

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Г.А. Кудайкулова, ТОО «Бурмаш», Казахстан

Б.В. Федоров, Казахский национальный исследовательский технический университет им.

К.И. Сатпаева, Казахстан

В статье приведены результаты комплексного исследования по повышению производительности и эффективности бурения скважин в сложных условиях. В частности, разработаны новые конструкции алмазных импрегнированных коронок, модернизирован комплекс снаряда со съемным керноприемником (ССК) с использованием эжекторного узла, а также разработан керноориентатор «След» для взятия ориентированного керна.

Показатели геологоразведочного бурения зависят от горно-геологических условий проходки скважин, конструкции и качества применяемых технико-технологических средств (главным образом, от породоразрушающего инструмента и режима его работы).

Известно, что ССК обладают высокой эффективностью по сравнению с традиционным колонковым бурением за счет сокращения времени на спуско-подъемные операции. Вместе с тем, в сложных горно-геологических условиях, обусловленных большой абразивностью и трещиноватостью буримого массива, ведущих к самозаклиниванию керна, производительность, а в некоторых случаях, информативность ССК значительно снижается. Другими причинами уменьшения производительности являются необходимость удержания трассы скважины на правильном направлении при бурении массива, сложенного перемежающимися по твердости горным породам с крутым наклоном, а также большие затраты на взятие ориентированного керна.

Сотрудники ТОО «Бурмаш» и КазНТУ им. К.И.Сатпаева провели комплексное исследование для решения вышеупомянутых проблем.

## 1. Разработка алмазных коронок высокой стойкости

В Казахстане для разведочного бурения широко используются снаряды ССК известной фирмы «Boart Longyear». В качестве породоразрушающего инструмента используется импрегнированная алмазная коронка с «гребенчатой» (пилообразной) формой алмазосодержащего торца матрицы (рис.1).

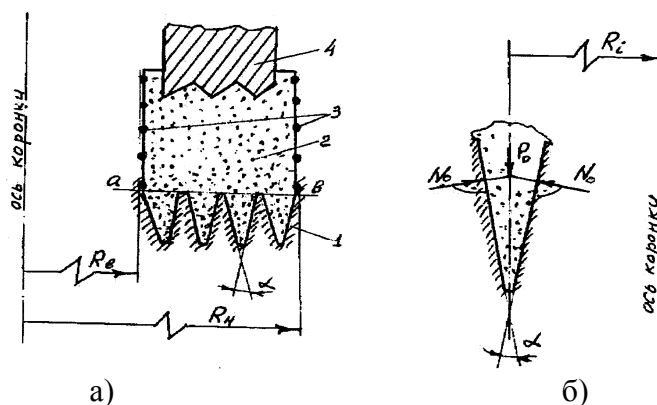


Рис. 1. Продольное сечение матрицы алмазной коронки с гребешковым профилем а – гребешковый профиль; б – силы, действующие на кольцевой клинообразный выступ профиля. 1– алмазосодержащие кольцевые конические выступы матрицы; 2– алмазосодержащая кольцевая матрица; 3 – подрезные алмазы; 4 – короночное кольцо.

Ранее нами показано [1], что скорость разрушения забоя алмазными инструментами пропорциональна силе трения, которая при «гребенчатом» профиле возрастает с уменьшением угла  $\xi$  (рис. 1 б), что подтверждается данными других исследователей [2]. При этом, необходимо, конечно, учитывать прочность закрепления алмазных зерен в клинообразных выступах торца матрицы.

Вместе с тем, известные алмазные коронки с гребенчатым профилем рабочего торца имеют существенный недостаток. Последний заключается в том, что по мере износа концентрических клинообразных алмазосодержащих выступов по плоскости а-б (на рисунке 1а), высота которых составляет 3-4 мм, инструмент работает как обычная импрегнированная коронка с плоским прямоугольным профилем торца. В результате производительность бурения снижается, что отрицательно сказывается на стойкости инструмента. Это явление неоднократно отмечалось в производственных условиях.

Для ликвидации указанного недостатка сотрудники ТОО «Бурмаш» и КазНИТУ совместно разработали и запатентовали алмазную многослойную коронку с гребенчатым профилем торца [3]. Указанная коронка изображена на рис.2.

