И.Г.ШЕЛКОВНИКОВ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

О МЕХАНИЧЕСКОМ БУРЕНИИ ЛЬДА

Бурение ледяного покрова в различных районах земного шара, и, прежде всего, в Антарктиде и Гренландии, привлекает научную общественность главным образом возможностью по минеральным и биологическим включениям изучать историю развития Земли. Большие толщи льда, накапливающиеся за многие тысячелетия, консервируют в себе включения, по которым можно судить, в частности, о возможных катаклизмах на планете в различные периоды ее жизни, микробиологических и других изменениях в ее развитии. Такими включениями могут быть минеральные пылевые частицы, микроорганизмы в различных их формах, споры растений, содержащиеся в буровом ледяном керне, поднимаемом с различных глубин скважин. Такие скважины проходятся или путем проплавления льда кольцевым нагревательным снарядом, внутри которого остается столбик керна льда, или механическим вращательным способом, при котором разрушение льда происходит режущим забойным инструментом в форме лопастного сверла с центральным отверстием для прохода керна (рис.1). Остановимся подробнее на механизме разрушения льда при бурении этим способом.

Анализ сводится к определению наиболее целесообразной геометрической формы лезвия лопасти – угла заточки α (рис.2), влияния затупления лезвия с образованием угла затупления β, оценке механизма разрушения льда при режимах резания и скалывания льда и выбора

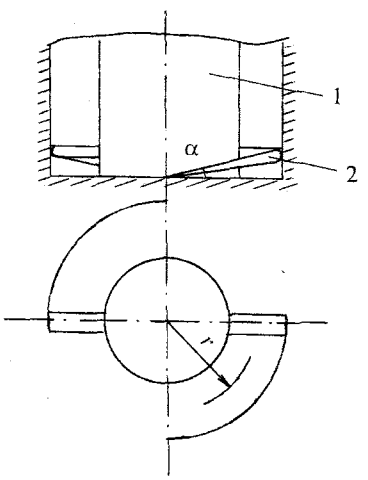


Рис.1. Схема лопастного сверла для выбуривания ледяного керна
1 – керноприемная труба; 2 – лопасти с режущими лезвиями

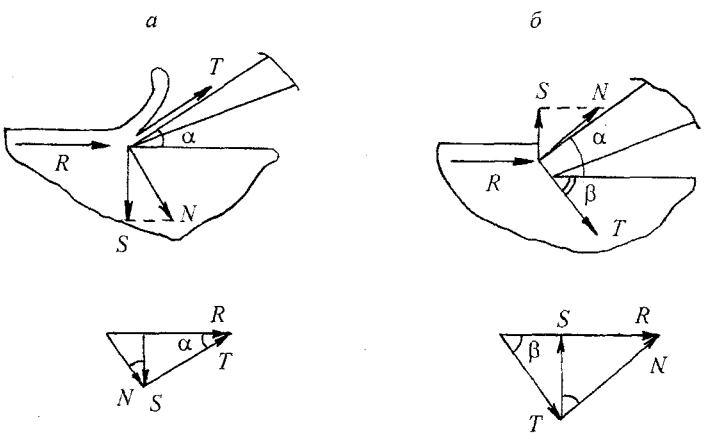


Рис.2. Схемы нагружения острого (*а*) и затупленного (*б*) лезвий при бурении льда

способа (условий) управления процессом механического бурения льда для получения оптимальных результатов.

Лезвие лопасти сверла (их два, рис.1) представляет собой остро заточенный клин, расположенный относительно плоскости забоя под углом заточки α. Это угол между плоскостями верхней грани лезвия и забоя. При вращении сверла лезвие врезается в лед и начинается его разрушение. Ниже рассматривается механизм разрушения, который может быть механизмом как резания, так и скалывания льда. При этом особую роль играет осевая нагрузка, которая может совпадать с направлением забоя или быть ему противоположной, в зависимости от того, острое лезвие или затупленное. В первом случае нагрузка действует на лопасти моментом по часовой стрелке, во втором – против.

При резании льда острым лезвием производная S от составляющей N реакции R направлена вниз (рис.2, *а*). Для своей компенсации она требует обратной осевой нагрузки, т.е. сдерживания подачи ровно настолько, чтобы толщина стружки соответствовала полной загрузке сверла. В случае бурения скалыванием льда (в частности, затупившимся лезвием) вектор S направлен вверх (рис.2, *б*), и требует компенсации обычной осевой нагрузкой, т.е. весом снаряда.

