УДК 622.22

В.С.ЛИТВИНЕНКО, *д-р техн. наук, профессор, ректор, spmi@mail.wplus.net*
Н.И.ВАСИЛЬЕВ, *д-р техн. наук, профессор, spmi@mail.wplus.net*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.S.LITVINENKO, *Dr. in eng. sc., professor, rector, spmi@mail.wplus.net*
N.I.VASILYEV, *Dr. in eng. sc., professor, spmi@mail.wplus.net*
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg

РАЗРАБОТКА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ВО ЛЬДУ

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований процесса резания льда коронками резцового типа. Приведен анализ работы резца и приведены диапазоны рациональных значений углов заточки резцов и механической скорости бурения. На основе анализа бурения скважин на станции Восток и на Dom C определены причины вызывающие осложнения при бурении скважин во льду глубже 3000 м и показаны пути их преодоления.

***Ключевые слова*:** бурение, скважина, лед, резание, коронка.

ROCK-DESTROYING TOOL DEVELOPMENT FOR ICE WELL DRILLING

In this paper results of experimental studies of ice cutting process with using cutter type bits are presented. The bit operation, ranges of rational value of bit taper and rate of penetration are analysed. Reasons causing complications during drilling well in ice deeper then 3000m are determined on the basis well drilling in Vostok station and Dom C and possible ways to overcome them.

***Key words*:** Drilling, hole, ice, cutting, drill head.

Особую актуальность в эпоху нарастающего антропогенного воздействия на климат Земли имеют исследования, направленные на восстановление истории глобальных и региональных изменений природной среды нашей планеты. Уникальными архивами палеоклиматических данных являются отложения атмосферного льда, слагающие ледниковые покровы Антарктиды и Гренландии. Единственным способом получения этой информации является бурение скважин с полным отбором керна. Керны древнего льда содержат наиболее полную информацию о колебаниях температуры и давления атмосферы, об изменениях ее ветрового и циркуляционного режима, а также о вариациях газового и химического состава атмосферного воздуха в масштабах времени от десятков до сотен тысяч лет. Микробиологические и молекулярно-биологические исследования ледяного керна позволяют проследить эволюцию микробного разнообразия в слоях ледниковой толщи, которые формировались в разные эпохи климатической истории Земли.

В процессе создания технологии и технических средств для бурения скважин во льду механическим способом было выполнено большое количество экспериментальных исследований по созданию эффективного породоразрушающего инструмента и выбора оптимального сочетания параметров процесса бурения.

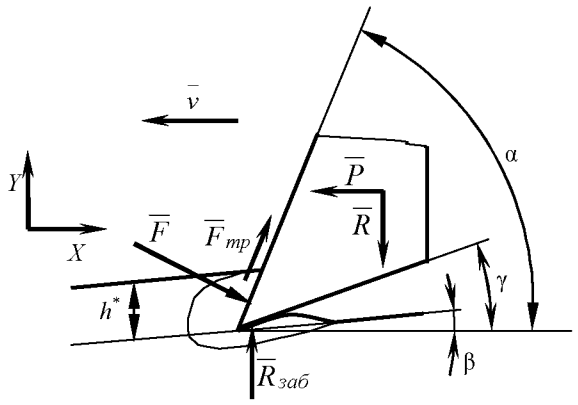


Рис.1. Схема взаимодействия резца с породой

Так как лед является неабразивной породой, с достаточной степенью точности резец можно считать абсолютно острым. При установившимся процессе, на резец будет действовать уравновешенная система сил (рис.1), состоящая из сил сопротивления перемещению резца и движущих сил. К силам сопротивления относятся: распределенная по поверхности передней грани нагрузка q, действующая со стороны срезаемого слоя на переднюю грань; сила трения $F_{тр}$ породы о переднюю грань и распределенная нагрузка q_1, действующая на заднюю грань резца. При остром резце задняя грань может контактировать с поверхностью забоя только в случае ее деформации после прохождения режущей кромки. Эти силы можно представить в виде следующих сосредоточенных сил, приложенных к резцу на среднем диаметре d_1: $\overline{F}$ – сила, приложенная перпендикулярно к передней грани, $\overline{F}_{тр}$ – сила трения, возникающая при перемещении стружки по передней грани резца, $\overline{R}_{заб}$ – вертикальная реакция забоя.