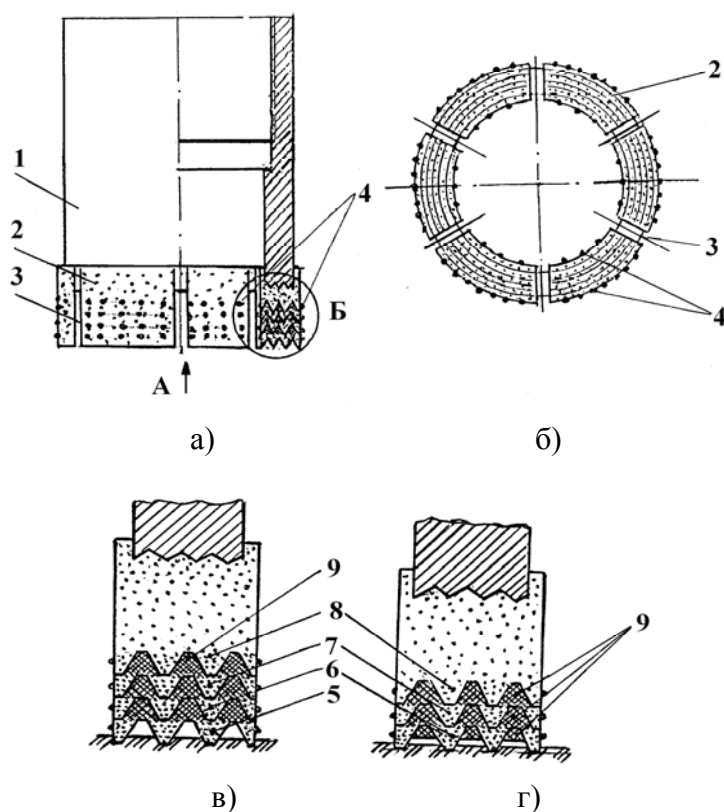


Рис. 2. Многослойная алмазная коронка с гребенчатым профилем алмазосодержащих импрегнированных слоев.

а – вид со стороны корпуса; б – вид А; в – продольный срез алмазосодержащей матрицы в увеличенном масштабе (узел Б на рис. а); г – продольный разрез матрицы после износа первого алмазного слоя. 1–корпус; 2–корпус; 3–промывочные каналы; 4–подрезные алмазы; 5, 6, 7, 8 – алмазосодержащие слои, 9 – безалмазные.

Отличительной особенностью последней является конструкция матрицы, которая содержит по высоте несколько алмазосодержащих слоев с объёмными алмазами, причем слои повторяют «гребенчатую» форму торца инструмента. Пространство между гребешками (коническими кольцевыми выступами) каждого слоя заполнено связующим материалом меньшей твёрдости, чем связующий материал алмазосодержащих слоев (рис.2 в,г). При разрушении забоя по мере износа алмазосодержащего слоя 5 (рис.2 в) в контакт с породой

вступает следующий алмазосодержащий слой  $b$  (рис.2 г). При этом связующий материал  $9$  вследствие его меньшей абразивности и твердости изнашивается быстрее, обнажая выступы алмазосодержащего слоя  $b$ , которые внедряются в породу, производя разрушение забоя.

Таким образом, использование указанной коронки позволяет реализовать преимущества «гребенчатого» профиля торца до полного износа алмазосодержащей матрицы, что повышает стойкость инструмента, а, следовательно, рейсовую скорость бурения.

Результатом дальнейшего развития работ по совершенствованию многослойных алмазных коронок с «гребенчатым» профилем торца явилось создание многослойной коронки, при использовании которой обеспечилось бы равномерное нормальное давление со стороны поверхностей всех кольцевых клинообразных выступов алмазосодержащих слоев на горную породу забоя скважины.

В результате разработана и запатентована алмазная многослойная коронка, имеющая равномерно нагруженный «гребенчатый» профиль алмазосодержащих слоев матрицы (рис.3а).