Характеристика осевой нагрузки в случае бурения льда инструментом типа лопастного сверла с углом заточки лезвия α зависит от его остроты. Если лезвие лопасти острое «как бритва» осевая нагрузка S возникает как реакция со стороны стружки льда, надвигающейся на лопасть при ее вращении с одновременным врезанием лезвия (рис.2, *а*). Толщина стружки, а следовательно, и скалярная величина вектора N, если подача инструмента не ограничивается, будут определяться вращательным моментом. Последний зависит и от угла α. При значении $\alpha > \alpha_{опт}$ ($\alpha_{опт}$ – оптимальный угол, соответствующий режиму резания льда, получению стружки и использованию полной мощности сверла) вращение инструмента затормаживается. При $\alpha < \alpha_{опт}$ процесс резания льда будет происходить с недоиспользованием мощности. Таким образом, угол $\alpha_{опт}$ острого лезвия, работающего в режиме резания льда, соответствует наибольшему моменту, развиваемому сверлом. Этот режим не требует специальной осевой нагрузки, так как последняя, как было показано выше, возникает как реакция взаимодействия лезвия со стружкой. В этом случае подача инструмента должна соответствовать углубке скважины, так как любое, даже небольшое перегружение сверла может привести к его остановке.

Практически острыми как бритва лезвия долго оставаться не могут. Их затупление приводит к возникновению реакции со стороны массива льда, производная составляющей которой S направлена вверх (рис.2, *б*). Для продолжения работы при том же значении α в оптимальном режиме, т.е. при снятии стружки той же толщины, необходимо подачу инструмента производить с пригрузкой, равной возникающей реакции. При сильном затуплении или большем угле α режим резания льда может смениться режимом скалывания без образования стружки. Вместо нее впереди лезвия будут непрерывно скалываться кусочки льда и разрушение его будет происходить за счет постоянного вдавливания инструмента с вращением.

Из схем разложения реакции льда R на составляющие видно, что острое лезвие врезается в лед с «обратной» осевой нагрузкой S (рис.2, *а*), которая при одном и том же сопротивлении льда R имеет наибольшее значение при $\alpha = 45°$*. При $45° > \alpha > 45°$ следует ожидать уменьшения толщины стружки, а значит, и менее эффективного бурения льда в режиме резания.

В случае затупления лезвия (рис.2, *б*), составляющая реакции T является касательной к дуге затупления (на рисунке прямой отрезок), а другая составляющая S направлена вверх, т.е. вытесняет лезвие к поверхности. При бурении льда затупленным лезвием она должна компенсироваться осевой нагрузкой той же величины, направленной вниз. По тем же математическим соображениям наибольшего значения S достигает при $\beta = 45°$. Следовательно, при большем или меньшем угле затупления β осевая нагрузка требуется меньше при одном и том же сопротивлении R.

Бурение затупленным лезвием – это, по преимуществу, режим скалывания. Если считать, что в начале бурения лезвия сверла острые, а по прошествии некоторого времени затупляются, т.е. режим резания льда переходит в режим его скалывания, представляется оптималь-

* Нахождение S_{max} при решении уравнения $dS/d\alpha = f'(\alpha) = 0$ здесь не приводится.

ным устанавливать лезвия лопастей под углом резания $\alpha = 45°$ (рис.2, *а*). По мере их затупления, что может контролироваться величиной R с помощью приборов, измеряющих нагрузку электродвигателя, необходимо создавать осевую пригрузку, поддерживая в постоянных пределах R (рис.2, *б*). Вероятно, при $\beta = 45°$ лезвия следует или заточить или заменить.

Из вышеизложенного следует, что оптимальным режимом механического бурения льда следует считать такой, который обеспечивает разрушение льда при его сопротивлении $R = W/(\omega rm)$, где m – число лезвий. Такое сопротивление возникает при внедрении в лед лезвий вращающегося сверла, заточенных под углом $\alpha = 45°$. В случае острых как бритва лезвий возникает осевая нагрузка S со стороны стружки, надвигающейся на лезвие (рис.2, *а*). При возникновении дополнительной нагрузки, например веса инструмента, возникнет торможение, поскольку увеличится толщина стружки вследствие углубления лезвия и сопротивление льда превысит окружное усилие: $R > W/(\omega rm)$. Следовательно, основным фактором поддержания в данном случае оптимального режима является подача инструмента за один оборот, соответствующая толщине стружки.

При затуплении лезвия, что будет сказываться на уменьшении сопротивления, а значит, и нагрузки на электродвигатель, т.е. $R < W/(\omega rm)$, вследствие уменьшения толщины стружки, при появлении выталкивающей составляющей S реакции льда (рис.2, *б*) необходимо оптимизировать процесс бурения путем увеличения осевой нагрузки за счет веса инструмента. Рост осевой нагрузки рекомендуется контролировать тем же путем, что и в предыдущем случае, т.е. сохраняя примерное равенство $R \approx W/(\omega rm)$.

При затуплении лезвий сверла, при котором $\beta \geq 45°$, сопротивление льда, а значит, и нагрузка электродвигателя должны падать, поскольку S начнет уменьшаться. Физически это понимается как переход лезвия от вдавливания в лед на скольжение. Предполагается, что это будет сигналом необходимости поднять буровой снаряд для заточки или замены лезвий.

Изложенный взгляд на механизм разрушения льда инструментом типа лопастного сверла, вооруженного лезвиями с различной степенью остроты, и оптимальную технологию бурения таким инструментом не исчерпывает всех нюансов этого вопроса. При практическом использовании в изложенную схему могут быть внесены коррективы и дополнения.