

УДК 622.243.43

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ СНАРЯДА ДЛЯ ШАРОСТРУЙНОГО БУРЕНИЯ

Исаев Евгений Дмитриевич¹,
pelletdrilling@gmail.com

Ковалев Артем Владимирович¹,
arteka011287@mail.ru

Саруев Лев Алексеевич¹,
saruevla@tpu.ru

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Несмотря на активное развитие возобновляемых источников энергии, ископаемое топливо все еще занимает лидирующую позицию среди известных энергоресурсов. При этом, согласно прогнозам, в ближайшие десятилетия Россия останется одним из их крупнейших мировых экспортеров. Поэтому в нашей стране все более остро стоит вопрос по сохранению объема добычи полезных ископаемых, что требует разведки новых месторождений, разработки новых решений, позволяющих осуществлять работы в сложных условиях. Одним из таких решений может стать шароструйное бурение. Над развитием шароструйного бурения работали ряд исследователей. Было предложено большое количество различных снарядов для шароструйного бурения. При этом до сих пор не существует конструкции, принятой за наиболее рациональную.

Цель: разработка рекомендаций к конструкции снаряда для шароструйного бурения, наиболее полно отвечающего требованиям геологоразведочных и горнодобывающих отраслей промышленности.

Объектом исследования является буровой снаряд для шароструйного бурения.

Методы: обзор литературных источников; систематизация классификационных признаков различных конструкций снарядов для шароструйного бурения; анализ известных конструкций согласно разработанной классификации.

Результаты. Установлено, что наибольшая механическая скорость бурения шароструйным способом будет достигаться при использовании снаряда, состоящего из одной камеры смешения цилиндрической формы. При этом подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством, а расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без использования элементов, контактирующих с забоем скважины. Предложена конструкция снаряда, удовлетворяющего перечисленным критериям.

Ключевые слова:

Шароструйное бурение, шароструйный снаряд, эжектор, струйный аппарат, ударное бурение.

Введение

За последние 10 лет интерес к шароструйному бурению существенно вырос. С 2011 г. опубликовано большое число статей и патентов, посвященных данному способу, в том числе и зарубежных авторов. Несмотря на возросший интерес, до сих пор четко не определена оптимальная конструкция снаряда для шароструйного бурения. Так, исследователями из Украины [1–4] предлагается конструкция, в основе которой лежит комбинирование шароструйного бурения с вращательным бурением и использованием гидравлического забойного двигателя для передачи вращения снаряду. Исследователи из Китая предлагают комбинировать механическое вращательное и ударное бурение. Разрушение периферийной части забоя осуществляется с использованием резцов типа PDC и ударным разрушением центральной части забоя металлическими сферами, выходящими из сопел насадок долота и циркулирующими с подъемом из скважины [5–14]. В конструкции, предложенной С.А. Заурбековым в Казахстане, шароструйное бурение комбинируется с вращательным, но механическим способом разрушается не периферийная, а центральная часть забоя [15]. Среди более ранних исследований, проводимых в США [16] и СССР [17], была принята конструкция с

одной камерой смешения цилиндрической формы, где забой разрушался под действием только ударов шаров. Помимо перечисленных решений, существует множество других запатентованных конструкций снарядов.

Несмотря на большой объем работы, проделанной различными исследователями, шароструйное бурение все еще полностью не исследовано, и все еще остаются нерешенными некоторые проблемы, препятствующие его внедрению. Требуется проведение дополнительных лабораторных исследований. Успешность и лабораторных, и стендовых испытаний, и последующего широкого промышленного внедрения напрямую будет зависеть от выбора исследуемой конструкции снаряда. При этом, как следует из анализа работ [1–31], единая конструкция снаряда, которую можно принять за наиболее рациональную, все еще не определена.

Цель: разработать рекомендации к конструкции снаряда для шароструйного бурения.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- осуществить обзор патентов и других литературных источников;
- выделить классификационные признаки в конструкциях снарядов;

- провести анализ по выделенным классификационным признакам;
- сформировать рекомендации к конструкции снаряда для шароструйного бурения;
- обосновать совместимость предложенных рекомендаций.

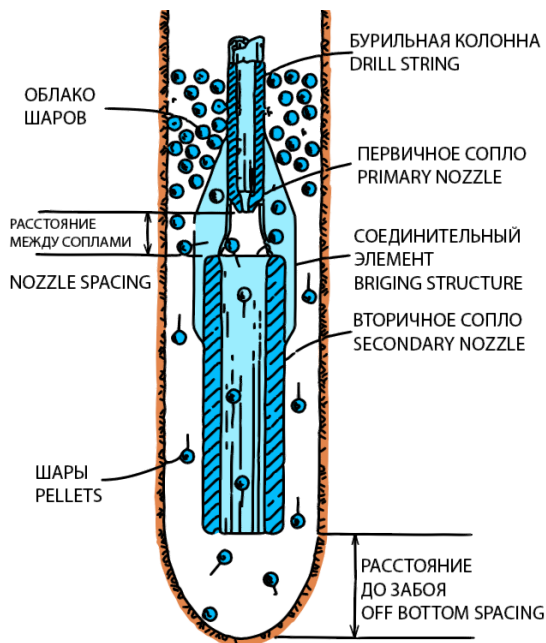


Рис. 1. Первая конструкция снаряда для шароструйного бурения, 1956 г., США

Fig. 1. First pellet impact drilling bit design, 1956, USA

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена первая конструкция снаряда для шароструйного бурения, предложенная в США [16]. На ее примере рассмотрим, как происходит разрушение горной породы при шароструйном бурении.

По колонне буровых труб подается промывочная жидкость, которая истекает из сопла с высокой скоростью. Шары движутся в потоке промывочной жидкости и ускоряются под действием струи, проходя внутри вторичного сопла (камеры смешения). Вылетая, шары пролетают расстояние между снарядом и забоем скважины и ударяются о горную породу, разрушая ее. Далее шары поднимаются по затрубному пространству, формируя облако, и повторно поступают внутрь снаряда, проходя промежуток между первичным и вторичным соплами, увлекаемые струей жидкости, истекающей из сопла. Данный цикл многократно повторяется.

Перед проведением анализа необходимо определить, какие условия должны выполняться при бурении различными снарядами, чтобы бурение можно было отнести к шароструйному. Такие условия сформулированы на основании работ [16, 17]:

- разрушение горной породы происходит под действием ударов металлических шаров;
- шары ускоряются под действием струи жидкости или воздуха и не имеют постоянного контакта со снарядом;

- одни и те же шары циркулируют многократно, существенно не повреждаясь после единичных столкновений.