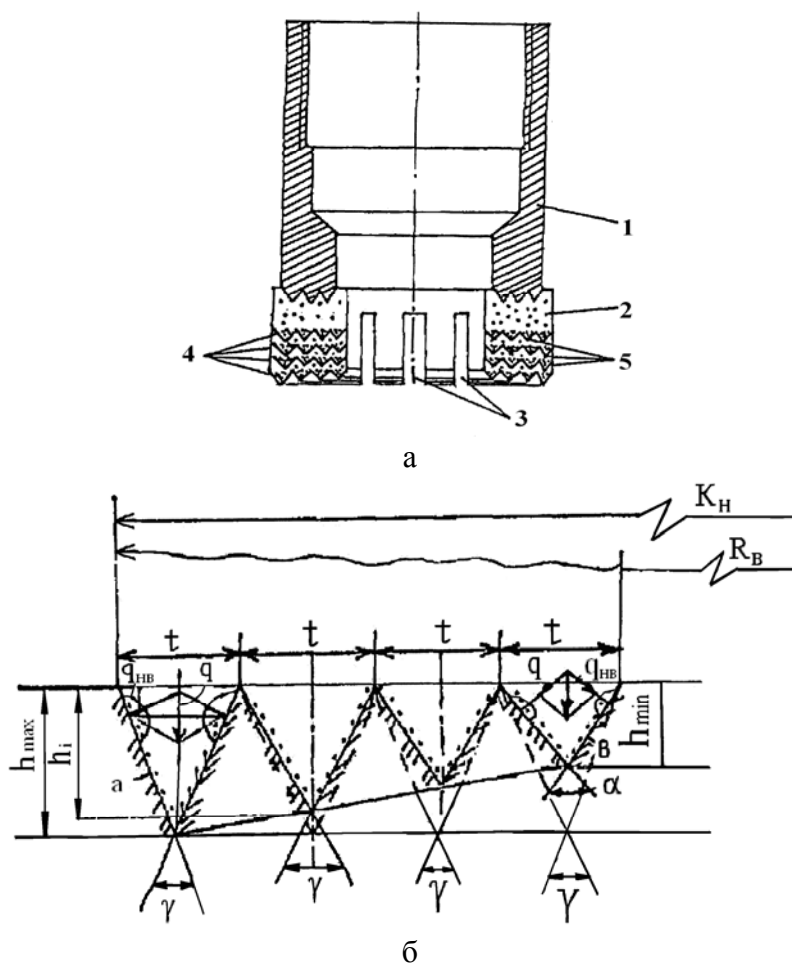


Рис. 3. Многослойная буровая коронка с равномерно нагруженными алмазосодержащими слоями

а – общий вид; б – профиль алмазосодержащего слоя в продольном сечении. 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – промывочные окна; 4 – алмазосодержащие слои; 5 – безалмазные слои.

В продольном сечении (рис.3б) указанный профиль представляет примыкающие друг к другу треугольники с равными основаниями  $t$ , но с различной высотой  $h$ . Последняя убывает в направлении от периферийного кольцевого выступа с высотой  $h_{max}$  к оси коронки в соответствии со следующей зависимостью:

$$h_t \frac{(2R_D + 0,5t)}{2R_D + (2m_f - 1) \times 0,5t} = h_{max} \quad (1)$$

Применение разработанной коронки (рис.3) обеспечит не только равномерную нагрузку на выступы алмазосодержащих слоев, но и уменьшение затрат мощности на бурение, а также экономию алмазного сырья при изготовлении алмазных инструментов.

Коронка с равнонагруженным профилем торца под маркой КСБ-2 прошла опытно-промышленные испытания на золоторудном месторождении Мизек Восточно-Казахстанской области. В таблице 1 представлены результаты испытаний коронки КСБ-2 в сравнении с коронкой «Boart Longyear».

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний алмазных буровых коронок «Boart Longyear» и КСБ-2 (диаметр бурения NQ – 76 мм).

Типы коронок	Буримая порода	Пробурено пог. метров	Средн. мех. скорость бурения, $V$ м/ч	Средне-кв. отклонение скорости, $\sigma$ , м/ч	Коэфф. вариации $V_0 = \sigma/V$	Проходка коронки	
						м	%
Boart Longyear	Андезитовый порфирит (X категория)	520	2,7	0,25	0,09	148	100
	Туф андезитовый сильно окварцованный (XI категория)	540	1,31	0,14	0,107	39	100
КСБ-2	Андезитовый порфирит (X категория)	620	2,72	0,27	0,103	186	126
	Туф андезитовый сильно окварцованный (XI категория)	615	1,36	0,15	0,12	52	133

Из приведенных в таблице данных следует, что при примерно равной механической скорости бурения испытуемых коронок проходка на коронку КСБ-2 возросла на 26-33%, что значительно повысило рейсовую скорость и производительность бурения за смену.