Очевидно, что при увеличении обратного угла γ большем, чем угол наклона касательной к выпуклости на поверхности забоя за режущей кромкой резца, сила $R_{заб} = 0$.

Со стороны корпуса коронки на резец действуют движущие силы: $\overline{P}$ – горизонтальная и $\overline{R}$ – вертикальная (нагрузка на забой). Горизонтальная сила $\overline{P}$ имеет очевидное направление в сторону перемещения резца или вращения коронки. Вертикальная сила $\overline{R}$ может быть направлена как вверх, так и вниз в зависимости от величин сил сопротивления и переднего угла и заднего углов резания.

Так как мы рассматриваем установившееся равномерное движение резца, сумма всех внешних сил действующих на него ровна нулю.

Таким образом,

$$\sum Y = R_{заб} + Ff\sin\alpha - F\cos\alpha - R = 0,$$

$$\sum X = F\sin\alpha + Ff\cos\alpha - P = 0,$$

отсюда

$$R = R_{заб} - F(\cos\alpha - f\sin\alpha)$$

и $P = F(\sin\alpha + f\cos\alpha)$.

Если $R_{заб} = 0$, то

$$R = -F(\cos\alpha - f\sin\alpha) \le 0,$$

а при $tg\alpha > \frac{1}{f}$ сила $\overline{R}$ направлена вверх. В случае, когда $R_{заб} \le F(\cos\alpha - f\sin\alpha)$, силы $\overline{R}$ направлена вверх, а при равенстве правой и левой частей, $\overline{R} = 0$, и реакция забоя уравновешивается вертикальной составляющей силы $\overline{F}$ при любых значениях переднего угла резания α.

При $\overline{R}_{заб} > F(\cos\alpha - f\sin\alpha)$ сила $\overline{R}$ будет направлена вниз, и, в таком случае, можно говорить о нагрузке на забой и о зависимости механической скорости бурения от нее.

Экспериментально определив силы $\overline{P}$ и $\overline{R}$, можно рассчитать значения сил сопротивления, которые зависят от геометрических характеристик резца, физико-механических свойств льда и толщины срезаемого слоя.

Согласно разработанной методике в выбранном диапазоне изменения механической скорости бурения (от 5 до 40 м/ч) был поставлен полный факторный эксперимент с

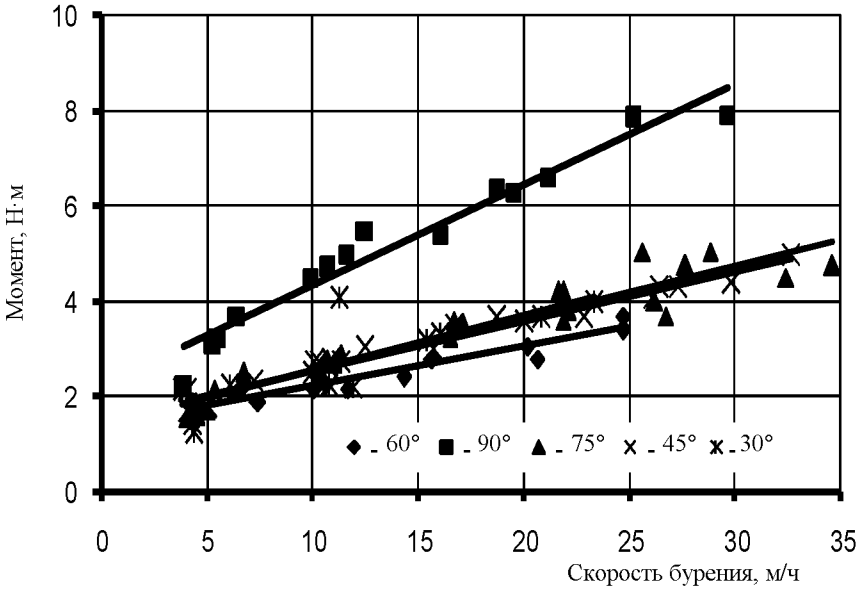


Рис.2. Экспериментальные диаграммы зависимости момента на коронке от механической скорости бурения при различных передних углах резания

