*Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 1, 1973 г.*

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК СКВАЖИН ПРИ БУРЕНИИ ПО МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМ ПОРОДАМ

*Ф. А. Шамшев, А. М. Яковлев*

При бурении по многолетнемерзлым горным породам могут быть использованы те же промывочные жидкости, которые применяются обычно в породах с положительными температурами. Все требования к промывочным агентам в этих условиях распространяются и на среды, предназначенные для работы при отрицательных температурах.

Любая промывочная среда при вращательном бурении должна выполнять смазывающе-охлаждающие функции, способствовать эффективному разрушению горных пород и обеспечивать нормальные условия углубки скважины до проектной глубины. При проходе скважин в неосложненных условиях, как правило, используется техническая вода. Чтобы предотвратить ее замерзание в скважине при бурении по многолетнемерзлым породам, воду искусственно минерализуют, вводя хлористый натрий.

По сравнению с глинистым раствором применение воды обеспечивает наиболее высокие механические скорости бурения, упрощает и удешевляет производство буровых работ. Для повышения смазывающих свойств и эффективности разрушения горных пород в воду вводят различные добавки.

Водные эмульсионные промывочные растворы наиболее рациональны при алмазном бурении. Использование их позволяет увеличить скорость вращения бурового снаряда; снизить вибрацию бурового инструмента и тем самым повысить механическую скорость бурения и рейсовую проходку. Эмульсионные растворы способствуют износостойкости алмазных коронок, снижают расход алмазов, износ бурильных труб и бурового оборудования; при этом снижаются потери напора и, соответственно, давление, развиваемое насосом, а также затраты энергии на привод насоса и бурового станка.

Производительность бурения, таким образом, по многолетнемерзлым породам во многом обусловливается правильностью выбора как самого промывочного агента, так и его свойств.

Устойчивость многолетнемерзлых пород, цементирующим материалом которых является лед, определяется причинами, вызывающими его разрушение, в основном за счет теплообмена с циркулирующей промывочной жидкостью или в результате взаимодействия с нею.

1. *Разрушение льда за счет теплообмена с циркулирующей жидкостью.* На основании многочисленных экспериментальных исследований А. В. Марамзин [4] показал: для обеспечения нерастепляемости пород в стенках скважин температура промывочной жидкости, входящей в скважину, должна находиться в пределах от 0 до —2,5°С и быть по возможности близкой к температуре окружающих пород. При бурении нефтяных и газовых скважин роторным и турбинным способами считается, что для предупреждения осложнений в процессе бурения температура жидкости должна быть близкой к 0°С [1]. По данным наших наблюдений, проведенных в осенне-летний период в Депутатской ГРП, температура раствора, входящего в скважину, составляла плюс 1—15°С. Это могло служить причиной протаивания льда, а соответственно, имевших место осыпей и обвалов пород. Одна из мер предотвращения такого нежелательного процесса — поддерживать в зумпфе начальную температуру жидкости, закачиваемой в скважину, в определенных пределах.

На основании теоретических исследований температурного режима бурящейся скважины, проведенных Б. Б. Кудряшовым [2], сделаны расчеты, которые позволили количественно оценить воздействие на многолетнемерзлые породы следующих показателей: 1) промывочной жидкости, закачиваемой в скважину с начальной температурой от —4 до +15°С; 2) длительности циркуляции — от 0,5 до 7 *ч*; 3) параметров раствора, в частности, динамической вязкости, изменяемой в пределах от 0,2 до 0,9 *пз*.

Все расчеты выполнены для геологических условий, характеризующихся мощностью геокриозоны до 300 *м*. Естественная температура пород у поверхности, как и геотермический градиент, определены по данным замера температур в трех скважинах Депутатской ГРП. Так, температура пород составляла в среднем —8,8°С, а градиент изменения температуры 0,023 *град/м*. Технические условия были приняты по практике алмазного бурения: диаметр коронки 76 *мм*; диаметр бурильных труб 50 *мм*; промывка — глинистым раствором и водой, содержащей 106 *г/л* NaCl, с расходом 70 *л/мин*. Полученные результаты позволили отметить следующее.

Применение растворов с положительной температурой при бурении по многолетнемерзлым породам всегда является причиной протайки льда, а следовательно, причиной осыпей и обвалов пород, трещины и поры которых заполнены льдом.

При использовании в качестве промывки глинистого раствора с динамической вязкостью $\eta = 0{,}3$ *пз* и длительности циркуляции 2 *ч* растепления пород не произойдет, если начальная температура раствора будет поддерживаться не выше —1°С.