Вторым направлением совершенствования алмазных буровых коронок явилось использование в их конструкции особенностей механизма разрушения твердых горных пород под действием алмазных зерен. Одна из особенностей заключается в том, что в результате внедрения алмазного зерна в породу и его перемещения в ней формируются зоны: глубина внедрения зерна и глубина разрушения (т.е. область разрушенной, не удаленной породы), превышающая в твердых породах первую зону в 8-12 раз.

Эта особенность реализована в новых запатентованных технических решениях, направленных на совершенствование конструкции алмазных коронок [4,5]. Конструкция первой коронки содержит алмазосодержащую матрицу, торец которой выполнен в виде

трехзаходной винтовой поверхности. На каждом ее заходе расположено одинаковое количество секторов. Концы задних граней наиболее высоких секторов находятся в плоскости, перпендикулярной к оси коронки; разность высоты задних граней наивысших секторов и передних граней наиболее низких секторов на каждом заходе винтовой поверхности соответствует глубине разрушения при внедрении алмазных зерен, которыми оснащен торец матрицы. Предполагается, что при внедрении алмазных зерен секторы с наиболее высокими гранями формируют значительную по толщине зону разрушенной, но не удаленной породы, которая удаляется при последующем вращении инструмента. Угол подъема трехзаходной винтовой поверхности матрицы определяется по формуле:

$$\beta = \arctan (3h_p / \pi D_{cp}) \quad (2),$$

где  $3h_p$  – глубина разрушения коронки;  $D_{cp}$  – средний диаметр коронки.

В дальнейшем в соответствии с этим принципом была разработана многослойная коронка [5], матрица которой содержит по высоте чередующиеся алмазосодержащие и безалмазные слои, причем все они расположены по винтовым поверхностям соответственно торцевой поверхности матрицы.

И, наконец, последняя разработанная коронка [6] отличается от упомянутых коронок тем, что расположенные на винтовых поверхностях алмазосодержащие и безалмазные слои имеют обращенные к забою скважин «гребенчатую» форму. Это позволяет реализовывать преимущества, обусловленные рациональным профилем инструмента и особенностями механизма разрушения породы при алмазном бурении.

Алмазные коронки для бурения твердых абразивных пород выпускаются многими зарубежными фирмами. С целью определения эффективности выпускаемых буровых коронок для ССК были проведены их сравнительные испытания на Чиганак-Улькенсайском рудном поле Казахстана.

Верхняя часть разреза месторождения представлена щебнем, суглинами, корой выветривания по алевролитам, песчаникам, алевропесчаником, углерод-содержащим алевролитами, аргиллитами и базальтами. Упомянутый интервал разбуривался твердосплавными коронками. В нижней части разреза залегают твердые абразивные породы X-XII категории по буримости, представленные кремнисто-баритовой брекчией, кремнистыми породами, яшмоидами с баритом и массивными кремнями. Испытания алмазных коронок проводились при проходке этого нижнего интервала. Бурение осуществлялось диаметром 76 мм (NQ).

Испытывались коронки следующих производителей: Dimatec (США), ALFA-0,8 (Канада), UltraTerra (Канада), Voart Longyear (Канада), Терек Алмаз (Россия), Bohwa (Китай). Все коронки были импрегнированного типа, толщина матрицы – 9 мм. Параметры технологического режима бурения для всех испытываемых коронок поддерживались в интервале следующих величин:

- осевая нагрузка на коронку – 2000-2200 дан.;
- частота вращения коронки – 640-710 об/мм;
- расход промывочной жидкости (полимерной раствор) – 25-40 л/мин.

