научный руководитель профессор Л.А. Саруев

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

Шароструйный способ бурения был предложен в США в середине прошлого века [1]. Способ обладает рядом преимуществ, таких как низкие требования к буровому станку ввиду отсутствия необходимости в создании осевой нагрузки и во вращении снаряда, простота конструкции, эффективность при бурении твердых горных пород за счет ударного воздействия [9].

Шароструйный способ бурения может быть более эффективен, чем вращательный способ, при бурении в твердых горных породах, в условиях стесненной рабочей площадки, при бурении из подземных горных выработок, особенно когда требуется бурить скважины малого диаметра (от 50 см) протяженностью от 50-100 м [9].

В последние 10 лет шароструйное бурение активно исследуется и развивается. Известны исследования, проводимые в Украине [2] и в Китае [3]. С 2012 года шароструйное бурение исследуется в Томском политехническом университете. Предложена собственная конструкция, главными отличительными чертами которой являются наличие задерживающего устройства и использование датчика акустических колебаний для контроля расстояния между снарядом и забоем [7, 8].

Различными исследователями уже производились неоднократные промышленные испытания шароструйного бурения, но способ все еще не получил промышленного внедрения. Одной из причин этого может являться сложность подбора оптимальных технологических режимов ввиду существенного влияния на них условий бурения (диаметр и глубина скважины, физических свойств разбурываемых горных пород, траектории скважины и т.д.).

Несмотря на то, что уже определены зависимости, характеризующие эффективность шароструйного бурения [5, 6], подбор режимов в производственных условиях все еще остается сложной задачей. Проведение большого числа тестовых испытаний в производственных условиях может быть невозможно. Поэтому актуальность приобретает разработка рекомендаций, которые могут быть поняты и использованы непосредственно членами буровой бригады, не обладающими знаниями по планированию и проведению экспериментов.

Цель работы: разработка методики подбора оптимальных технологических параметров шароструйного бурения в производственных условиях.

Задачи:

Определить все технологические параметры, которыми можно варьировать в процессе бурения.

Произвести анализ зависимостей, характеризующих эффективность шароструйного бурения.

На основе проведенного анализа разработать рекомендации к подбору технологических параметров в полевых условиях.

Рассмотрим конструкцию снаряда для шароструйного бурения (Рис.1). В ее основе лежит струйный аппарат. Промывочная жидкость проходит по колонне бурильных труб и истекает из сопла 1. Струя воздействует на шары 6, циркулирующие в скважине, ускоряя их. Шары 6 увеличивают свою скорость, проходя через камеру смешения 4 (вторичное сопло), и ударяются о забой скважины, осуществляя его разрушение. Далее шары вместе с разрушенной горной породой поднимаются по затрубному пространству. Горная порода выносятся вверх по стволу, а шары отклоняются от начальной траектории под воздействием задерживающего устройства 3 и повторно попадают в камеру смешения, где снова ускоряются под действием струи жидкости.

Анализ работ [1, 5, 6, 9] позволяет выделить следующие технологические параметры:

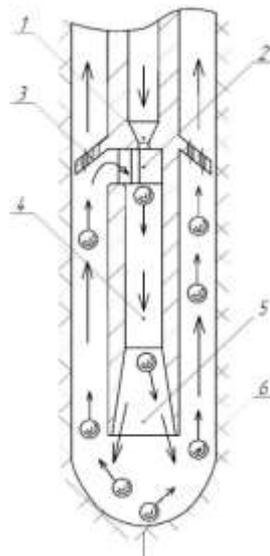
расстояние между снарядом и забоем;

число шаров;

диаметр шаров;

режимные параметры насоса.

Проанализируем влияние каждого из перечисленных факторов.



**Рис. Снаряд для шароструйного бурения:**  
**1 – сопло; 2 – впускные окна; 3– задерживающее устройство**  
**4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары**

Одним из ключевых факторов является диаметр шаров. В лабораторных условиях установлено, что диаметр шаров должен быть максимально возможным [5, 6]. При бурении без задерживающего устройства может происходить смещение оси, проходящей через центр бурового снаряда, относительно оси скважины, что способно привести к неравномерному разрушению горной породы на забое и изменению траектории ствола скважины. Поэтому в дальнейшем описании методики подбора режимных параметров рекомендации будут приведены для конструкции снаряда с задерживающим устройством, выполняющим, в том числе, функцию центратора.

Рекомендуется начинать бурение с использованием шаров, диаметр которых эквивалентен ширине задерживающего устройства. В производственных условиях возможно ориентироваться по звуку, который сопровождает бурение. Застревание шаров между внешней стенкой снаряда и стенками скважины будет приводить к неравномерному распределению ударов, передаваемых по колонне бурильных труб, что можно считать признаком использования шаров слишком большого диаметра. В этом случае требуется взять шары меньшего диаметра с минимальным шагом. С высокой долей вероятности потребуются всего один шаг по подбору диаметра шаров.