При изменении длительности циркуляции раствора до 7 *ч* исходная температура раствора должна быть снижена до —1,5°С, а при сокращении времени циркуляции до 0,5 *ч* температура в зумпфе может быть повышена до 0°С.

Изменение вязкости раствора от 0,5 до 0,9 *пз* практически не изменяет характер распределения температуры раствора в затрубном пространстве. Однако охлаждение такого раствора в скважине протекает медленно. Поэтому начальная температура его может поддерживаться в зависимости от длительности циркуляции от —1 до —2°С. В отличие от этого при использовании соленой воды (при длительности циркуляции 7 *ч*) охлаждение раствора даже до —2°С оказывается недостаточным.

При глубине скважины до 300 *м* температура воды в зумпфе должна составлять — (2,5 ÷ 3)°С.

Учитывая, что на практике трудно осуществить регулирование температуры жидкости в зависимости от различных факторов, может быть принято такое минимальное ее значение, при котором бы гарантировалась нерастепляемость пород в стенках скважин. Это условие может быть обеспечено при охлаждении глинистого раствора до —2°С, а соленой воды до — (2,5÷ 3)°С.

2. *Разрушение льда промывочной средой.* Частично воздействие на лед минерализованных хлористым натрием воды и глинистого раствора изучено А. В. Марамзиным [4], который показал, что при концентрации NaCl выше 5% происходит интенсивное разрушение льда, связывающего минеральные частицы породы. Им же доказано, что на скорость разрушения льда существенно влияет разница температур — температуры начала замерзания промывочной среды и температуры жидкости, циркулирующей в кольцевом пространстве между стенками скважины и бурильными трубами. Чем меньше перепад этих температур, тем меньше возможное разрушение льда.

Однако кинетика разрушения льда весьма сложна и мало изучена. Разработка ее теории представляет большой интерес.

Процесс разрушения льда определяется рядом физико-химических явлений, обусловливаемых, по-видимому, осмосом и диффузией, а в некоторых случаях и термодиффузией.

Реакция взаимодействия льда с промывочной средой в скважинных условиях протекает на поверхности раздела фаз твердое тело — жидкость. Поэтому происходящие процессы определяются состоянием жидкой фазы и размерами омываемых поверхностей льда. Отсюда в условиях циркуляции жидкости по скважине и наличии поверхностей контакта со льдом последний будет разрушаться более интенсивно, чем в статических условиях при прекращении циркуляции.

Если одностороннее проникновение растворителя в лед в стенках скважины можно, в первом приближении, подчинить осмотическому явлению, то величина осмотического давления для раствора NaCl составит 17,2 *атм*, а для раствора $CaCl_2$, в аналогичных условиях, 12,4 *атм* [3]. Отсюда повышенную скорость проникновения растворителя в лед следует ожидать из раствора хлористого натрия. Этот вывод находит подтверждение в опытах.

Проникновение электролита в лед определялось методом электропроводности. В холодильную камеру помещался сосуд, заполненный льдом так, чтобы лед превышал верхнюю кромку электродов на 100 *мм*. С поверхности лед заливался охлажденным до такой же температуры раствором NaCl. Температура льда фиксировалась на самопищущем потенциометре с помощью хромель-капелевой термопары и составляла —2,5°С.

Опыты показали, что в течение 6 *ч* удельная электропроводность льда повысилась с $0{,}58 \cdot 10^{-7}$ до $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ $ом^{-1} \cdot см^{-1}$. Замена раствора NaCl на раствор $CaCl_2$ в тех же условиях привела к снижению скорости проникновения жидкости в лед. Удельная электропроводность в этом случае возросла с $0{,}58 \cdot 10^{-7}$ до $0{,}7 \cdot 10^{-7}$ $ом^{-1} \cdot см^{-7}$ за то же время.

Однако кроме изменения осмотического давления на границе лед — солевой раствор на скорость проникновения растворителя оказывает, по-видимому, влияние и изменение вязкости растворителя. Оно может быть вызвано понижением температуры, вводом реагентов, повышающих вяз-

кость раствора (как, например, было в рассматриваемом случае), заменой раствора NaCl на раствор $CaCl_2$, динамическая вязкость которого выше раствора хлористого натрия. Наряду с этим насыщенный растворителем лед, по-видимому, может разрушаться из-за концентрационной разности фаз растворением с последующим удалением воды в объем электролита в силу диффузионных явлений.