Следует отметить, что применяемый полимерный буровой раствор хорошо зарекомендовал себя в таких сложных горно-геологических условиях, как Чиганак-Улькенсайское рудное поле. Раствор готовился на основе французского реагента Flodrilл РАМ 1040, произведенного компанией SFA S.A. и представляет из себя аннионный полимер акриламида и акрилата натрия. Такие полимеры обеспечивают тиксотропное поведение бурового раствора и соответствующую вязкость, что позволило безаварийно пробурить скважины на данном месторождении. Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний алмазных буровых коронок NQ различных производителей

Производитель буровых коронок	Проходка, м	Расход коронок, шт	Средняя проходка на коронку, м	Среднеквадратичное отклонение скорости, □ м/ч	Коэффициент вариации	Стоимость коронки в USD	Эффективность использования коронок $F=C/S$
1	2	3	4	5	6	7	8
Dimatec, США	560	14	40	1,3	0,032	467	11,68
ALFA-0.8 Канада	175	6	35	1,35	0,039	533	15,23
UltraTerra, Канада	175	5	35	1,36	0,039	567	16,2
Boart Longyear, Канада	355	7	50	1,42	0,028	600	12,0
Терек Алмаз, Россия	315	7	45	1,45	0,032	433	9,62
Bohwa, Китай	150	5	30	1,33	0,044	333	11,1
КСБ-2 Терек Алмаз по патенту РК	630	10	63	1,45	0,023	433	6,87

Анализ таблицы 2 показывает, что величины выполненных среднеквадратичных отклонений  $\delta$  и коэффициентов вариации  $V = \delta/V$  свидетельствует о достоверности полученных результатов. За критерий эффективности  $F$  различных коронок принята доля их цены  $C$ , приходящая на 1 м. бурения равная:

$$F = \frac{C}{S} \quad (3),$$

причем наиболее эффективной будет применение той коронки, у которой упомянутый критерий будет минимальным.

В столбце 7 таблицы приведены цены алмазных импрегнированных коронок различных фирм-производителей (в долларах США), а в столбце 8 критерий эффективности  $F$  их применения. Анализ данных этого столбца показывает, что минимальную величину имеет критерий  $F$  при использовании импрегнированных коронок, выпускаемых фирмой «Терек-Алмаз» по патенту РК ( $F_{\min} = 6,87$  доля/м). Следовательно, при бурении твердых абразивных пород для повышения стойкости следует создавать коронки, матрица которых содержит несколько алмазосодержащих импрегнированных слоев гребенчатого профиля, разделенных безалмазными слоями меньшей твердости, причем профиль должен быть равнонагруженным в соответствии с формулой 1 и рисунком 3.

## 2. Модернизация ССК для исключения самозаклинивания керна при бурении трещиноватых пород

В результате теоретических исследований установлено [7], что при бурении ССК самозаклинивание начинается со смещения куска керна под действием собственного веса по

трещине и заканчивается тогда, когда смещенный кусок не может возвратиться в исходное положение из-за больших сил трения на контакте «кern-кern» и «кern-колонковая труба».

Установлено [7], что наиболее эффективным и достаточно простым средством смещения кусков керна является возбуждение обратного (от забоя скважины) потока бурового раствора в кернаприемнике. Для реализации этого в ССК «Boart Longyear» был встроен эжекторно-вибрационный узел (рис. 4), работа которого позволила удерживать куски керна от смещения и самозаклинивания.