целью определения взаимосвязи механической скорости бурения, момента сопротивления при резании льда, нагрузки на забой и геометрических характеристик коронок.

Во всем исследованном диапазоне изменения механической скорости при обратном угле резания $\gamma > 5^\circ$ величина осевой нагрузки была пренебрежительно мала, то есть связь между нагрузкой на забой и механической скоростью отсутствовала. При обратном угле резания $\gamma \le 3^\circ$, его величина оказывает существенное влияние на осевую нагрузку потребную для обеспечения постоянной механической скорости. При $\gamma = 2^\circ$ и осевой нагрузке 1200 Н механическая скорость бурения не превышала 5 м/ч и периодически падала до нуля, а при обратных углах резания $\gamma \le 2^\circ$ углубка не происходила, так как нагрузка на забой была ограничена весом бурового снаряда.

Результаты статистической обработки данных экспериментов указывают, что при линейной зависимости связь между моментом на коронке и механической скоростью бурения сильная и положительная (рис.2). Значения крутящего момента при передних углах резцов 30, 45 и 75° при одинаковых скоростях бурения практически совпадают во всем исследованном диапазоне изменения механической скорости бурения. Минимальные значения момент имеет при $\alpha = 60^\circ$ и максимальные – при $\alpha = 90^\circ$. Значения момента на коронке при $\alpha = 60^\circ$ примерно на 1 Нм меньше, чем при углах 30, 45, и 75°, что соответствует разности в потребляемой мощности около 20 Вт.

Удельная энергоемкость разрушения льда при бурении, как видно из графика на рис.3 находится в обратно пропорциональной зависимости от механической скорости бурения. Наибольшее влияние механическая скорость оказывает до значения 30 м/ч, а при дальнейшем ее увеличении удельная энергоемкость остается практически постоянной и равной ~2,5 МДж/м^3 при $\alpha = 60^\circ$, 3 МДж/м^3 при $\alpha = 30$; 45 и 75° и максимальной при $\alpha = 90^\circ$ (6,0 МДж/м^3).

При изменении механической скорости с 20 до 30 м/ч удельная энергоемкость для наиболее выгодной геометрической формы резцов ($\alpha = 60^\circ$ и $\gamma = 5^\circ$) уменьшается не более чем на 5 %. Таким образом, повышение механической скорости более 30 м/ч практически не даст эффекта в плане экономии энергии.