Число шаров – сложный для определения параметр. С увеличением числа шаров эффективность бурения увеличивается до определенного момента, далее их становится слишком много и часть шаров перекрывают забой, что приводит к снижению механической скорости бурения [5, 6].

Подбор количества шаров рекомендуется осуществлять с максимальной массы порции в сторону ее уменьшения. При этом, в случае использования шаров наибольшего диаметра, при слишком большой массе порции будет происходить их заклинка. Под заклинка подразумевается скопление шаров перед впускными окнами, приводящее к остановке циркуляции.

Следует использовать порцию шаров массой на 20 % ниже той, при которой будет наблюдаться заклинка. Таким образом, оптимальную массу порции можно будет подобрать в относительно короткий временной промежуток.

Расстояние между снарядом и забоем. От величины данного параметра зависит скорость бурения и выработка скважины по диаметру. При минимально возможном расстоянии, равном диаметру шара, скорость бурения становится наибольшей, но при этом диаметр скважины в процессе бурения может снижаться.

На начальном этапе требуется разгрузить снаряд на забой и запустить циркуляцию. При наличии ударов, свидетельствующих о прохождении шаров, необходимо дополнительно опустить снаряд. Далее, при неизменной производительности насоса следует поднять снаряд над забоем на величину, равную диаметру шара +20%. В процессе бурения следует контролировать хождение инструмента. В случае затруднения хождения снаряда рекомендуется увеличить расстояние до забоя. При приближении снаряда к забою в определенный момент может произойти остановка циркуляции шаров. В этом случае расстояние до забоя требуется увеличить.

Режимные параметры насоса. При прочих равных условиях, с увеличением производительности насоса возрастает скорость истечения струи жидкости из сопла, определяющая энергию, которой обладает шар перед соударением с горной породой.

Рекомендуется начинать бурение с максимальной производительности насоса. Слишком большие вибрации снаряда, а также его износ в процессе бурения будут свидетельствовать о том, что скорость шара слишком высокая и после удара шара о забой часть избыточной энергии не расходуется на разрушение, а переходит в кинетическую энергию, расходуемую на отскок. В этом случае рекомендуется уменьшить производительность насоса до достижения минимальной вибрации при сопоставимой скорости проходки.

В случае, если максимально производительности насоса недостаточно для увеличения скорости струи, возможно уменьшить диаметр сопла. При этом перепад давления на сопле возрастает. При использовании сопла малого диаметра также могут увеличиться требования к насосному оборудованию.

#### Выводы

Сформированы рекомендации к подбору технологических параметров шароструйного бурения в производственных условиях. Рекомендации разработаны с учетом использования снаряда с задерживающим устройством. Полученные выводы могут быть использованы при планировании работ, подготовке программ на бурение.

#### Литература

1. Eckel, I.E. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits [Text] / I.E. Eckel, F.H. Deily, L.W. Ledgerwood // Transaction AIME, Dallas. – 1956. – V. 207. – P. 15. Eckel J. E., Deily F. H. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits //TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERS. – 1956. – T. 207. – №. 1. – С. 1-10.
2. Ilnatov, A.O. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling [Text] // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – V. 15. – Issue 3. – P. 122–129.
3. Tiancheng Fang, Fushen Ren, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Hanxu Liu. Particle jet impact deep-rock in rotary drilling: Failure process and lab experiment [Text] // PLoS ONE. – April 28, 2021. – P. 1–19.
4. Исаев, Е.Д. К вопросу перспектив развития шароструйного бурения [Текст] // Труды XXIV Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2020. – С. 451–452.
5. Ковалев, А.В. Теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов шароструйного бурения скважин [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Ковалев Артем Владимирович. – Томск, 2015. – 143 с.
6. Ковалев, А.В. Исследование влияния технологических режимов на эффективность шароструйного бурения [Текст] / А.В. Ковалев, А.А. Яцкив, Е.Д. Исаев // Труды XVIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 405–408.
7. Патент РФ № 143090, Е 21 В 7/18. Стенд для исследования технологических процессов шароструйного бурения / А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков, М.В. Горбенко, Е.Д. Исаев, Ф.Р. Алиев, Д.А. Якушев. – № 2014106459/03; Заявлено 20.02.2014; Опубл. 10.07.2014.
8. Патент РФ № 2640445, С1/ А.В. Способ шароструйного бурения скважин / А.В. Ковалев, В.В. Урниш, Л.А. Саруев, М.В. Горбенко, С.Я. Рябчиков, Е.Д. Исаев, А.Р. Вагапов, А.В. Епихин. – № 2016146972; Заявл. 29.11.2016; Опубл. 09.01.2018.
9. Уваков, А.Б. Шароструйное бурение [Текст] / А.Б. Уваков. – М.: Недра, 1969. – 207 с.