Исходя из перечисленных выше условий, в дальнейший обзор не включены способы бурения, в которых разрушение горной породы происходит исключительно в результате гидромониторного или абразивного воздействия, а также в результате ударного воздействия сферических тел, энергия которым передается непосредственными ударными механизмами.

Для разработки рекомендаций к конструкции снаряда для шароструйного бурения необходимо было выделить классификационные признаки, по которым можно разделить все известные снаряды. В результате проделанной работы рассмотрено большое число конструкций, в том числе приведенных в данной статье [18–31], анализ которых позволил выделить признаки, перечисленные ниже.

По способам повторной подачи шаров на забой:

- изменение направления движения шаров за счет снижения скорости восходящего потока и эффекта эжекции;
- изменение направления движения шаров за счет использования механического задерживающего устройства;
- прохождение шарами полного цикла циркуляции вместе с промывочной жидкостью;

По расположению сопел:

- одно вертикальное сопло (бурение без вращения снаряда);
- одно наклонное сопло (бурение с вращением снаряда);
- несколько вертикальных сопел (бурение без вращения или с вращением снаряда);
- несколько наклонных сопел (бурение с вращением снаряда);
- одно вертикальное сопло, смещенное относительно центра (бурение с вращением снаряда).

По наличию комбинирования с вращательным бурением:

- без комбинирования;
- с комбинированием, шароструйным способом разрушается центральная часть забоя;
- с комбинированием, шароструйным способом разрушается периферийная часть забоя.

По способу поддержания расстояния между снарядом и забоем:

- с центрально расположенным опорным элементом (комбинирование с вращательным бурением и без комбинирования);
- с периферийно расположенным опорным элементом (комбинирование с вращательным бурением);
- с использованием электромагнитного расходомера в составе колонны;
- с использованием датчика расхода шаров;
- с периодической кратковременной разгрузкой снаряда на забой и подъемом до требуемой высоты.

Ниже проведен анализ каждого из перечисленных классификационных признаков.

Способы повторной подачи шаров. После удара о горную породу шары поднимаются по затрубному пространству вместе с частицами шлама. Необходимо изменить траекторию движения шаров и повторно направить их к забою скважины. Для решения этой задачи применяются различные технические средства.

Наиболее простым средством управления траекторией движения шаров является изменение скорости и направления потока промывочной жидкости, в которой они находятся. На рис. 2 изображены конструкции шароструйных снарядов, где управление потоком

достигается за счет изменения диаметра снаряда и эффекта эжекции. Шары, поднимаясь по затрубному пространству, достигают зоны, скорость восходящего потока в которой ниже из-за увеличения площади сечения кольцевого пространства (рис. 2, зона 1). При этом скорости восходящего потока становится недостаточно для выноса шаров, и происходит их скопление над зоной изменения диаметра снаряда. Из образовавшегося облака шары повторно попадают внутрь снаряда за счет эффекта эжекции, заключающейся в создании зоны низкого давления (рис. 2, зона 2) рядом с быстро истекающей из сопла жидкостью.

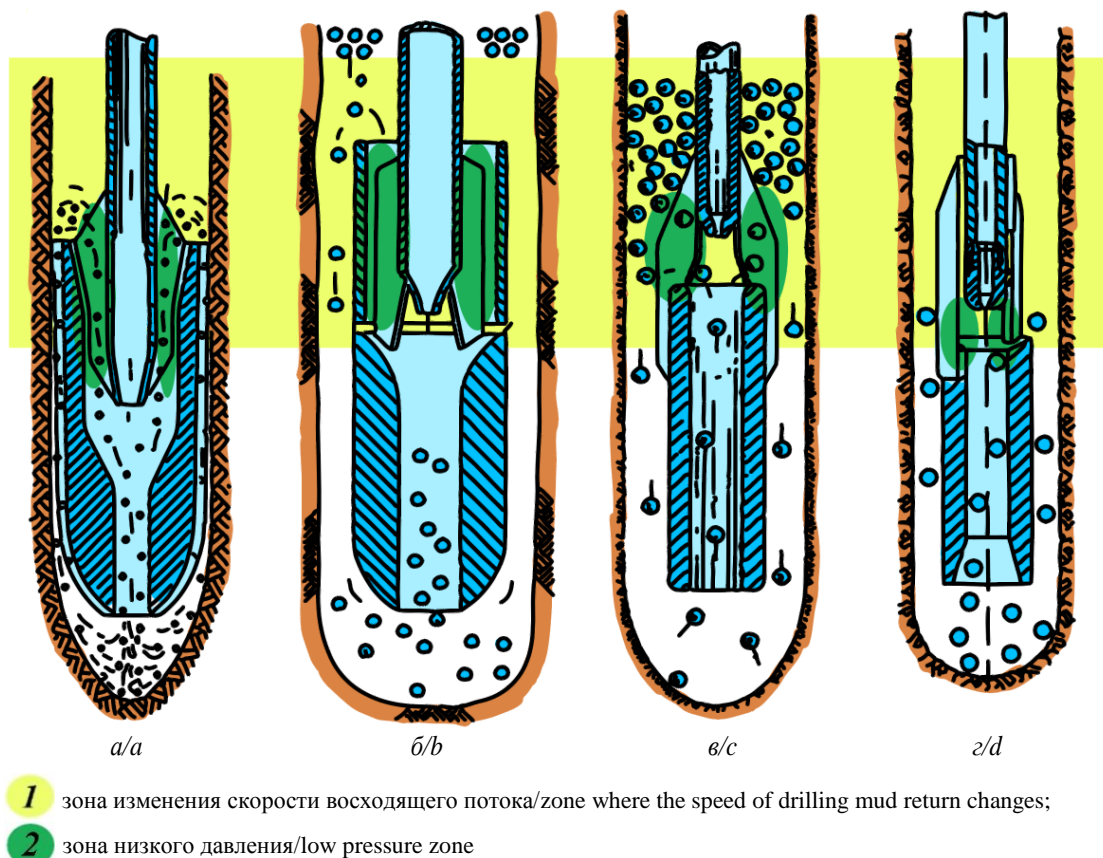


Рис. 2. Снаряды с ограничением высоты поднятия шаров за счет эффекта эжекции: а) П.С. Уильямс, США; б) Г. Рамзи, США; в) Дж.Е. Экель, США; г) А.Б. Уваков, СССР

Fig. 2. Drilling bits with limited raising of pellets due to the ejection effect: а) P.S. Williams, USA; б) G.H. Ramsey, USA; в) J.E. Eckel, USA; г) A.B. Uvakov, USSR

Способ изменения направления движения шаров, представленный в схемах на рис. 2, имеет ряд недостатков:

- Над выпускными окнами формируется скопление шаров, препятствующих свободному подъему шлама.
- Повторно эжектируются не только шары, но и часть шлама. В процессе бурения это приведет к снижению эффективности бурения и дополнительному абразивному износу элементов.
- Существует вероятность самопроизвольного искривления скважин из-за отсутствия центрирующих элементов рядом с забоем.
- Необходимо обеспечить строго заданную производительность насосов, которую сложно определить и проконтролировать в производственных

условиях. При повышении производительности существует риск подъема шаров выше выпускных окон. При снижении производительности из-за падения коэффициента эжекции уменьшается расход шаров в единицу времени, что снижает эффективность бурения.