Все рассмотренное обусловливает изменения в составах поверхностного слоя льда и близлежащей массы жидкой фазы. При этом разрушение льда на контакте с жидкой средой сопровождается выравниванием составов внутри фаз. Наблюдения показали, что после взаимодействия со льдом плотность раствора хлористого натрия в течение 90 *мин* снизилась с 1,110 до 1,099 *г/см*$^3$. При этом влияние перепада температуры льда и раствора было исключено. Обе фазы имели температуру —2,5°С. Электролит вводился в количестве, обеспечивающем понижение температуры замерзания воды до —3°С. Поэтому при использовании в качестве противозамерзающей добавки солей, снижающих осмотическое давление по сравнению с NaCl, а также повышающих вязкость растворителя, может быть уменьшена скорость проникновения жидкой фазы в лед. Исходя из этих данных, при бурении с промывкой водой преимущество должно быть отдано добавке $CaCl_2$, при воздействии раствора которой степень разрушения льда наименьшая (табл. 1).

*Таблица 1*

**Влияние промывочных растворов и температуры на разрушение льда**

| Тип добавки | Температура замерзания воды, °С | Потеря в весе образца за 30 *мин*,* *г* | Образование шуги |
|---|---|---|---|
| Хлористый натрий | —3 | 0,62 | Образуется |
| Хлористый кальций | —3 | 0,34 | » |
| Этиленгликоль | —3 | 0,50 | Не образуется |
| Этиловый спирт | —3 | 0,39 | » » |
| Глицерин | —3 | 0,21 | » » |
| Хлористый натрий | —3,4 | 0,82 | Образуется |
| » » | —4,5 | 0,91 | » |
| Хлористый натрий + 0,05% ОП-7 + + 0,05% сульфонола | —3,4 | 0,32 | Не образуется |
| Хлористый натрий + 0,05% ОП-7 + + 0,005% АНП-2 | —4,5 | 0,70 | » » |

* Определялась по методике, предложенной А. В. Марамзиным и А. А Рязановым [5].

Необходимо избегать излишнего засоления раствора, поскольку это также приводит к более интенсивному разрушению льда, а следовательно, к появлению осыпей и обвалов пород, цементирующим материалом которых являлся лед.

А. В. Марамзин [4, 5] установил, что с повышением содержания NaCl в растворе лед разрушается более интенсивно. Наши опыты подтвердили этот вывод. Так, при содержании в воде 25 и 106 *г/л* NaCl скорость разрушения льда при $t = -1$°С составляла, соответственно, 0,27 и 1,47 *г/мин*.

Известно, что температуру замерзания промывочной жидкости, как правило, устанавливают на два-три градуса ниже температуры пород в стенках скважины. Однако если учесть, что излишнее засоление воды (раствора) может вызывать повышенное разрушение льда, то к этому следует относиться весьма осторожно. По-видимому, эта разница температур должна составлять один градус.

Бурение по многолетнемерзлым породам с открытыми поверхностями льда следует производить по возможности в кратчайший срок, так как на разрушение льда оказывает влияние длительность воздействия солевого раствора (табл. 2).

*Таблица 2*

**Степень разрушения льда в зависимости от типа солевого раствора и времени воздействия**

| Длительность воздействия, *мин* | Потеря в весе образца льда, *г*, при $t = -1°C$ и 3%-ной концентрации солей, *г* | |
|---|---|---|
| | NaCl | $CaCl_2$ |
| 30 | 0,62 | 0,30 |
| 60 | 0,96 | 0,39 |
| 120 | 1,96 | 0,70 |

Переход от неорганических противоморозных добавок к органическим (этиловый спирт, этиленгликоль, глицерин и др.), а также к добавкам поверхностно-активных веществ (ПАВ), как показывают наблюдения (см. табл. 1), характеризуется снижением разрушения льда на контакте с их водными растворами. Объяснить это явление только ранее рассмотренными причинами нельзя. По-видимому, в этом случае на разрушение льда оказывают, кроме того, влияние адсорбционные процессы, в частности, гидрофобизация его поверхности поверхностно-активными веществами.

Для проверки этого положения в раствор NaCl была введена смесь ПАВ: неионогенного ОП-7 с ионогенными — анионным сульфонолом и катионным АНП-2. Из табл. 1 видно, что добавка в раствор NaCl 0,05% ОП-7 и 0,005% сульфонола, при прочих равных условиях, снизила разрушение льда с 0,82 до 0,32 *г* за 30 *мин*. То же отмечается и при введении смеси ПАВ типа ОП-7+АНП-2. Необходимо отметить, что если при воздействии на лед отдельно растворов солей NaCl и $CaCl_2$ наблюдалось образование шуги, то при введении в эти же растворы ПАВ образование шуги вообще не отмечалось. Шуга не образовывалась и в растворах органических соединений.

Особый интерес могут представлять аэрированные жидкости. Гидрофобизация льда ПАВ и закрепление на его поверхности пузырьков воздуха должны еще в большей степени препятствовать воздействию на лед агрессивной жидкой среды.

Все это позволяет считать, что при применении в качестве противоморозных добавок неорганических соединений типа NaCl или $CaCl_2$ в раствор следует вводить поверхностно-активные вещества, например, композиционного состава (ОП-7+АНП-2). Введение таких добавок в воду, кроме того, улучшает охлаждение матрицы алмазной коронки. Это можно видеть из табл. 3, полученной по результатам опытного бурения алмазной коронкой типа 02ИЗД120К40, в корпусе матрицы кото-

рой была закреплена термопара. Бурение производилось на разных режимах станкам ЗИФ-300М по шокшинскому кварциту IX категории по буримости с промывкой 6%-ным раствором NaCl и тем же раствором, но с добавкой 0,03% ОП-7+0,005% АНП-2.

*Таблица 3*

**Изменение температуры матрицы алмазной коронки при бурении с различными растворами**

| Режимные параметры бурения | | Температура матрицы алмазной коронки, °С, при промывке скважины водой с добавкой | |
|---|---|---|---|
| скорость вращения, *об/мин* | осевое давление на забой, *кг* | 6% NaCl | 6% NaCl и 0,03% ОП-7 + + 0,005% АНП-2 |
| 482 | 1000 | 150 | 34 |
| | 600 | 80 | 20 |
| | 400 | 56 | 16 |
| 277 | 1000 | 92 | 30 |
| | 600 | 68,5 | 26 |
| | 400 | 60 | 24 |

Первые опытные буровые работы, проведенные в условиях Северо-Восточного геологического управления сотрудниками кафедры технологии и техники бурения скважин ЛГИ совместно с опытно-методической партией новой техники этого управления, показали, что введение композиционных добавок ПАВ типа ОП-7+АНП-2 к солевому раствору при бурении по породам VIII—IX категорий (андезитам) обеспечило прирост механической скорости бурения более чем в 2 раза по сравнению с промывкой соленой водой.

В качестве противоморозных добавок, одновременно способствующих повышению эффективности бурения, можно назвать глицерин, этиленгликоль, применение которых при бурении по породам с положительными температурами позволяет повысить стойкость алмазного инструмента [6].

При введении в воду неэлектролитов для определения необходимого их количества, обеспечивающего понижение температуры жидкости до требуемых значений, можно пользоваться с достаточной для практических целей точностью формулой

$$P = 0{,}53\,\Delta T_3\,Gq,$$

где $\Delta T_3$ — желаемое понижение температуры замерзания воды, °С; $G$ — вес добавки, *кг*; $q$ — вес воды, *кг*.

Большое практическое значение имеет также решение вопроса о воздействии на лед эмульсионных растворов. Опыты по применению в условиях Северо-Восточного геологического управления в летний период эмульсионного раствора из кожевенной эмульгирующей пасты с добавкой ОП-7 к соленой воде позволили добиться повышения механической скорости бурения и проходки на коронку. Кроме того, разрушение промывочной средой льда при этом снижается. Так, лабораторные исследования показали, что потеря веса образца льда, помещенного в эмульсионный раствор, полученный из кожевенной эмульгирующей пасты

+0,03% ОП-7+8% NaCl, снижается и составляет 50% от потери веса (в аналогичных условиях) образца льда и 8%-ном растворе NaCl.

При изучении А. В. Марамзиным и А. А. Рязановым [5] воздействия глинистого раствора на лед отмечалось, что скорость его разрушения в соленой воде в 3,5—4 раза больше, чем в глинистом растворе при одинаковой концентрации в них хлористого натрия. Еще больше снижается скорость разрушения льда в глинистом растворе, обработанном химическими реагентами, в частности, ССБ и КМЦ при концентрации, равной 40%.

На лед при применении глинистого раствора оказывает воздействие фильтрат, ионный состав которого может быть весьма различным. Химический состав его определяется: минералогическим составом глин и, в первую очередь, комплексом обменных катионов; содержанием глины в растворе, а также концентрацией в последнем противоморозной добавки. Однако до настоящего времени этому не уделялось должного внимания.

