

Н.И.ВАСИЛЬЕВ, П.Г.ТАЛАЙ, В.М.ЗУБКОВ,
А.В. КРАСИЛЕВ, М.В.ЗУБКОВ
Санкт-Петербургский государственный
горный институт (технический университет)

ЛИКВИДАЦИЯ ОСЛОЖНЕНИЙ И АВАРИЙ ПРИ БУРЕНИИ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН В ЛЕДНИКАХ

Анализ современного состояния технологии бурения скважин в ледниках свидетельствует о высокой аварийности при проходке глубоких горизонтов ледниковых покровов, для которых характерно увеличение размеров кристаллов и наличие температур, близких к точке плавления льда под давлением. Общепринятых рекомендаций по выбору рациональных параметров бурения такого льда на сегодняшний момент не существует. Недостаточная надежность процесса бурения нередко приводила к тяжелым авариям в скважине – прихватам буровых снарядов. Эффективная ликвидация прихватов обеспечивается растворением льда в аварийной зоне путем доставки в эту зону органического растворителя, активного ко льду, например, этиленгликоля или его водного раствора.

In spite of the certain success in ice drilling technology, there are enough accident examples of the deep coring in so-called warm ice, which is characterized by the increasing of ice crystals and has temperatures closed to the pressure melting point. The generally accepted recommendations for choosing of rational drilling parameters in such ice don't exist. The low reliability of the drilling process as often as not resulted to the one of the most severe accident in the hole – sticking of the core drills. The effective accident elimination is possible due to the ice dissolving in the sticking zone by the delivery in this zone of the solvent active to ice, for example, ethylene glycol or its aqueous solution.

На глубоких горизонтах ледников при механическом вращательном бурении так называемого «теплого» льда с температурой, близкой температуре плавления, нередко возникают осложнения, заключающиеся в налипании ледяного шлама на поверхность породоразрушающего инструмента и колонковой трубы с последующим защламованием призабойной зоны и резким возрастанием уровня мощности на электроприводе снаряда. Как правило, на таких глубинах процесс углубки скважин практически останавливается. Несвоевременное прекращение рейса приводит к наиболее тяжелой по последствиям аварии – прихвату бурового снаряда в скважине. Мероприятия по ликвидации подобных аварий крайне трудоемки и не всегда приводят к положительному результату.

В работе [4] утверждается, что основной причиной протаивания льда при механическом вращательном бурении является

снижение точки плавления за счет оказываемого резцами давления. В действительности давление резцов породоразрушающего инструмента в зоне контакта с забоем скважины составляет 1-2 МПа, что приводит к снижению температуры плавления на 0,07-0,14 °С и является явно недостаточным для протаивания льда.

По нашему мнению, основными причинами слипания частиц шлама и образования сальников при бурении «теплого» льда являются, во-первых, изменения физико-механических свойств льда при температурах, близких к точке плавления, и, во-вторых, теплота, связанная с разрушением льда на забое скважины и трением шлама при его транспортировании.

Теория возникновения на поверхности льда тонкой квазижидкой пленки построена Н.Флетчером на основе термодинамического моделирования структуры поверхности льда с упорядоченным расположением ди-

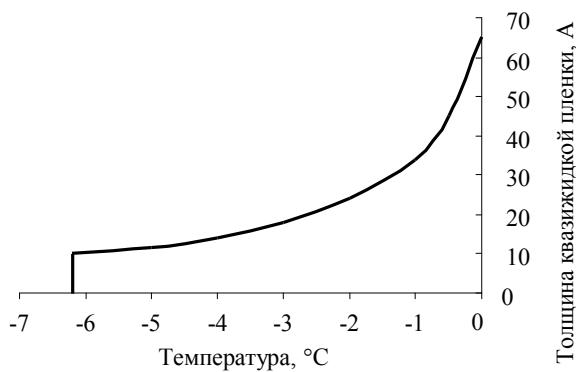


Рис.1. Зависимость толщины квазижидкой пленки на поверхности льда от температуры при атмосферном давлении [5]

польных молекул воды [5]. Как следует из этой теории, квазижидкий слой возникает на поверхности льда практически мгновенно при температуре примерно $-6,2^{\circ}\text{C}$, и его толщина резко возрастает при приближении к точке плавления (рис.1).