- Необходимо обеспечить строго заданные реологические свойства промывочной жидкости. При увеличении реологических параметров бурового раствора шары могут подниматься выше выпускных окон, а коэффициент эжекции может падать.

Другим способом изменения направления движения шаров является использование задерживающих элементов. Задерживающее устройство в конструкциях

снарядов, изображенных на рис. 3, выделено красным цветом. Оно располагается между шароструйным снарядом и стенками скважины и препятствует подъему

шаров выше определенной зоны. Задерживающее устройство частично перекрывает затрубное пространство, направляя шары внутрь камеры смешения.

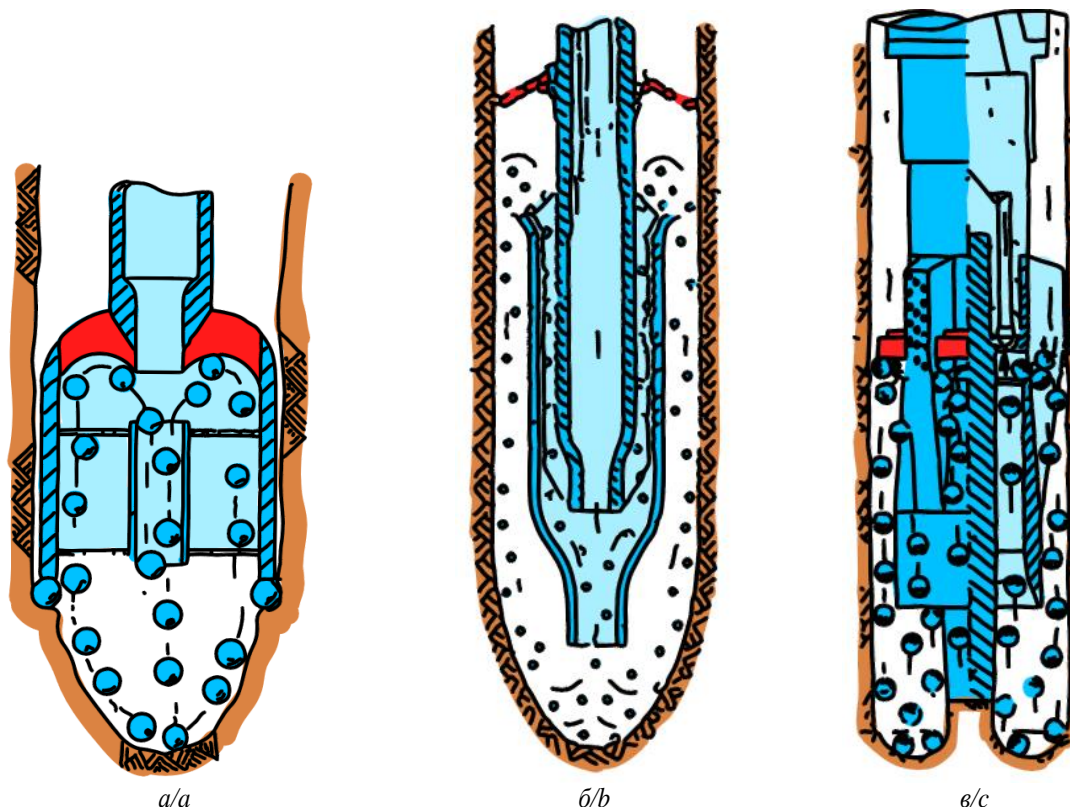


Рис. 3. Снаряды с ограничением высоты поднятия шаров за счет механического задерживающего устройства: а, б) Л.В. Леджервуд, США; в) С.А. Заурбеков, Казахстан

Fig. 3. Drilling bits with limited raising of pellets due to a mechanical arrester: a, b) L.W. Ledgerwood, USA; c) S.A. Zaurbekov, Kazakhstan

Применение задерживающего устройства позволяет решить некоторые проблемы:

- Шары не формируют скопления над впускными окнами и быстрее повторно попадают в камеру смешения, благодаря чему уменьшается переизмельчение шлама и абразивный износ снаряда.
- Снимается ограничение на производительность насосов и реологические свойства промывочной жидкости. При повышении производительности насоса шары не будут выноситься выше впускных окон.
- Обеспечивается дополнительное центрирование бурового снаряда в скважине.

Благодаря перечисленным выше преимуществам, можно предположить, что применение задерживающего устройства позволяет добиться большей скорости бурения и упростить контроль технологических параметров при бурении.

При этом конструкция задерживающего устройства должна быть тщательно продумана для минимизации вероятности возникновения осложнений. В процессе бурения возможны случаи осыпания горной породы со стенок скважины, что может нарушить свободное хождение снаряда. Также в процессе бурения будет происходить износ задерживающего

устройства в результате непосредственного контакта с шарами.

Известен еще один способ повторной подачи шаров, который заключается в том, что шары поднимаются на поверхность, отделяются от выбуренной породы и повторно опускаются по колонне бурильных труб, проходя через сопло [5–14]. Существенным ограничением при применении данной схемы бурения является максимальный возможный диаметр шаров, ограниченный диаметром сопла (в работах [15–17] установлено, что наибольшая скорость бурения достигается при максимально возможном диаметре шаров). Кроме того, необходимо решить ряд сложных задач для успешной реализации данного способа повторной подачи шаров: отделение шаров от выбуренной породы; предотвращение оседания шаров в емкостях на поверхности; подача шаров в скважину в обход буровых насосов.

Способы направления шаров на забой скважины. В основе большинства конструкций снаряда для шароструйного бурения лежит струйный аппарат, состоящий из сопла (первичного сопла) и камеры смешения (вторичного сопла). Сопло предназначено для ускорения струи жидкости, передающей энергию шарам; камера смешения предназначена для направле-

ния движения шаров к забою скважины. Данные элементы играют значительную роль в эффективности бурения, так как непосредственно влияют на скорость и траекторию движения шаров. При этом ключевыми факторами является их количество, расположение и размеры относительно диаметра скважины.