*Таблица 4*

**Ионный состав фильтратов при 30%-ном содержании глины в растворе**

| Ионы | Содержание ионов в растворах № 1 и 2, *мг/л*, при концентрации NaCl, % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | | 3 | | 15 | |
| | Ф-1 | Ф-2 | Ф-1 | Ф-2 | Ф-1 | Ф-2 |
| $Cl'$ | 227,4 | 55,5 | 16236,2 | 1740 | 95242,4 | Не определено |
| $SO_4''$ | 78 | 1,25 | 86 | 1,62 | 82,4 | 1,74 |
| $HCO_3'$ | 85,4 | 42,6 | 97,6 | 36,6 | 85,4 | 24,4 |
| $Ca''$ | 36,8 | 76 | 37,5 | 112 | 35,7 | 1800 |
| $Mg''$ | 11,5 | 4,9 | 13,2 | 110 | 13,4 | 244 |
| $K' + Na'$ | 154,6 | 0,4 | 14845 | 1920 | 56112 | Не определено |
| Суммарное количество | 593,7 | 180,65 | 31315,5 | 4928,2 | 151570,3 | — |

*Таблица 5*

**Воздействие на лед фильтратов глинистого раствора при $t = -2°C$**

| Время воздействия, *мин* | Потеря в весе образца льда, *г*, при содержании в исходном растворе, NaCl, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 3 | | 15 | |
| | Ф-1 | Ф-2 | Ф-1 | Ф-2 |
| 30 | 3,11 | 1,58 | 4,53 | 3,54 |
| 60 | 3,37 | 1,88 | 6,23 | 4,50 |

Анализ ионного состава фильтратов (табл. 4), которые получены из растворов, приготовленных из глин Махарадзевского завода (Ф-1) и Биклянского месторождения (Ф-2) при 30%-ном содержании этих глин в воде и при концентрации 0; 3 и 15% NaCl, показал, что в фильтрате № 1 с повышением концентрации идет резкое возрастание в основном ионов $Na'$ и $Cl'$. В фильтрате № 2, наоборот, значительно возрастает содержание ионов $Ca''$ и $Mg''$. При этом суммарная минерализация выше

в фильтрате № 1. В соответствии с рассмотренным ранее характером воздействия различных солей на лед, можно было ожидать большего разрушения льда в фильтрате № 1 из-за более высокой его суммарной минерализации и более высокого содержания ионов $Na'$ и $Cl'$. Данные табл. 5 подтверждают это предположение. Так, разрушение льда в фильтрате № 1 оказалось значительно выше, чем в фильтрате № 2. Поэтому для снижения процесса разрушения льда предпочтение должно быть отдано кальциевым глинам. Однако сложность химической обработки этих глин затрудняет их широкое применение в условиях бурения по многолетнемерзлым породам. Поэтому больший интерес представляют растворы, приготовляемые из смеси глинопорошков, состоящих из натриевых и кальциевых глин, а также безглинистые, например асбестовые растворы.

## Выводы

1. Применение циркуляционных сред с положительными температурами может быть оправдано только при бурении по морозным горным породам или по скальным многолетнемерзлым устойчивым породам, разрушение льда в трещинах и порах которых не может послужить причиной осыпей и обвалов.

2. При бурении по многолетнемерзлым породам, протаивание которых может служить причиной осложнений процесса бурения, промывочные среды необходимо охлаждать: глинистый раствор — до $-(1 \div 2)$°С; соленую воду — до $-(2{,}5 \div 3)$°С.

3. При использовании в качестве противоморозной добавки хлористого натрия в раствор необходимо вводить ПАВ, гидрофобизирующие поверхность льда и тем самым снижающие скорость его разрушения.

4. Растворы $CaCl_2$, при прочих равных условиях, оказывают меньшее разрушающее воздействие на лед, чем растворы NaCl.

5. Растворы, приготовленные из кальциевых глин, вызывают меньшее разрушение льда, при прочих равных условиях, чем растворы из натриевых глин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грязнов Г. С. Особенности глубокого бурения скважин в районах вечной мерзлоты. М., «Недра», 1969.

2. Кудряшов Б. Б. Анализ, расчет и вопросы регулирования температурного режима бурящейся скважины. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 57, вып. 2, 1969.

3. Кузнецов В. В. Физическая и коллоидная химия. М., «Высшая школа», 1968.

4. Марамзин А. В. Бурение скважин в многолетней мерзлоте. М., Гостоптехиздат, 1963.

5. Марамзин А. В., Рязанов А. А. Бурение разведочных скважин в районах распространения многолетнемерзлых пород. М., «Недра», 1971.

6. Strebig K. C., Schultz C. W., Selin A. A. How to effect. a cost reduction in diamond drilling. — Mining Enginiering, v. 21, № 10, 1969.