Представление о подобной структуре поверхности льда было подтверждено и экспериментально в результате исследования дифракции рентгеновских лучей и ядерного магнитного резонанса на поверхности льда [2]. Образование на поверхности льда квазижидкого водяного слоя приводят к увеличению его адгезионных свойств и появлению способности к быстрому взаимно-

му слипанию частиц ледяного шлама, образованию ледяных пробок и сальников на поверхности бурового оборудования.

Другой причиной, усиливающей эффект протаивания льда, является резкое изменение структуры льда на глубоких горизонтах ледников. Поликристаллический лед с размерами кристаллов от первых миллиметров до первых сантиметров, характерный для верхней толщи ледника, на глубоких горизонтах ледников сменяется моно-кристаллическим льдом, имеющим размер кристаллов 1 м и более. Изменение структуры льда вызывает увеличение усилий, необходимых для его разрушения, и изменение формы и крупности шлама.

На рис.2 представлен график рейсовой проходки при бурении скважины 5Г-1 на станции Восток (Антарктида), на который наложено изменение размеров кристаллов льда в зависимости от глубины [1]. Видна устойчивая корреляция между рейсовой проходкой и размерами кристаллов. При увеличении размеров кристаллов рейсовая проходка падает, а ниже 3000 м отмечаются многочисленные остановки бурения. С глубины примерно 3480 м размеры кристаллов льда начинают превышать 20 мм, и в бурении намечается тенденция к полному прекращению процесса углубки. Изменения,

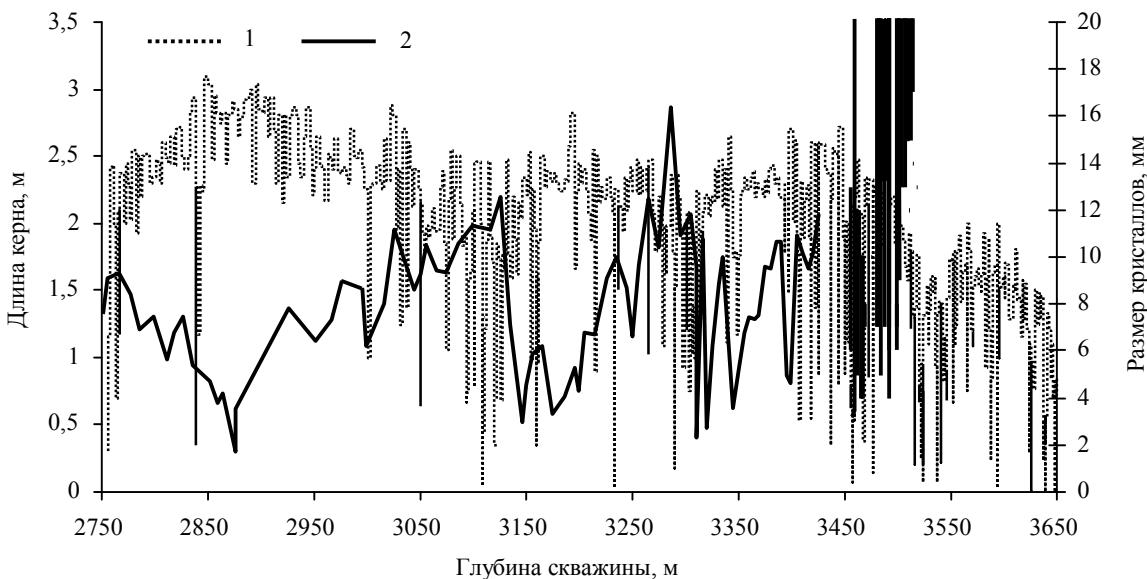


Рис.2. Зависимость изменения рейсовой проходки (1) и размеров кристаллов (2) льда по глубине скважины 5Г-1 на станции Восток (Антарктида)

внесенные в конструкцию коронки и фильтров шламосборника, позволили продолжить проходку, но тенденция к сокращению рейсовой проходки сохранилась.

