

УДК 622.272

**O.А. Мишедченко**

## **ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СПОСОБА ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД**

*Рассмотрена история развития технологии способа искусственного замораживания пород.*

*Ключевые слова:* замораживание пород, строительства подземных сооружений, технологии замораживания грунтов.

**Семинар № 19**

---

**E**стественное замораживание пород для проходки шурфов и стволов разведочных шахт применялось еще в начале прошлого столетия в Сибири. Золотоносные пласты песков или гальки залегали на коренных породах и были покрыты делювиальными песчаными или глинистыми отложениями. Покровные породы довольно часто содержали значительное количество воды, которая при проходке стволов шахт или шурфов удалялась ведрами или ручными насосами. При более значительном притоке воды проходка оказывалась невозможной, так как доставка машин и оборудования через бездорожную тайгу была связана с огромными трудностями, а часто оказывалась совсем невозможной. Если золотоносный пласт уходил под русло рек, ручьев или под заболоченную местность, он оставался неразрабатываемым из-за невозможности проходки. Практический опыт привел старательей к решению использовать для борьбы с водой естественный холод – сибирские морозы. Был применен следующий способ. Поздней осенью, когда уровень воды в реке был наиболее низким, изготавливали деревянный сруб, поперечным сечением 2x2,1 в свету и погружали его в том месте, где предполагалось заложить

ствол. Внутри сруба и вокруг него наваливался бутовый камень. При этом выбирали такой бутовый камень, который легко разбивался на небольшие куски. Камень укладывали вокруг сруба стенкой шириной 1,5-2,0 м в зависимости от глубины реки. После того, как река покрывалась слоем льда, который заполнял также и пустоты между насыпанным камнем, верхний слой камня из сруба удалялся. При этом работы производились с большой осторожностью, так, чтобы не вынуть излишнего объема. Нижележащий слой оставался в замороженном состоянии. Если большие камни залегали одновременно в двух слоях, то их вынимали не полностью, а частью, оставляя нижний конец в слое. После удаления слоя холод проникал глубже и проходил в нижележащие слои через замерзший слой. Затем снимали последующий слой, одновременно с этим обнажались стенки ствола шахты, благодаря чему наружная стенка из бутового камня также постепенно промерзала и не пропускала из реки воды. После удаления последнего слоя камня забой ствола шахты оставался некоторое время свободным, чтобы дно реки дополнительно промерзло. Затем на дне ствола шахты разжигался костер. Под влиянием тепла от костра дно

оттаивало, после чего снимали слой дальше, а затем после нового замораживания и сжигания костра вынимали последующий слой.

Опыт естественного замораживания зародил идею применения искусственного холода в местах с менее суровым климатом. Низкие температуры можно получить различными способами: при химических реакциях, связанных с поглощением тепла от внешней среды, при переходе тел из одного физического состояния в другое (испарение), при адиабатическом расширении газов с отдачей внешней энергии. В современной технике наибольшее распространение получил способ, основанный на переходе тел из одного физического состояния в другое, то есть на испарении жидкостей.

Искусственное замораживание горных пород для строительства подземных сооружений было впервые применено в Англии в 1862 г., однако официальной датой применения способа замораживания принято считать 1883 г., когда шведский инженер Петш получил патент на проходку ствола способом замораживания.

В 1883 году маркшейдер Герман Петш (Ашерслебен, Германия) получил патент на способ проходки стволов с замораживанием неустойчивых пород. Впервые этот способ был применен в 1883 году на шахте «Арчибальд» (Германия), где при проходке ствола на глубине 34 метра появился плывин. Из забоя были пробурены 10 скважин диаметром 200 мм у стенок ствола и 13 скважин в сечении ствола. Эти скважины пересекли плывину, мощность которого балы 4-5 м, и были заглублены в пласт бурого угля на 0.5 м. В качестве хладоносителя был применен водный раствор хлористого кальция, в качестве хладагента в холодильной установке был применен

аммиак. Для измерения температур пород были пробурены специальные 20 скважин, обсаженных стальными трубами.

Этот первый опыт получил положительную оценку шахтостроителей Европы и Америки. Однако, в дальнейшем, способ искусственного замораживания не всегда был успешным. К тому же, первое время способ замораживания применялся только для ликвидации аварий при проходке стволов, поэтому замораживание проводилось из забоя ствола.