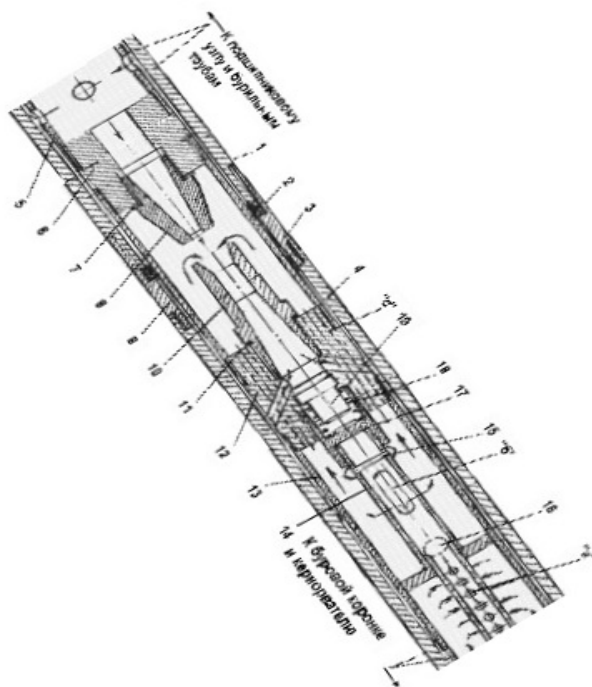


Рис. 4. Эжекторно-вибрационный узел модернизированного ССК

1 – колонковая труба; 2 – герметизатор; 3 – муфта; 4 – колонковая труба нижняя; 5 – муфта внутренняя; 6 – переходник; 7 – прокладка; 8 – сопло; 9 – ниппель; 10 – камера смещения; 11 – прокладка; 12 – переходник; 13 – кернаприемник; 14 – трубка шламовая; 15 – штифт; 16 – клапан шаровый; 17 – корпус ударника; 18 – пружина; 19 – боек; а – отверстие шламовой трубы; б – овальное отверстие; с – система продольных каналов.

Модернизированный нами ССК с эжекторно-вибрационным узлом испытывался при бурении на следующих месторождениях: Кызылшокры-Коктальское, Акбакай и Архарлы. Во всех случаях количество подъемов кернаприемника сократилось на 50-60%, а выход керна увеличился до 90-100%.

### 3. Разработанные технико-технологические средства для удержания трассы скважин по проектным направлениям

Для сохранения прямолинейности вертикальных и наклонных скважин до 500 м разработаны и запатентованы ССК повышенной жесткости [9]. Для расчета длин полуволн бурового снаряда, возникающих при бурении, предложено заменить осевую нагрузку на забой, эквивалентной длиной бурового снаряда.

Повышение жесткости достигается направлением твердосплавных швов на гребнях полуволн снаряда, причем длина упомянутых швов должна перекрывать возможное перемещение точек касания бурильной колонны со стенками скважины, вызванных изменением параметров режима бурения.

ССК повышенной жесткости был испытан при бурении скважин на месторождении Мизек, при глубине наклонных прямолинейных наклонных скважин 480-500 м., отклонение проектной точки пересечения рудного тела составила всего 0,5 м против 1 м допустимого.





После извлечения керноприемника из снаряда NQ «Boart Longyear», внутрь последнего опускается инклинометр для замера азимута и зенитного угла, а затем на канате керноориентатор. При этом игольчатые стрержни 5 должны быть максимально выдвинуты из груза 4. В таком положении концы стержней оказываются ниже клинообразного долота 9, которым оканчивается вал 2. При контакте прибора с забоем (торцом керна, который будет формироваться в процессе будущего рейса) игольчатые стержни под действием веса керноориентатора вдвигаются внутрь груза 4 до тех пор, пока долото не коснется породы (на рис. показан этот момент). Таким образом, концы игольчатых стержней и долото повторяют конфигурацию забоя (верхнего торца будущего керна). Затем, сматывая канат с барабана лебедки, наносят удар по наковальне 10 ударником 12. Ударный импульс, пройдя по валу 2, воздействует через клинообразное долото на торец керна. В результате на последнем остается след (черта), находящийся в апсидальной плоскости. Керноориентатор извлекается из скважины и осторожно укладывается в футляр таким образом, чтобы положение стержней и пики оставалось неизменным. Затем в снаряд опускается керноприемник, и скважина углубляется на величину цикла. После подъема керна на поверхность его верхний столбик подносят к выдвинутым стержням и пикам ориентатора. Путем медленного вращения образца вокруг оси добиваются контакта всех шести игольчатых стержней и пики с торцом керна. В этом положении рельеф керна повторит поверхность, на которой находятся концы стержней и пики. Поэтому риска 8 на грузе 4 укажет направление апсидальной плоскости, которое фиксируется на верхнем столбике керна маркером. Контроль правильности этой операции осуществляется по следу (черте), оставленному на торце керна клинообразным долотом. Затем, используя геолого-структурные признаки (слоистость, торцевые сколы, рельеф кусков), увязывают все столбики керна между собой и отмечают на них следы апсидальной плоскости, уже зафиксированной на верхнем столбике.

Таким образом, при использовании керноориентатора «След» положение апсидальной плоскости определяется двумя независимыми методами: сканированием рельефа торца и ударным воздействием клинообразного долота. Кроме того, необходимость использования двух методов обосновывается еще и тем, что в определенных геологических условиях один из методов нельзя использовать. Например, метод сканирования не применим, если торец керна плоский и перпендикулярен оси скважины.

Керноориентатор «След» был испытан на Васильковском месторождении Казахстана. Баланс времени при его работе аналогичен времени при использовании австралийского керноориентатора VAN RUTH PRODUCTS. Однако значительно повысилось качество пространственного ориентирования керна, благодаря двойному контролю нанесения следа апсидальной плоскости на торце выбуренного образца, сканирования рельефа и нанесения насечки ударом долота. При использовании керноориентатора «След» без затруднений были получены следы апсидальной плоскости в случаях, когда торец керна плоский и не перпендикулярен оси прибора.

#### **Выводы.**

1. Разработанные и испытанные на производстве алмазные буровые коронки, матрица которых содержит несколько импрегнированных слоев «гребенчатого» профиля, разделенных безалмазными слоями маленькой твердости, показали высокую эффективность при бурении твердых абразивных пород и при достаточном исполнении могут успешно конкурировать с лучшими мировыми образцами аналогичных буровых инструментов.

2. Следует провести опытно-конструкторские работы по созданию опытной партии буровых коронок, матрица которых содержит импрегнированные алмазные слои гребенчатого профиля, расположенные на трехзаходной винтовой поверхности (по патенту РК № 74012).

3. ССК со встроенным эжекторным узлом рекомендуется применять для ликвидации самозаклинивания керна при бурении трещиноватых пород при условии эффективной работы эжектора.

4. ССК повышенной жесткости рекомендуется использовать для бурения

прямолинейных вертикальных и наклонных скважин глубиной до 500-600 м при жестких требованиях к точности проведения их по запроектированной траектории.

5. Модернизированный керноориентатор «След» расширяет возможности его эффективного применения по сравнению с австралийским аналогом VAN RUTH PRODUCTS и рекомендуется для взятия ориентированного керна при бурении пород средней и высокой твердости.

#### Список литературы

1. Федоров Б.В., Кудайкулова Г.А. и др. Совершенствование алмазных коронок для бурения твердых абразивных пород. Сборник научных трудов. «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент. Техника и технология его изготовления и применения». Выпуск 16, Киев 2013, стр.26-31.

2. Чихоткин В.Ф. Исследование техники и технология бурения геологоразведочных скважин и разработка нового поколения алмазного породоразрушающего инструмента. М: ОАО «ВНИИОЭНГЭ», 1997, 240.

3. Предварительный патент РК № 13169, Алмазная буровая коронка. Авторы: Кудайкулов С.К., А.К. Касенов А.К., Б.В. Федоров Б.В. Бюл.№6, 2003.

4. Предварительный патент РК № 7200 кл. У21В 10/48. Алмазная буровая коронка / Федоров Б.В., Аубакиров М.Т. Оpubл. 15.02.1999, бюл.№2, 2003.

5. Предварительный патент РК № 17379 Е2110148, Алмазная буровая коронка. Авторы: Кудайкулов С.К., Касенов А.К., Федоров Б.В. Оpubл. 15.05.2006, бюл.№5.

6. Инновационный патент РК № 74012 У2110148, Алмазная буровая коронка. Авторы: Кудайкулова Г.А., Федоров Б.В., Бердыбаев И.М. Оpubл. 16.06.2012, бюл.№6.

7. Туякбаев Н.Т., Федоров Б.В.. Теория формирования и технические средства отбора керна из скважин. Алма-Ата: «Наука», 1989г. – 52 С.

8. Предварительный патент РК № 16698 Буровой колонковый снаряд. Авторы: Кудайкулов С.К., Касенов А.К., Федоров Б.В., Суворов В.А., бюл.№12, 2005.

9. Предварительный патент РК № 14120 Буровой снаряд. Авторы: Кудайкулов С.К., Касенов А.К., Федоров Б.В., Суворов В.А., бюл.№3, 2004.

10. Предварительный патент РК № 17574 Керноориентатор. Авторы: Кудайкулов С.К., Касенов А.К., Федоров Б.В., Суворов В.А., бюл.№7, 2006.