Процесс образования частиц шлама различен при резании монокристаллов льда и поликристаллического массива, состоящего из мелких кристаллов (до 5 мм). Шлам при бурении поликристаллического льда состоит в основном из частиц размерами более 1-2 мм. Шлам при резании крупных монокристаллов льда состоит из частиц размерами меньше 0,5 мм с большим количеством мелкодисперсных фракций. Попадая в фильтр, мелкодисперсный шлам образует слой на сетке фильтра, который даже при незначительной толщине создает большие сопротивления для потока промывочной жидкости. Это приводит к снижению расхода жидкости, что, в свою очередь, способствует образованию шламовых пробок у резцов и остановке бурения.

И, наконец, еще одной причиной протягивания частиц шлама и образования сальников является теплота, выделяющаяся при разрушении льда на забое скважины. Допуская, что основным тепловым источником при механическом разрушении льда резанием является теплота трения и что вся работа сил трения переходит в тепло, которое выделяется по контактной площадке резца с отделяемым элементом, теоретически доказана возможность проплавления отделяемых частиц льда, имеющего температуру в естественном залегании, близкую температуре его плавления [3].

Образование кусков льда, размеры которых больше, чем проходные сечения между керном и внутренней поверхностью колонковой трубы, также влияет на стабильность процесса бурения. Куски мелкокристаллического льда, периодически остающиеся в районе забоя при срыве керна, легко дробятся при контакте с резцами коронки и, как правило, не вызывают осложнений при удалении с забоя. Для дробления куска состоящего из монокристаллов, которые стали появляться на глубинах выше 3000 м, требуется значительно большее силовое воздействие.



Рис.3. Шламовая пробка у резца буровой коронки

Куски льда, попадающие в зону резца и имеющие размеры, превышающие размер проходного сечения, способствуют образованию шламовых пробок, что приводит к остановке бурения (рис.3). При этом циркуляция жидкости не прекращается, так как у остальных резцов проходные сечения остаются свободными. При подобном сценарии протекания процесса остановка бурения неизбежна на первых 50-100 мм и этим может быть объяснено прекращение бурения в рейсах из-за невозможности внедрения резцов в забой скважины.

При наличии большого свободного пространства между резцами куски льда могут иметь весьма значительные размеры, и внедрения резцов в забой не произойдет даже при нагрузке на забой, равной весу бурового снаряда (рис.4, а). Для ограничения размеров кусков необходимо иметь между резцами экран, который будет препятствовать возникновению такой ситуации. Размер A между режущей кромкой резца и торцом экрана должен быть меньше, чем размер зазора между керном и внутренней поверхностью колонковой трубы. Разрушение кусков льда будет происходить за счет срезания, как показано на рис.4, б, в, г, д. При этом возможно срезание пластинок льда шириной равной ширине резца при толщине в несколько миллиметров. Такие пластинки неоднократно находились в шламе или в шла-