Теоретическую основу способа разработал и опубликовал инженер Лебертон (Франция) в 1885 г. Однако, по его методике расчета возможно было рассчитать замораживание только до глубины 150 м.

Способ искусственного замораживания Петш применял не только на рудниках Германии, но и на некоторых рудниках Бельгии. Однако, в 1892 году фирма Петша распалась. Дальнейшую разработку и внедрение способа замораживания провел механик Луис Гебхардт, работавший ранее в фирме Петша.

С 1884 по 1905 г. во Франции было пройдено 48 стволов способом замораживания. Стволы проходились на глубину до 100 м. В 1898 г. Гебхардт основал фирму «Гебхардт и Кениг» в г. Нордхаузене (Германия), по проектам которой до 1904 г. было пройдено способом замораживания 26 стволов на глубину до 190 м.

На калийных месторождениях Германии и других стран, после 1906 г. фирма «Гебхардт и Кениг» прошла 34 ствола, из них 12- способом низкотемпературного замораживания (температура  $-38\text{--}40^{\circ}\text{C}$ ) на глубину свыше 300 м.

В конца XIX для шахтного строительства были разработаны поршневые аммиачные и углекислотные хо-

лодильные машины, что значительно повысило общую эффективность применения способа искусственного замораживания пород.

В начале 90-ых годов в Германии был изобретен прибор для измерения кривизны скважин, что позволило бурить замораживающие скважины практически без искривлений и избежать образования «окон» в ледопородном ограждении.

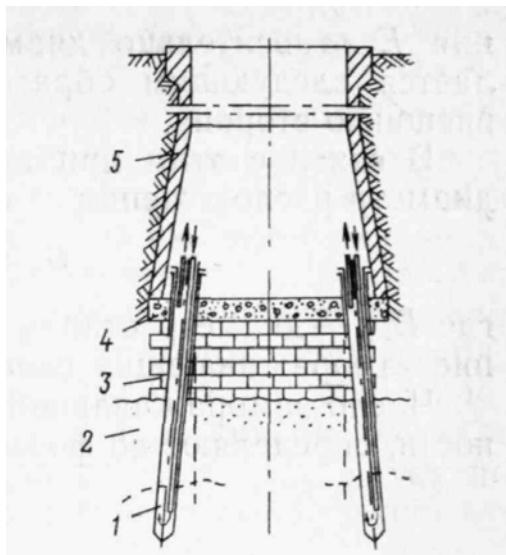
В начале XX в Бельгии в районе Кампена были обнаружены большие запасы угля, залегающие на глубине более 450 м. Наносные породы были представлены тремя слоями плыунов, перемежающихся глинами, мергелями, нижний плыун на отм. 588-597 м имел гидростатический напор около 5 МПа. На глубине 350-456 м залегал слой белого мелкопористого песчаника с большим водопритоком и напором около 3.5-4.5 МПа. Указанные условия создавали большие затруднения для проходки ствола обычным способом, так как невозможно было применить шахтный водоотлив из-за большой глубины ствола. Также были отвергнуты попытки цементации породного массива (вследствие наличия плыунов) и бурения ствола на полное сечение (из-за наличия слоя песчаника). Было принято решение о применении способа искусственного замораживания пород. Для проходки стволов в Кампене была специально создана фирма «Фораки». При проходке стволов были организованы и проведены большие исследовательские работы – определение теплофизических, физико-механических свойств замороженных и талых пород. В результате проведенных исследований было впервые установлено, что пески замораживаются лучше, чем известняки и песчаники, а глины хуже, чем пески и известняки, а лигниты и уголь замораживаются еще труднее, чем

глины. Установлено также, что под действием определенного давления замороженный песок деформируется. Величина деформации зависит от времени: сначала деформация происходит быстро, а затем принимает медленный и асимптотический характер.

По истечении определенного времени величина деформации достигает практически постоянной величины. При этом замечено, что чем меньше высота незакрепленной части ствола, тем большую нагрузку может выдержать ледопородное ограждение. При увеличении нагрузок разрушения ледопородного ограждения не наблюдалось, так как лед обладает пластичными свойствами. Установлено, что одинаковая деформация получается при давлении 4,6-8 и даже 10 МПа, при температурах -10;-20;-25 и -35°C. Так как еще не было разработано инженерных методик расчета толщины ледопородного ограждения, принимался радиус замораживания пород вокруг каждой колонки 2-3 м. Большое внимание уделялось расчеты диаметра расположения замораживающих скважин, чаще всего применялось однорядное замораживание, с окружностью замораживающих колонок на 3-5 м больше диаметра ствола в проходке.