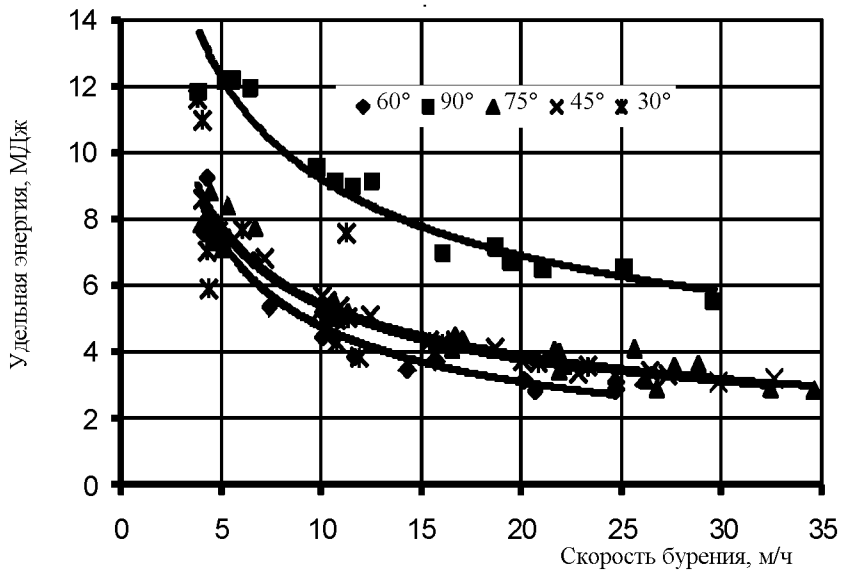


Рис.3. Экспериментальные диаграммы зависимости удельной энергии разрушения льда от механической скорости бурения при различных передних углах резания

При бурении глубоких скважин, как в Антарктиде, так и в Гренландии исследователи всех стран столкнулись с серьезными осложнениями на глубинах свыше 2500 м, а на глубинах свыше 3000 м осложнения становились столь значительными, что бурение практически останавливалось.

На рисунках 4 и 5 представлены диаграммы рейсовой проходки при бурении скважин на Dom C по европейской программе EPICA* и 5Г на станции Восток соответственно. Из графика на рис.4 видно, что незначительное снижение рейсовой проходки началось уже при достижении глубин свыше 2500 м, затем с ростом глубины рейсовая проходка начала резко снижаться, а после достижения 3000 м бурение практически остановилось.

Основные факторы, влияющие на процесс работы бурового снаряда на забое:

• геометрические характеристики резцов;

• скорость вращения буровой коронки (скорость резания);

• внедрение резцов в лед (толщина снимаемой стружки);

• конструкция фильтров и каналов для выноса шлама;

• параметры насоса, создающего призабойную циркуляцию заливочной жидкости;

• физико-механические свойства льда.

На график рейсовой проходки скважины 5Г, представленном на рис.5, наложен график изменения размеров кристаллов льда** в зависимости от глубины. Видна четкая корреляция величины рейсовой проходки и размеров кристаллов. При увеличении размеров кристаллов рейсовая проходка падает, а ниже 3000 м в этих случаях отмечаются многочисленные остановки бурения. С глубины примерно 3480 м размеры кристаллов льда начинают превышать 20 мм, и в бурении наметилась тенденция к полному прекращению процесса углубки. Изменения, внесенные в конструкцию коронки и фильтров шламосборника, позволили стабилизировать процесс, но тенденция к сокращению рейсовой проходки сохранилась. Таким образом, основной причиной возникновения осложнений является изменение физико-механических свойств льда при неизменной конструкции буровых снарядов.

* *Augustin L.* EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results / L.Augustin, S.Panichi, F.Frascati // Annals of Glaciology. 2007. Vol.47. P.10-23.

** *Kudryashov B.*B. KEMS-112 electromechanical ice core drill / B.B.Kudryashov, N.I.Vasiliev, P.G.Talalay // Mem. Natl. Inst. Polar Res., 49, Special Issue. 1994. P.138-152.

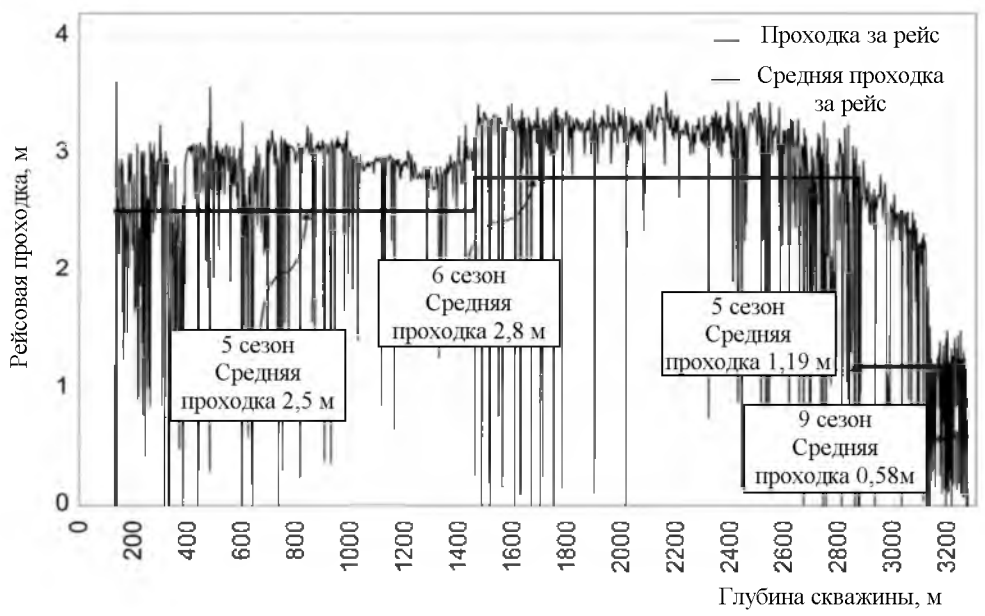


Рис.4. График рейсовой проходки при бурении скважины на станции Dom C по европейской программе EPICA

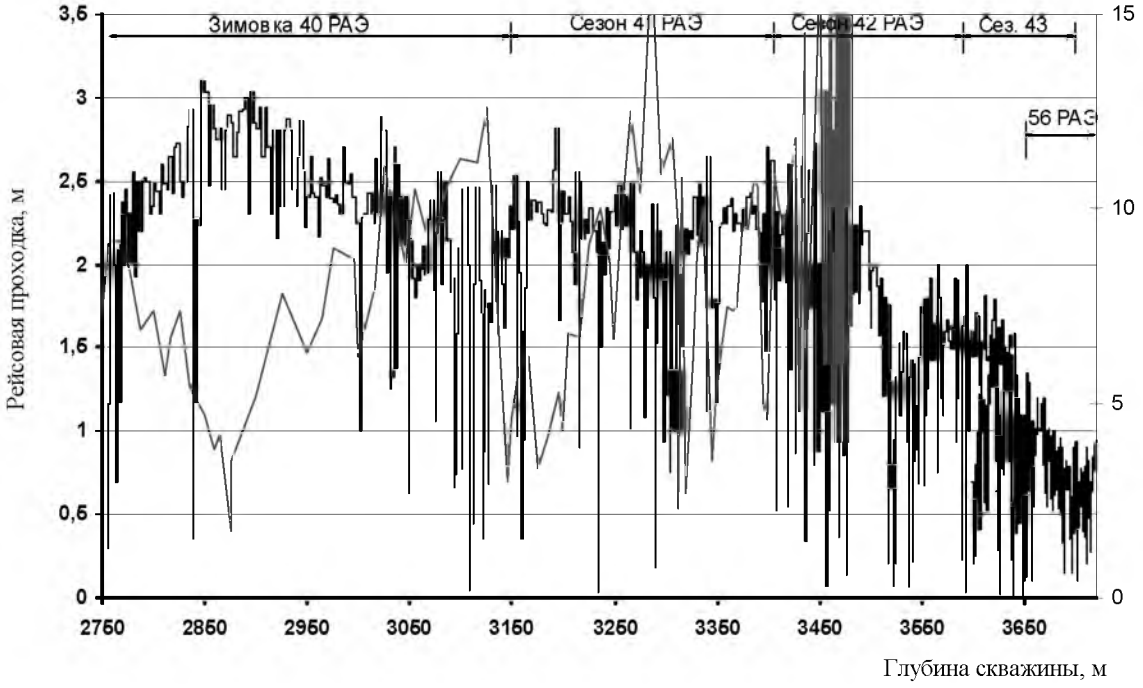


Рис.5. Результаты бурения скважины 5Г-1 механическим способом

Процесс образования частиц шлама различен при резании монокристаллов льда и поликристаллического массива, состоящего из мелких кристаллов (до 5 мм). При бурении поликристаллического льда шлам состоит в основном из частиц, размеры которых превышают 1-2 мм даже при механической скорости бурения менее 5 м/ч. При резании монокристаллов шлам состоит из частиц менее 0,5 мм с большим количеством

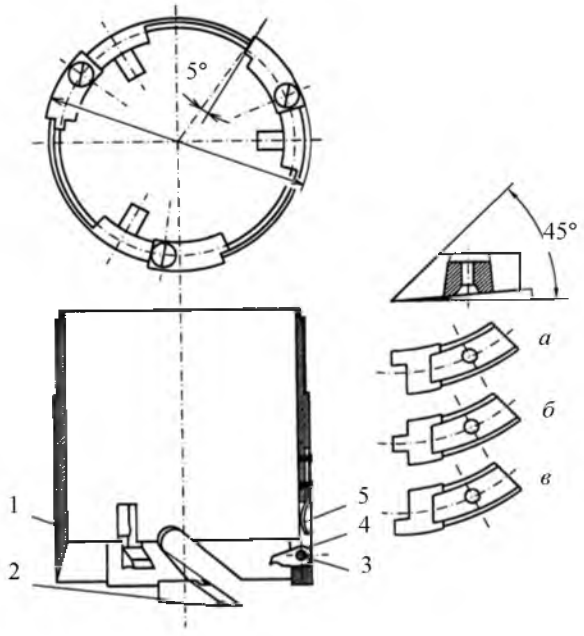


Рис.6. Буровая коронка

мелкодисперсных фракций. Попадая в фильтр, мелкодисперсный шлам образует слой на сетке фильтра, который даже при незначительной толщине создает большие сопротивления для потока заливочной жидкости. Это приводит к снижению расхода жидкости, что в свою очередь способствует образованию шламовых пробок у резцов и остановке бурения при незначительной проходке.

Процесс образования шламовых пробок усугубляется тем, что лед имеет высокую температуру и при большой свободной поверхности частиц шлама, на котором должна быть пленка воды, обладает большой способностью к слипанию.

Самым важным фактором, влияющим на величину рейсовой проходки, является средняя крупность шлама. Чем мельче шлам, тем большие гидравлические сопротивления в циркуляционной системе.

Крупность шлама зависит от толщины срезаемого слоя за один оборот коронки, при трехрезцовой коронке каждый резец срезает треть этого слоя. Толщина, срезаемая за один оборот, зависит от механической скорости бурения и от числа оборотов коронки.

Для интенсификации процесса бурения были внесены изменения в конструкцию коронки. Данная коронка (рис.6) представляет собой объединение трех однорезцовых коронок. Каждый резец формирует свой забой, ширина которого составляет 1/3 от ширины общего кольцевого забоя. Толщина срезаемого слоя в три зраза больше чем у обычных резцов, что влечет за собой увеличение крупности шлама.

Увеличение крупности шлама способствует значительному снижению гидравлических сопротивлений в фильтре шламосборника и увеличению объема шлама, собираемого в фильтре за рейс. Таким образом, это позволяет существенно повысить рейсовую проходку. Кроме того, более крупный шлам обладает меньшей суммарной боковой поверхностью, что уменьшает риск слипания частиц шлама, особенно на глубинах более 3000 м, где лед имеет относительно высокую температуру.

Оценивая результаты скважины 5Г можно констатировать, что задача разработки режущего инструмента для бурения скважин во льду на глубинах свыше 3000 м решена. Достигнутые показатели процесса бурения значительно превышают результаты, полученные зарубежными специалистами в подобных условиях, но на меньших глубинах. Процесс бурения был управляем и безопасен.

Использование данной коронки данной конструкции во многом определило успешное завершение бурения скважины 5Г на станции Восток на глубине 3769,3 м, и вскрытие подледникового озера Восток.