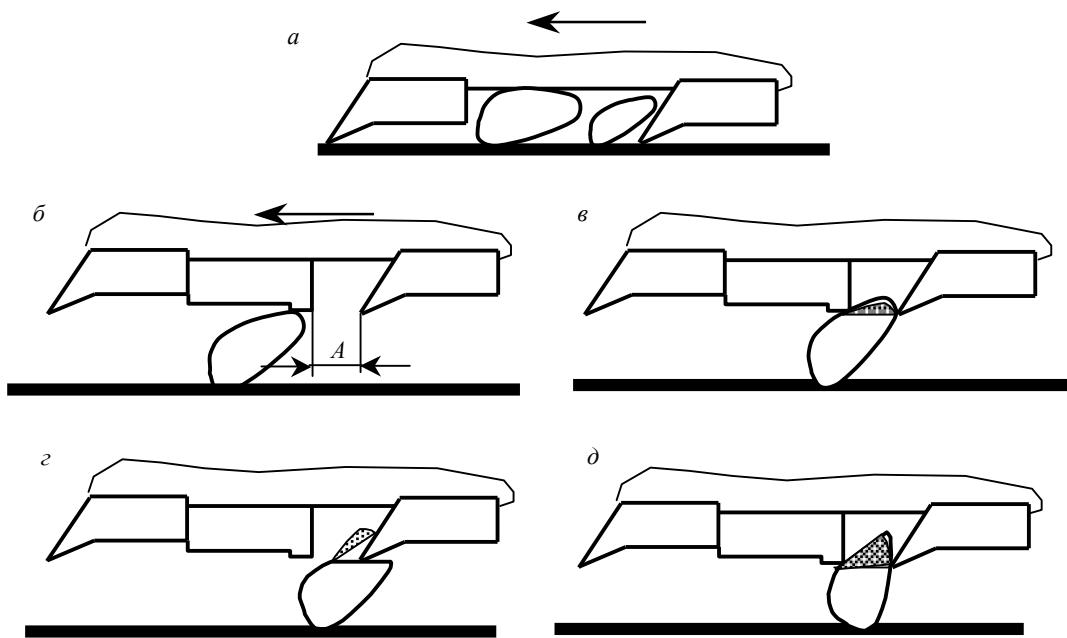


Рис.4. Схема взаимодействия резца с кусками льда на забое скважины

мовых пробках у резцов. Избежать образования широких пластинок удалось, сделав с нижней стороны резцов торцевые канавки (рис.5).

Эффективность бурения «теплого» льда зависит не только от разработки средств и методов предупреждения возникновения осложнений и аварий, направленных на нейтрализацию тепловых потоков, возникающих в зоне разрушения и снижение адгезии между поверхностями бурового инструмента и ледяного шлама, но и от создания

надежной и безопасной технологии ликвидации прихватов. Для этого предложено доставлять в зону прихвата органические соединения – этиленгликоль и его водные растворы, способные интенсивно растворять лед при отрицательных температурах [6].

Этиленгликоль относится к классу двухатомных спиртов и представляет собой вязкую бесцветную жидкость, используемую в качестве растворителя, пластификатора и компонента антифризов. Этиленгликоль смешивается с водой в любых соотношениях. Основные свойства этиленгликоля:

Химическая формула	$C_2H_4(OH)_2$
Плотность (при температуре 20 °C), кг/м ³	1115,5
Динамическая вязкость (при температуре 20 °C), МПа·с	19,9
Температура плавления, °C	-12,6
Температура кипения, °C	197,8
Температура вспышки, °C	111
Температура самовоспламенения, °C	400

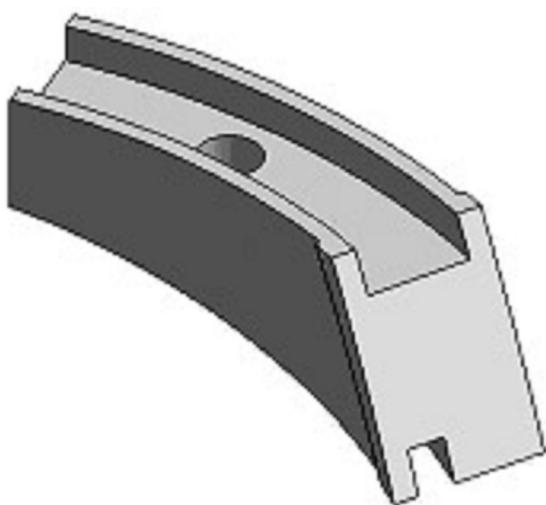


Рис.5. Резец буровой коронки

Для ликвидации прихватов могут быть использованы охлаждающие жидкости на основе этиленгликоля типа тосол, например, тосол А-40М или тосол А-65М. В состав тосола А-40М входят 52,6 % этиленгликоля, 47,4 % воды и не менее семи присадок, обеспечивающих такие важные свойства

охлаждающей жидкости, как сохранение текучести при низких температурах, нейтральное воздействие на материалы системы охлаждения, сохранение технической стабильности при эксплуатации и хранении и др.

Тосол А-65М обладает пониженной температурой замерзания и предназначен для использования в регионах с низкими температурами. В его состав дополнительно введены одноатомные спирты (также активные по отношению ко льду), в частности – метанол.

Кинетика разрушения в агрессивных ко льду жидкостях весьма сложна и мало изучена. Для оценки скорости растворения льда в этиленгликоле и его водном растворе предварительно взвешенные образцы помещались на определенное время в охлажденную жидкость и тщательно взвешивались после взаимодействия. Интенсивность растворения оценивалась скоростью изменения массы льда в единицу времени. В результате экспериментальных исследований было установлено, что скорость таяния льда в этиленгликоле и его водном растворе зависит от концентрации растворителя, а также температуры растворителя и льда:

Тип жидкости	Водный раствор этиленгликоля	Этиленгликоль
Концентрация, % по массе	11	100
Температура, °С	-2,5	-11
Длительность воздействия, ч	0,5	1,75
Скорость разрушения, г/ч	1,0	12,5

Растворение льда происходит вплоть до образования раствора равновесной концентрации, при которой система находится в состоянии термодинамического равновесия. Равновесная концентрация равна массовому содержанию этиленгликоля при температуре его замерзания. Сначала, при увеличении концентрации, температура замерзания водного раствора этиленгликоля падает, достигая минимума -52°C при 62 % по массе, а затем наблюдается рост температуры замерзания до $-12,6^{\circ}\text{C}$ для чистого этиленгликоля (рис.6).

В интервале от 0 до 62 % по массе равновесная концентрация этиленгликоля зависит от температуры следующим образом:

$$\tilde{N}_{\delta} = -6,0 \cdot 10^{-4} t^3 - 6,21 \cdot 10^{-2} t^2 - 2,78t. \quad (1)$$

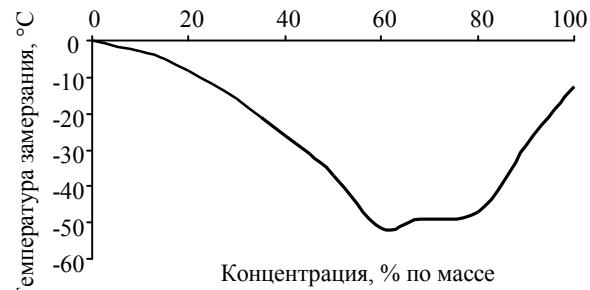


Рис.6. Зависимость температуры замерзания водного раствора этиленгликоля от его концентрации [7]

Зная температуру льда в районе аварийного снаряда, можно рассчитать равновесную концентрацию этиленгликоля и далее оценить количество реагента m_{δ} , необходимое для растворения льда массой m_{λ} ,

$$m_{\delta} = \frac{C_{\delta} m_{\lambda}}{0,01 C_{\delta} (100 - C_{\delta})}. \quad (2)$$

где C_{δ} – концентрация раствора этиленгликоля, планируемого для использования при ликвидации прихвата, % по массе.

При работе с этиленгликолем следует иметь в виду, что он является высокотоксичным тератогенным соединением. Предельно допустимая концентрация паров этиленгликоля в воздухе рабочей зоны крайне низка ($\text{ПДК}_{\text{рз}} = 0,1 \text{ мг}/\text{м}^3$). Даже при незначительном превышении пороговой концентрации пары этиленгликоля вызывают головные боли, тошноту, общую анестезию, нарушение дыхания, при увеличении дозы происходят необратимые изменения печени и почек. Попадание этиленгликоля на кожный покров и слизистую оболочку глаз приводит к серьезным раздражениям. Все это накладывает особые требования к соблюдению правил производственной санитарии при ликвидации аварий с применением этиленгликоля или его водных растворов.

Плотность водных растворов этиленгликоля зависит от температуры и концентрации антифриза, при этом плотность увеличивается с ростом концентрации этиленгликоля (табл.1). В любом случае чистый этиленгликоль или его водный раствор «тяжелее» промывочной жидкости, плотность которой поддерживается, как правило, в пределах $920\text{--}950 \text{ кг}/\text{м}^3$, и, следовательно,

Таблица 1

Плотность водных растворов этиленгликоля от температуры [7]

Температура, °C	Концентрация, % масс.										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-45,6	-	-	-	-	-	-	1110	1125	1137	-	-
-40,0	-	-	-	-	-	-	1108	1122	1134	-	-
-34,4	-	-	-	-	-	1087	1105	1120	1131	-	-
-28,9	-	-	-	-	-	1086	1103	1117	1128	1138	-
-23,3	-	-	-	-	1068	1084	1100	1114	1125	1135	-
-17,8	-	-	-	-	1066	1082	1097	1111	1122	1131	-
-12,2	-	-	-	1048	1064	1080	1095	1107	1118	1128	1136
-6,7	-	-	1031	1147	1063	1077	1092	1104	1115	1124	1132
-1,1	-	1015	1030	1045	1061	1075	1089	1101	1111	1121	1128
4,4	1000	1014	1029	1044	1059	1073	1086	1098	1108	1117	1124
10,0	1000	1013	1027	1042	1056	1070	1083	1094	1105	1113	1120
15,6	999	1012	1026	1040	1054	1067	1080	1091	1101	1109	1116
21,1	998	1011	1024	1038	1051	1064	1076	1087	1097	1105	1113

Таблица 2

Ликвидированные прихваты буровых снарядов

Скважина	Дата аварии	Аварийная глубина, м	Масса этиленгликоля, опущенного в скважину, кг	Общее время ликвидации аварии
NGRIP-2, Гренландия	15/07/00	2931	150* + 6,0	5 суток
	02/07/01	2984	5,0	7 ч
	04/07/01	2987	2,5	7 ч
	08/07/01	2994	4,5	14 ч
	27/07/01	3000	4,0	19 ч
	03/07/04	3015	1,7	8 ч
EDC-2 (Купол С), Антарктида	21/12/04	3270	2,0	8 ч
5Г-1 («Восток»), Антарктида	13/01/07	3658	80*	25 суток

* Охлаждающая жидкость типа тосол ($C_9 \approx 62\%$).

под действием силы тяжести будет опускаться к забою скважины.

Доставка этиленгликоля к аварийному снаряду при помощи желонок, как правило, невозможна, так как в момент аварии в скважине находится грузонесущий кабель. Как показали экспериментальные работы по ликвидации прихвата бурового снаряда в глубокой скважине NGRIP-2 (Гренландия) в 2000 г., заливка в скважину водного раствора этиленгликоля с поверхности оказалось малоэффективной. На пути к аварийному снаряду произошло растворение стенок скважины и полное разубоживание раствора.

Для доставки растворителя в аварийную зону предложено замораживать его на поверхности в виде таблеток и затем опускать в скважину. Основная часть разреза скважины имеет температуру ниже температуры плавления этиленгликоля, что предохраняет его от растепления на пути к аварийному снаряду. Попав на верхнюю часть бурового снаряда, где температура выше температуры плавления этиленгликоля, он расплывается и стекает вниз, растворяя лед непосредственно в зоне прихвата.

Предложенная технология ликвидации прихватов буровых снарядов была неоднократно использована при бурении глубоких скважин в Антарктиде и Гренландии (табл.2).

При продолжении бурения в скважине 5Г-1 на станции «Восток» в сезоне 52-й Российской антарктической экспедиции (январь 2007) на глубине 3658 м возникла аварийная ситуация. При срыве керна произошел прихват снаряда на забое скважины, при натяжении грузонесущего кабеля он был вырван из заделки кабельного замка снаряда. Вытяжка кабеля могла быть принята за перемещение бурового снаряда вверх, что привело к приложению недопустимо большого усилия к кабелю. Кроме того, могла оказаться усталость металла проволок брони грузонесущего кабеля.