Сплошность ледопородного ограждения и его толщину определяли с помощью построения погоризонтных планов ледопородного ограждения для каждой колонки. Радиус цилиндра определяли по достижении нулевой изотермы в контрольных скважинах. Контроль сплошности и прочности ледопородного ограждения также производился с помощью гидронаблюдательных скважин, пробуренных вблизи оси ствола.

В качестве холодильных установок использовались аммиачные и углеки-



**Рис 1. Локальная схема замораживания:** 1 - замораживающая колонка, 2 - обводненная порода, 3 - целик из необводненных пород, 4 - бетонная подушка, 5 - подземная выработка

слотные поршневые компрессоры, однако последние – реже, из-за весьма высокого давления (7 МПа) в конденсаторах. В качестве хладоносителя в основном применяли водный раствор хлористого кальция (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ). При необходимости понижения температуры до  $-50$ – $-55^{\circ}\text{C}$  к раствору добавляли спирт.

Большое внимание уделялось обеспечению плотности соединений трубопроводов на замораживающей станции, особенно при монтаже замораживающих колонок. Во избежание повреждения колонок, циркуляцию рассола начинали при его положительной температуре и понижение температуры производили постепенно. Регулировали процесс замораживания путем составления графиков и диаграмм хода процесса, работы агрегатов и аппаратов, и своевременной корректировки. Ликвидация выявленных «окон» в ледопородном огра-

ждении производилась бурением дополнительных скважин, либо дополнительным по времени замораживанием, что приносило большие расходы в целом.

На шахте «Беериген» (Бельгия) был пройден ствол способом замораживания до глубины 488 м, затем, до глубины 578 м – обычным способом. Разведочным бурением на глубине 603 м был обнаружен слой водоносного песка мощностью 14 м с большим гидростатическим напором (5.5 МПа). На этом стволе был впервые применен метод местного замораживания из забоя ствола с бурением скважин через сальник до водоносного слоя, а в плытунах – с поверхности через уравнительные трубы. При этом замораживающие скважины были расположены на трех концентрических окружностях (трехрядное замораживание). Температура замораживания была принята  $-30^{\circ}\text{C}$ . Аналогичная проходка совершилась на шахте «Андре Дюмон» (Бельгия), но здесь скважины бурили уже на четырех концентрических окружностях с наклоном их от ствола, что облегчало проходку. Опыт работы на этих двух стволах доказал возможность замораживания пород на больших глубинах как сразу на всю глубину, так и замораживания плытунов с большими напорами из забоя ствола.

В СССР способ искусственного замораживания пород был успешно применен при проходке ствола первого калийного рудника в Соликамске в 1927 г. немецкой фирмой «Дельман», после чего этот способ стал широко применяться.

С 1932 года способ искусственного замораживания пород начали применять на строительстве метрополитена в Москве, для чего была создана специальная контора спецработ.

С 1943 г. был организован трест «Шахтспецстрой», с этого момента и по сей день способ искусственного замо-

раживания используется в шахтном строительстве.

Первое отечественное руководство по проектированию проведения горных выработок способом искусственного замораживания пород было разработано Н.Г. Трупаков и Х.Р. Хакимовым в 1946 г.

В 1949 г. во ВНИИОМШСе была создана первая лаборатория по исследованию способов замораживания пород при проходке шахтных стволов. С этого времени начались планомерные исследования способа замораживания пород на физических моделях и разработка теоретических основ способа замораживания для проходки стволов шахт и других горных выработок.

Теоретические основы расчетов и технологии способа замораживания пород были изложены в книге Н.Г. Трупака, опубликованной в 1954 г.