Наиболее подробно в литературе описаны конструкции с одним соплом и камерой смешения, ось которой совпадает с осью скважины. Снаряды с несоосным расположением камеры смешения, как с одним, так и с несколькими соплами, представлены на рис. 3.

На рис. 4, а изображен снаряд с одним соплом и камерой смешения, смещенными относительно центра оси скважины. Для разрушения горной породы по всему забою снаряд требуется вращать, подставляя под удар различные части забоя. У представленной конструкции сложно выделить явные преимущества. Особенностью можно считать подпружиненный элемент, выступающий в качестве контроля расстояния между снарядом и забоем. Предположительно, в реальных условиях бурения шары будут подниматься выше по затрубному пространству, так как отсут-

ствуют препятствующие этому факторы: изменение сечения снаряда или задерживающее устройство.

На рис. 4, б, в представлены конструкции снарядов с наклонным направлением сопла и камеры смешения. Элементы направлены таким образом, чтобы шары бомбардировали периферийную часть забоя. Главной решаемой задачей являлась разработка скважины по диаметру. Для формирования цилиндрической формы ствола скважины конструкции необходимо вращать, что можно назвать главным минусом. Вращение накладывает дополнительные требования к применяемому наземному узлу (станку для бурения), усложняется технология проведения работ, увеличивается риск возникновения аварий. При вращении неизбежно возрастет и износ снаряда.

На рис. 4, д представлен скважинный расширитель, имеющий несколько сопел и камер смешения, расположенных по периферийной части забоя. В процессе бурения скважины с большой долей вероятности шары попадут в начальный ствол меньшего диаметра (пилотный ствол), что приведет к прекращению бурения.

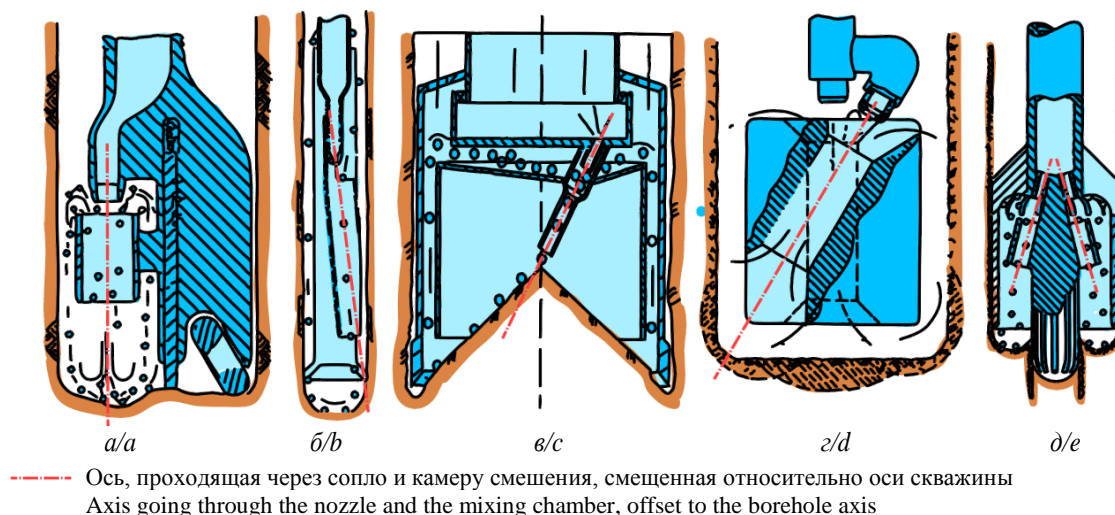


Рис. 4. Конструкции снарядов с несоосным расположением сопел: а) П. Уильямс, США; б) Дж. Ортофф, США; в) Т.Н. Зубкова, Россия; г) В.В. Штрассер, СССР; д) М. Рот, США

Fig. 4. Designs of drilling bits with misaligned nozzles: а) P.S. Williams, USA; б) J.E. Ortloff, USA; в) T.N. Zubkova, Russia; д) V.V. Shtrasser, USSR; е) M. Roth, USA

Общим недостатком снарядов на рис. 4 является снижение максимального диаметра используемых шаров, по сравнению с конструкциями с одним соплом и камерой смешения, расположенными соосно со скважиной, что обусловлено конструктивными особенностями.

Использование нескольких сопел приводит к конструктивному усложнению снаряда. При прочих равных условиях при одной и той же производительности насоса снижается скорость истекающей струи на каждое из сопел. Увеличивается вероятность неравномерного разрушения забоя. В случае смещения снаряда в скважине относительно оси существует высокая вероятность изменения формы скважины из-за того, что шары будут поступать в каждую камеру смешения неравномерно.

Исходя из перечисленных факторов, наиболее эффективным можно считать бурение со снарядом, имеющим одну камеру смешения и одно сопло, расположенные соосно. Именно данные конструкции имели наибольшее практическое применение. Снаряды иных конструкций представлены только в патентах. Исключением является снаряд С.А. Заурбекова, изображенный на рис. 3, в. Данный снаряд будет дополнительно рассмотрен в следующих разделах.

Комбинирование ударного и вращательного бурения. Конструкции, в которых комбинируются два разных способа бурения, ударное и механическое вращательное, приведены на рис. 5. Элемент, осуществляющий разрушение под действием вращения и осевой нагрузки, выделен красным. Во всех приведенных на рисунке случаях под действием удара раз-

рушается центральная часть забоя. Конструкции, в которых ударным способом разрушается периферийная часть забоя, представлены на рис. 3, в; 4, в. Вращательным способом разрушение осуществляется с применением либо алмазного, либо твердосплавного вооружения, а также при помощи дроби.

Достоинством комбинированного способа бурения является решение проблем необходимости под-

держания расстояния до забоя и номинального диаметра ствола скважины. Важно отметить, что при этом теряются основные достоинства шароструйного бурения: мобильность, отсутствие необходимости во вращении снаряда, накладываются дополнительные требования к прочностным характеристикам бурильной колонны, возрастают требования к буровой установке.

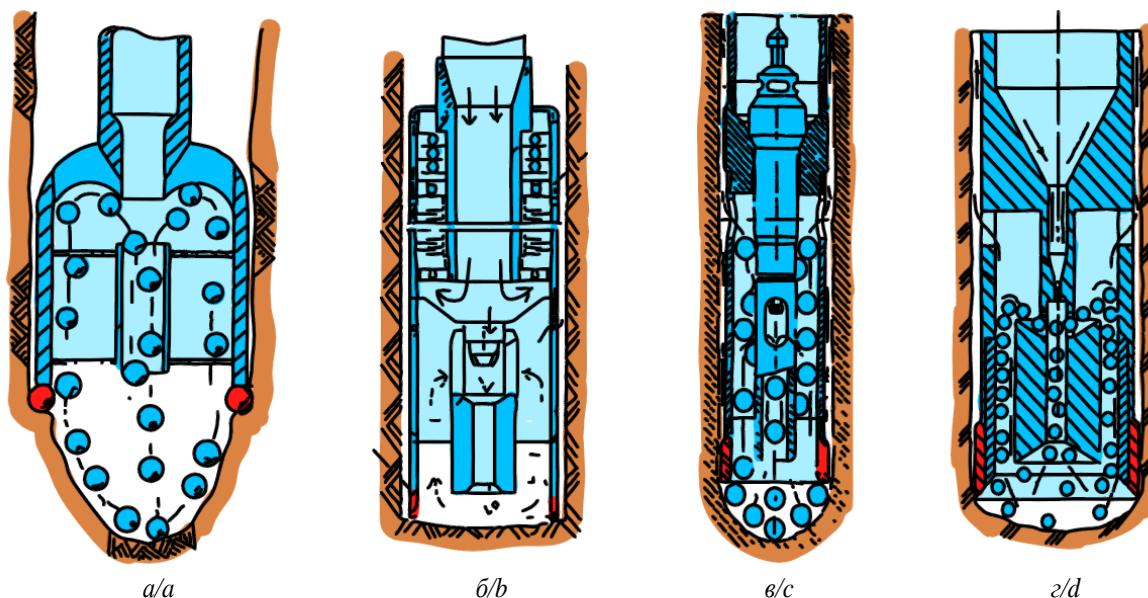


Рис. 5. Конструкции снарядов для комбинированного бурения: а) Л. Леджервуд, США; б) А.О. Игнатов, С.С. Вяткин, Украина; в) А.Б. Уваков, СССР; г) Т.Н. Зубкова, Россия

Fig. 5. Designs of drilling bits for combination drilling: a) L.W. Ledgerwood, USA; b) A.O. Ignatov, S.S. Vyatkin, Ukraine; c) A.B. Uvakov, USSR; d) T.N. Zubkova, Russia

Можно утверждать, что механической скорости бурения, получаемой при бурении комбинированным способом, можно добиться и при вращательном бурении сплошным забоем. Исключением можно считать конструкцию, изображенную на рис. 3, в. Данный снаряд в промышленных условиях показал более высокую эффективность бурения, чем при вращательном бурении с использованием шарошечных долот [15]. Это объясняется различным типом вооружения долот (при вращательном бурении использовались шарошечные долота, при комбинированном бурении центральная часть забоя разрушалась твердосплавными вооружением). При этом нет информации о продолжительности рейса бурения до износа вооружения, так как в работе отмечено, что фактором, ограничивающим продолжительность рейса бурения, являлся износ сопел.

Поддержание расстояния между снарядом и забоем. Особенностью шароструйного способа бурения является необходимость поддержания оптимального расстояния между снарядом и забоем.

Метод поддержания оптимального расстояния при помощи периодического опускания снаряда на забой (расхаживания) использовал А.Б. Уваков [17] в конструкции, представленной на рис. 2, г. Данный метод нельзя считать оптимальным, так как существует вероятность повреждения снаряда при чрезмерной разгрузке на забой.

Для снижения вероятности повреждения снаряда в другой конструкции, не получившей применения, предлагалось использовать подпружиненный узел, частично гасящий удар при разгрузке снаряда на забой (рис. 6, а). Решение существенно усложняет конструкцию снаряда, при этом подпружиненный узел располагается выше впускных окон, ребра которых являются наиболее слабым элементом, не выдерживающим высоких осевых нагрузок.

В конструкции, изображенной на рис. 6, б, имеется опорный элемент, касающийся забоя. При слишком большом расстоянии от снаряда до забоя проходное отверстие перекрывается, происходит прекращение циркуляции, сопровождаемое резким скачком давления на насосе. В этом случае требуется опустить снаряд ниже. Схему нельзя считать применимой в промышленных условиях. В процессе бурения опорный элемент будет подвержен многочисленным ударам шаров, что может привести к его повреждениям. Кроме того, данный элемент перекрывает сопло, что приведет к снижению скорости истечения струи промывочной жидкости. Также опорный элемент перекрывает центральную часть потока, где скорость истечения может быть потенциально максимальной, в результате чего существенно снизится скорость шаров и, соответственно, скорость бурения. Можно считать, что описанная проблема минимизирована в конструкции

С.А. Заурбекова (рис. 2, в), так как опорный элемент имеет большую устойчивость к ударам шаров за счет высокой металлоемкости, но этот же факт и препятствует разрушению центральной части забоя шарами.

Перечисленные два способа (подпружиненный элемент и наличие опоры) сочетает в себе конструкция П. Уильямса (рис. 4, а). Но применяемая там пружина, имея малый диаметр, не способна будет гасить сколь-либо существенные нагрузки.

Еще один способ поддержания расстояния – использование датчиков расхода шаров. Решение с электромагнитным датчиком расхода шаров изображено на рис. 5, в. Решение технически сложно реализуемо, так как, помимо размещения катушки электромагнитной индукции внутри стенки камеры смешения, необходимо обеспечить канал связи между датчиком и поверхностью. Такой канал связи сложно организовать через бурильные трубы.

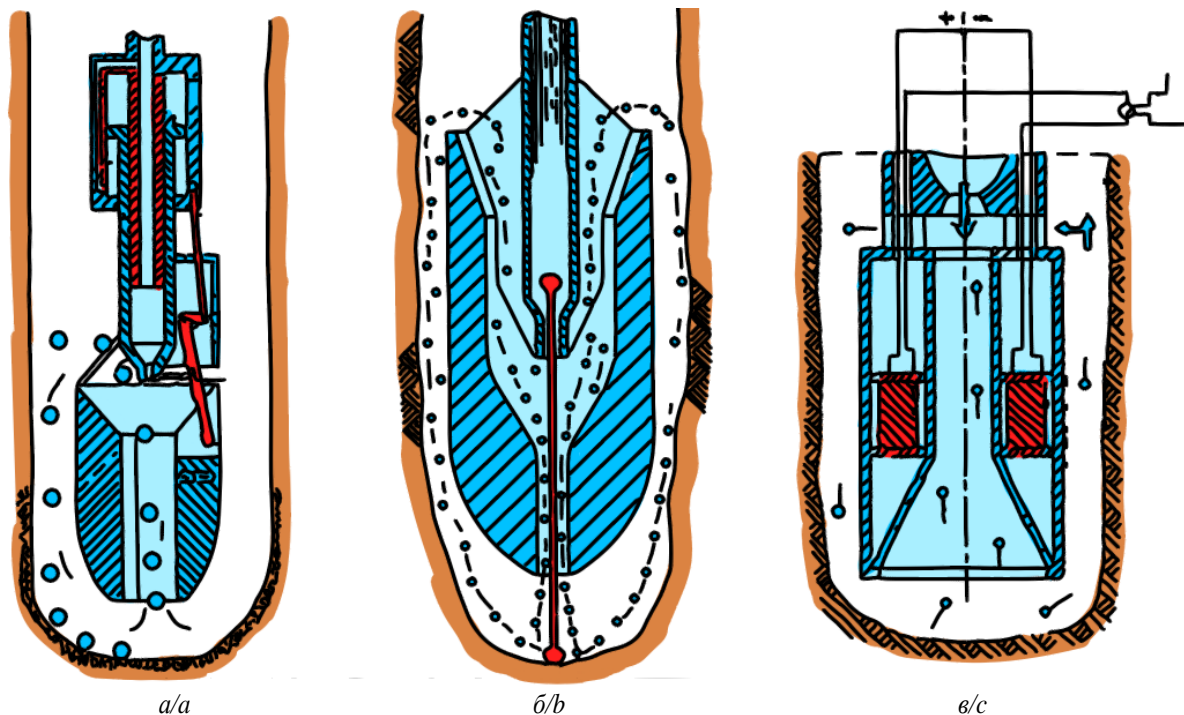


Рис. 6. Конструкции, решающие проблему поддержания расстояния между снарядом и забоем: а) Е.М. Макнатт, США; б) Л.В. Леджервуд, США; в) Л.С. Дербенев, СССР

Fig. 6. Designs of drilling bits that solve the problem of maintaining the distance between the drilling bit and the well bottom: a) E.M. McNatt, USA; b) L.W. Ledgerwood, USA; c) L.S. Derbenev, USSR

Разработанная конструкция снаряда. Проведенный анализ позволил выявить, что наибольшая механическая скорость бурения шароструйным способом будет достигаться при соблюдении критериев:

- Одна камера смешения цилиндрической формы и одно сопло, расположенные соосно со скважиной.
- Подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством.
- Отсутствует комбинирование с вращательным способом бурения.
- Расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без разгрузки снаряда на забой и без использования опорных элементов, перекрывающих часть забоя скважины и подвергаемых износу в процессе бурения.

Предлагаемая конструкция, совмещающая в себе перечисленные выше критерии, изображена на рис. 7 и состоит из одного сопла – 3 и одной камеры смешения – 4; имеется задерживающее устройство. Для поддержания постоянного расстояния между снарядом и забоем предлагается использовать датчик акустических колебаний, располагающийся на колонне

бурильных труб [17], совместно с блоками усиления и обработки сигнала.

Бурение осуществляется следующим образом. После подачи промывочной жидкости через сопло – 3 шары – 6 приводятся в движение циркуляцией промывочной жидкости. Поднимающиеся в затрубном пространстве шары – 6 ограничены наличием задерживающего устройства и под действием эффекта эжекции проходят через впускные окна внутрь камеры смешения – 4. Под действием струи жидкости шары ускоряются и ударяют о забой скважины, осуществляя разрушение горной породы. В процессе бурения часть шаров отскакивает от забоя и соударяется с буровым снарядом. Частоту ударов можно зафиксировать при помощи осциллографической приставки, соединенной с датчиком акустических колебаний, размещенным на колонне бурильных труб.

При углублении забоя происходит изменение частоты ударов шаров о забой скважины и стенки снаряда, что можно зафиксировать на осциллографической приставке. Для восстановления частоты ударов требуется переместить буровой снаряд ниже.

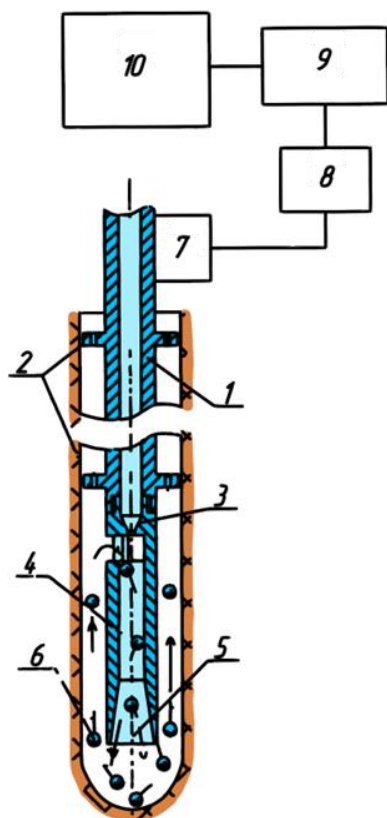


Рис. 7. Оптимальная конструкция снаряда: 1 – буровая колонна; 2 – центраторы; 3 – сопло; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары; 7 – датчик акустических колебаний; 8 – усилитель сигнала; 9 – осциллографическая приставка; 10 – система управления

Fig. 7. Optimal design of a drilling bit: 1 – drill string; 2 – centralizers; 3 – nozzle; 4 – mixing chamber; 5 – diffuser; 6 – pellets; 7 – acoustic vibration gauge; 8 – signal amplifier; 9 – oscilloscope; 10 – control system

Разработанная схема с применением датчика акустических колебаний успешно прошла лабораторные

стендовые испытания [32] и запатентована как полезная модель [33].

Предложенная автором схема снаряда применялась при проведении лабораторных испытаний по определению оптимальных технологических режимов бурения и геометрических пропорций снаряда.

Заключение

В работе рассмотрено большое количество конструкций снарядов для шароструйного бурения. Выделены различные классификационные признаки, объединяющие данные конструкции. Проведен анализ каждого из признаков, что позволило сформировать рекомендации по оптимизации конструкции снаряда для шароструйного бурения.

Согласно рекомендациям, снаряд должен состоять из одной камеры смешения цилиндрической формы и одного сопла, расположенных соосно со скважиной. При этом подъем шаров выше впускных окон должен быть ограничен задерживающим устройством, а расстояние между снарядом и забоем необходимо поддерживать без использования элементов, контактирующих с забоем скважины.

На основании сформированных рекомендаций предложена конструкция снаряда. Приведенная конструкция и технологическая схема запатентованы и прошли стендовые испытания.

Предложенная конструкция снаряда принята за основу для проведения дальнейших исследований. При применении данной конструкции можно добиться максимального баланса между механической скоростью бурения за счет оптимизации траектории движения шаров и возможностью использования шаров наибольшего диаметра.

Планируется в дальнейшей работе уделить дополнительное внимание оптимизации конструкции задерживающего устройства и отработке схемы для поддержания требуемого расстояния между забоем скважины и буровым снарядом при помощи датчика акустических колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – V. 15. – Iss. 3. – P. 122–129.
2. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles / A.O. Ihnatov, Ye.A. Koroviaka, J. Pinka, V.O. Rastsvietaiev, O.O. Dmytruk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – V. 1. – P. 11–18.
3. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling / A. Ihnatov, Ye. Koroviaka, V. Rastsvietaiev, L. Tokar // Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons. – 2020. – V. 230. – P. 1–14.
4. Кулеструмний пристрій для буріння свердловин: пат. Україна, 102708 №а201107452 МПК Е 21 В 7/18. Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
5. Experiment of rock breaking by particle-jet coupling impact / Cheng Xiaoze, Ren Fushen, Fang Tiancheng, Chang Yulian // Acta Petrolei Sinica. – 2018. – V. 39. – № 2. – P. 232–239.
6. Particle jet impact deep-rock in rotary drilling: failure process and lab experiment / Tiancheng Fang, Fushen Ren, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Hanxu Liu // PLoS ONE. – April 28, 2021. – P. 1–19.
7. Design and experimental investigation about a simulation device for particle impact rock breaking / Fushen Ren, Baojin Wang, Xiaoze Cheng, Suli Chen, Ruoxu Ma, Yang Li, Jianhua Liu // International Conference on Experimental Mechanics 2014. – Singapore, 2015. – V. 9302. – P. 1–10.
8. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: experimental and numerical study / Lei Li, Fangxiang Wang, Tianyang Li, Xiaodong Dai, Xueyang Xing, Xiancheng Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 185. – P. 1–12.
9. Failure volume under particle water-jet impact in deep well drilling engineering: mathematical modeling and verification analysis / Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng, Jianxun Cheng // Alexandria Engineering Journal. – 2020. – V. 60. – P. 1839–1849.
10. Stress modeling and simulation analysis of particle impact rock-breaking / Tiancheng Fang, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Fushen Ren, Fushen Ren // 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation. – Hefei, China, 2020. – V. 1. – P. 4866–4881.
11. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – V. 139. – P. 103504.

12. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock-breaking depth and damage area under particle jet impact // *Shock and Vibration*. – 2020. – V. 2020. – P. 1–12.
13. Fushen Rena, Tiancheng Fangb, Xiaoze Chengc. Theoretical modeling and experimental study of rock-breaking depth in particle jet impact drilling process // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 183. – P. 1–12.
14. Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting / Fangxiang Wang, Ruihe Wang, Weidong Zhou, Guichun Chen // *International Journal of Impact Engineering*. – 2017. – V. 102. – P. 169–179.
15. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 1995. – 141 с.
16. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // *Transaction AIME*. – 1956. – V. 207. – P. 1–15.
17. Уваков А.Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
18. Combination pellet impact drill and annulus cutting drill: Patent USA no. 2698736, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 01.04.1955.
19. Шароструйный снаряд для бурения скважин: А.с. № 417599, Е 21 В 7/18. № 1451266; заявл. 15.06.1970; опубл. 28.02.1974.
20. Шароструйный снаряд для бурения скважин: пат. РФ № 2114274, Е 21 В 7/18. № 96123178/03; заявл. 05.12.1996; опубл. 27.06.1998.
21. Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения): дис. ... канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1966. – 217 с.
22. Устройство для шароструйного бурения скважин: пат. РФ № 2124620, Е 21 В 7/18. № 97100372/03; заявл. 14.01.1997; опубл. 10.01.1999.
23. Pellet impact drilling apparatus: Pat. USA No. 2868509, cl. 255-61. Fil. 06.07.1956; Publ. 01.13.1959.
24. Pellet impact drill bit with controlled pellet return: Pat. USA No. 2779571, cl. 255-61. Fil. 04.09.1954; Publ. 01.29.1957.
25. Combination of pellet impact drilling and rotary shot drilling: Pat. USA No. 2727727, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 12.20.1955.
26. Pellet recycle control in pellet impact drilling: Pat. USA No. 2841365, cl. 255-1.8. Fil. 10.27.1953; Publ. 07.01.1958.
27. Momentum pellet impact drilling apparatus: Pat. USA No. 2807442, cl. 255-61. Fil. 01.29.1952; Publ. 09.24.1957.
28. Шароструйный снаряд для бурения скважин: А.с. № 939710, Е 21 В 7/18. № 3009898; заявл. 02.12.80; опубл. 30.06.82.
29. Controlling off-bottom position of pellet impact drill: Pat. USA No. 2728557, cl. 255-61. Fil. 07.15.1953; Publ. 12.27.1955.
30. Reverse circulation pellet impact drilling and coring apparatus: Pat. USA No. 2717761, cl. 255-18. Fil. 01.29.1952; Publ. 09.13.1955.
31. Способ эрозионного бурения скважин и устройство для его осуществления: А.с. № 870705, Е 21 С 37/16, Е 21 С 21/00, Е 21 В 7/18. № 2798122/22-03; заявл. 18.07.1979; опубл. 07.10.1981.
32. Урниш В.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Оптимизация режимов шароструйного бурения регулированием расстояния от снаряда до забоя // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 162–170.
33. Способ шароструйного бурения скважин: пат. РФ № 2640445, С1. № 2016146972; заявл. 29.11.2016; опубл. 09.01.2018.

Поступила 08.04.2022 г.

Информация об авторах

Исаев Е.Д., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ковалев А.В., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.243.43

DEVELOPING RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZING THE DESIGN OF THE DRILLING BIT FOR PELLET IMPACT DRILLING

Evgeniy D. Isaev¹,
pelletdrilling@gmail.com

Artem V. Kovalev¹,
arteka011287@mail.ru

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Despite the active development of renewable energy sources, fossil fuels still occupy a leading position among the known energy resources. According to forecasts, in the coming decades Russia will remain one of the largest world exporters of fossil fuels. In Russia, the issue of maintaining the volume of extraction of minerals is becoming more and more acute. This requires the exploration of new deposits, as well as the development of new solutions that allow carrying out the work in difficult conditions. Pellet impact drilling can be one of such solutions. Some researchers have worked on the development of this drilling method. A large number of different pellet impact drilling bits have been proposed. At the same time, there is still no design accepted as the most rational one.

Purpose: development of recommendations for the design of a drilling bit for pellet impact drilling, which most fully meets the requirements of geological exploration and mining industries.

The object of the research is a drilling bit for pellet impact drilling.

Methods: review of literary sources; systematization of the classification features of various designs of drilling bits for pellet impact drilling; analysis of previously developed designs according to the classification developed in this work.

Results. It was found that the highest mechanical speed of pellet impact drilling is achieved when using a drilling bit consisting of one mixing chamber, cylindrical in shape, with a diffuser on the lower edge. In this case, the rise of the pellets above the inlet ports must be limited by a retarding device, and the distance between the drilling bit and the well bottom must be maintained without using the elements contacting with the well bottom. The paper proposes a design of the drilling bit which meets the mentioned criteria.

Key words:

Pellet impact drilling, pellet impact drilling bit, ejector, jet device, percussion drilling.

REFERENCES

1. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, vol. 15, Iss. 3, pp. 122–129.
2. Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Pinka J., Rastsvietaiev V.O., Dmytruk O.O. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, vol. 1, pp. 11–18.
3. Ihnatov A., Koroviaka Y., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons*, 2020, vol. 230, pp. 1–14.
4. Ignatov A.O., Vyatkin S.S. *Kulestruminniy pristryi dlya burinnyya svedlovin* [Bullet jet device for drilling wells]. Patent Ukraine, 102708 no. a201107452, 2013.
5. Cheng Xiaoze, Ren Fushen, Fang Tiancheng, Chang Yulian. Experiment of rock breaking by particle-jet coupling impact. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 232–239.
6. Tiancheng Fang, Fushen Ren, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Hanxu Liu. Particle jet impact deep-rock in rotary drilling: Failure process and lab experiment. *PLoS ONE*, April 28, 2021, pp. 1–19.
7. Fushen Ren, Baojin Wang, Xiaoze Cheng, Suli Chen, Ruoxu Ma, Yang Li, Jianhua Liu. Design and experimental investigation about a simulation device for particle impact rock breaking. *International Conference on Experimental Mechanics 2014*. Singapore, 2015. Vol. 9302, pp. 1–10.
8. Lei Li, Fangxiang Wang, Tianyang Li, Xiaodong Dai, Xueyang Xing, Xiancheng Yang. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: Experimental and numerical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 185, pp. 1–12.
9. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng, Jianxun Cheng. Failure volume under particle water-jet impact in deep well drilling engineering: Mathematical modeling and verification analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, vol. 60, pp. 1839–1849.
10. Tiancheng Fang, Baojin Wang, Jianxun Cheng, Fushen Ren, Fushen Ren. Stress modeling and simulation analysis of particle impact rock-breaking. *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation*. Hefei, China, 2020. Vol. 1, pp. 4866–4881.
11. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 139, p. 103504.
12. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Study on rock-breaking depth and damage area under particle jet impact. *Shock and Vibration*, 2020, vol. 2020, pp. 1–12.
13. Fushen Ren, Tiancheng Fang, Xiaoze Cheng. Theoretical modeling and experimental study of rock-breaking depth in particle jet impact drilling process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 183, pp. 1–12.
14. Fangxiang Wang, Ruihe Wang, Weidong Zhou, Guichun Chen. Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 102, pp. 169–179.
15. Zaurbekov S.A. *Povyshenie effektivnosti prizabojnykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin*. Dis. Kand. nauk [Increasing the efficiency of bottomhole hydrodynamic processes during pellet impact drilling of wells. Cand. Diss.]. Almaty, 1995. 141 p.
16. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*, 1956, vol. 207, pp. 1–15.

17. Uvakov A.B. *Sharostruynoe burenie* [Pellet impact drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 207 p.
18. Ledgerwood L.W. Jr., Boucherlulsa F.G. *Combination pellet impact drill and annulus cutting drill*. Patent USA no. 2698736, 1955.
19. Uvakov A.B., Shtrasser V.V. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent no. 417599, 1974.
20. Zubkova T.N. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent RF no. 2114274, 1998.
21. Shtrasser V.V. *Issledovanie protsessov razrusheniya gornykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo bureniya)*. Dis. Kand. nauk [Investigation of the processes of destruction of rocks by impacts of pellets (to the theory of pellet impact drilling)]. Cand. Diss.]. Alma-Ata, 1966. 217 p.
22. Zubkova T.N. *Ustroystvo dlya sharostruynogo bureniya skvazhin* [Device for pellet impact drilling of wells]. Patent RF no. 2124620, 1999.
23. Williams P.S. *Pellet impact drilling apparatus*. Patent USA no. 2868509, 1959.
24. Orloff J.E. *Pellet impact drill bit with controlled pellet return*. Patent USA no. 2779571, 1957.
25. Williams P.S. *Combination of pellet impact drilling and rotary shot drilling*. Patent USA no. 2727727, 1955.
26. Ramsey G.H., Deily F.H. *Pellet recycle control in pellet impact drilling*. Patent USA no. 2841365, 1958.
27. Ledgerwood L.W. *Momentum pellet impact drilling apparatus*. Patent USA no. 2807442, 1957.
28. Korotkov V.P. *Sharostruyny snaryad dlya bureniya skvazhin* [Pellet impact drilling bit for drilling of wells]. Patent RF no. 939710, 1982.
29. McNatt E.M. *Controlling off-bottom position of pellet impact drill*. Patent USA no. 2728557, 1955.
30. Ledgerwood L.W. *Reverse circulation pellet impact drilling and coring apparatus*. Patent USA no. 2717761, 1955.
31. Derbenev L.S., Bogoliubov A.A., Kapustin A.A., Karkashadze G.G., Yanchenko G.A. *Sposob erozionnogo bureniya skvazhin i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Erosive well drilling method and device for its implementation]. Patent no. 870705, 1981.
32. Urnish V.V., Saruev L.A., Saruev A.L. Optimization of pellet impact drilling regimes by regulation of spacing between a drill bit and a hole bottom. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, iss. 4, pp. 162–170. In Rus.
33. Kovalev A.V., Urnish V.V., Saruev L.A., Gorbenko M.V., Ryabchikov S.Ya., Isaev E.D., Vagapov A.R., Epikhin A.V. *Sposob sharostruynogo bureniya skvazhin* [Method of pellet impact drilling of wells]. Patent RF no. 2640445, 2018.

Received: 8 April 2022.

Information about authors

Evgeniy D. Isaev, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem V. Kovalev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.