Для извлечения снаряда была разработана и изготовлена специальная ловильная пика (рис.7, а). Нижняя часть ловильной пики представляет собой стержень с поперечным окном, в котором на оси закреплена собачка. Под действием пружины собачка поворачивается поперек стержня и удерживается во взвешенном состоянии внутри стержня подпружиненной втулкой. Нижний конец стержня выполнен конусным, а верхний конец – жестко закреплен в корпусе, играющим роль центратора.

При посадке на аварийный буровой снаряд центратор входит в верхнюю шламовую трубу, центрируя устройство относительно снаряда. При дальнейшем продвижении вниз стержень входит в отверстие кабельного замка, подпружиненная втулка перемещается относительно стержня и освобождает собачку, которая поворачивается поперек стержня (рис.7, б).

Для извлечения аварийного снаряда из скважины в призабойную часть скважины при помощи желонки было доставлено 80 л тосола, чтобы заполнить интервал на высоту 8 м от забоя. Затем в скважину была опущена ловильная пика и буровой снаряд был извлечен с первой попытки. Таким образом, использование активных по отношению к льду реагентов, например, этиленгликоля является надежным и эффективным способом ликвидации прихватов электромеханических снарядов в скважине.

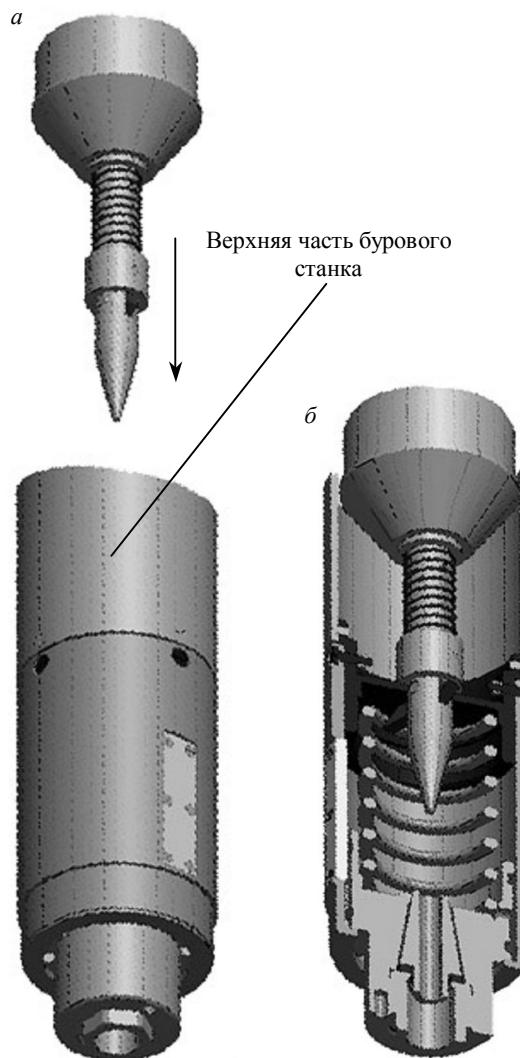


Рис.7. Схема работы ловильной пики

ЛИТЕРАТУРА

1. Липенков В.Я. История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток / В.Я.Липенков, Н.И.Барков, А.Н.Саламатин // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып.72. С.197-236.
2. Маэно Н. Наука о льде. М.: Мир, 1988. 231 с.
3. Талалай П.Г. Тепловой режим разрушения льда резанием // Записки Горного института. 2001. Т.148. Часть 2. С.169-174.
4. Bjornsson H. Freezing on a rotary drill in temperate glacier ice // Johull. 1973. Vol.23. P.53-54.
5. Fletcher N.H. The chemical physics of ice. Cambridge Univ. Press, 1970. 271 p.
6. Gundestrup N.S., Johnsen S.J., Hansen S.B., Shoji H., Talalay P., Wilhelms F. Sticking of core drills: Why and how to recover // Memoirs of National Institute of Polar Research (Japan). 2002. Vol.56. P.181-195.
7. Industrial Solvents Handbook / 4th Ed. Park Ridge, New Jersey, USA, 1991. 930 p.