С 50-х годов началось строительство шахт с применением способа искусственного замораживания в Мосбассе, Донбассе, Львовско-Волынском бассейне и на Верхне-Камском калийном месторождении. С началом развития освоения калийных и соляных месторождений методом замораживания стали проходить стволы до 650 м. Серьезных теоретических предпосылок для расчета ледопородных ограждений на таких глубинах в мировой литературе не было, за исключением известной формулы О.Домке. В 1963 г. появилась уникальная теоретическая работа, выполненная творческим коллективом под руководством д.т.н. С.С. Вялова. Эта работа стала основой создания специального раздела в механике подземных сооружений – механики замороженного массива. В работе дан расчет ледопородного ограждения и отражаются стадии работы толстостенного цилиндра под действием внешнего радиального давления (горного и гидростатического). Недостатком этой ра-

боты, по моему мнению, является полное отрицание применимости формул Ляме и Домке, то есть отрицание работы ледопородного ограждения в упругой и упруго-пластичной стадии. Работа материала в той или иной стадии должна проверяться на основании расчета и анализа по всем факторам безопасной работы сооружения в целом. Поэтому работа ледопородного ограждения в стадии только пластической деформации не приемлема для условий реальной проходки. Но значимость указанной работы в мировой науке велика. Особенно нужно подчеркнуть, что в работе впервые дана рекомендация необходимости замораживания глин. До этого (при строительстве стволов на ЗЖРК и в Солигорске) такая задача не ставилась, что приводило к ряду аварий, описанных Н.Г. Трупаком.

В конце 50-х годов возникла необходимость проходки глубоких стволов на Яковлевском железорудном месторождении КМА, где богатые железные руды перекрыты мощным (600м) слоем слабых водонасыщенных пород. Шахтные стволы сооружались в водоносных неустойчивых породах. Рудное тело – железная руда – залегает на глубине около 720 м. Обводненные и неустойчивые покровные горные породы, представленные песками, глинами, мелом и мергелем, залегают на глубине 570-585 м. Ниже находятся коренные породы, в верхней части сильно выветрельные, частью разрушенные, малоустойчивые. В геологическом разрезе отмечено восемь водоносных горизонтов, большинство из которых отличаются значительной водообильностью и высокими напорами:

Проектной конторой треста Шахтспецстрой в 1970-1974 гг. был разработан технологический проект проходки трех стволов Яковлевского рудника КМА способом замораживания на глубину 620 м.

Замораживание производилось двумя рядами замораживающих скважин, расположенных на двух концентрических окружностях. Диаметр первой окружности – 14,5 м, а второй – 19 м. Расстояние между рядами 2,25 м. Расстояние между замораживающими скважинами во внутреннем ряду составило 1,38-1,47 м, в наружном 1,65-1,81 м.

Наибольшая глубина замораживания – 935 м – была достигнута при проходке ствола «Боулби» (Великобритания), где промораживался мелкопористый сильнообводненный песчаник от 600 до 935 м. До 585 м ствол прошли обычным способом. Скважины бурили с поверхности, обсадку трубами осуществляли от 580 до 935 м, а до 580 м их зацементировали. В процессе бурения производили оснастку и проходку ствола.

С целью исключения аварий с нарушением герметичности замораживающих колонок, в настоящее время разрабатываются безрассольные способы замораживания пород – с непосредственным испарением аммиака в колонках и способы замораживания низкотемпературным воздухом, предложенные ВНИИОМШС. Первый способ не нашел применения из-за неуправляемости процесса испарения аммиака в колонках. Второй способ практически возможен, но для его осуществления требуется разработка турбокомпрессорных машин.

Было осуществлено локальное замораживание пород жидким азотом при проходке наклонного ствола шахты

«Березовская». Опыт подтвердил целесообразность применения только для локального замораживания. Скорость замораживания при этом увеличивается в 4-6 раз, но остаются некоторые трудности в подаче азота от танкера до забоя.

Однако применение способов безрассольного замораживания имеет ряд преимуществ в городском строительстве, так как замораживание грунтов вблизи зданий и сооружений требует специальных мероприятий, обеспечивающих ресурсосбережение, охрану окружающей среды и повышение технико-экономических показателей подземного строительства в целом.

В МГГУ профессором кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт» М.Н. Шупликом разработан и апробирован способ замораживания грунтов, основанный на отборе тепла из окружающего массива пород с помощью твердых криоагентов, которые периодически загружают в замораживающую колонку до создания ледогрунтовое ограждение требуемых размеров. Так как предлагаемые технологии замораживания грунтов применяются без подготовительного периода, значительно сокращаются общие сроки строительства. Использование технологий замораживания «сухим льдом» позволили ликвидировать аварийные ситуации на строительстве подземного гаража в районе ВДНХ, на строительстве «Южного канала» при пересечении Курской железной дороги, при строительстве сбоек Серебряноборских тоннелей. ГИАБ

### *Коротко об авторе*

Мишедченко О.А. – аспирантка,  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru