

О ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА ОПРОБОВАНИЯ НА ОСНОВЕ БУРЕНИЯ С ЗАМОРАЖИВАНИЕМ

**(применительно к месторождениям фосфоритов
Эстонии и Ленинградской области)**

И. С. Афанасьев, Д. И. Береснева, В. К. Чистяков

Перспективные запасы месторождений ракушечниковых фосфоритов Эстонии и Ленинградской области оцениваются в 2—3 млрд. т. Генетически они связаны с толщей кварцево-оболовых песчаных отложений пакерортского горизонта раннего ордовика, распространенной почти на всей территории Эстонии и протягивающейся на 320 км восточнее ее (Ленинградская область). Мощность продуктивной толщи колеблется в пределах 1—6 м, средняя мощность 4 м. Фосфоритосодержащие песчаные отложения с размывом залегают на песчаниках, алевролитах или глинах кембрия. Покрывают их глауконитовые песчаники, доломиты, известняки раннего ордовика мощностью от 3 до 15 м. Четвертичные отложения представлены моренными суглинками, торфами, флювиогляциальными песками, галечниками и гравием. Мощность — от 5 до 20 м.

Довольно низкое (от 4 до 12%) содержание фосфорного ангидрита в кварцево-оболовых песках и песчаниках обычно для платформенных фосфоритных месторождений осадочно-морского генезиса. Фосфатное вещество концентрируется преимущественно в раковинах обол, в меньшей степени образует пленки вокруг кварцевых зерен.

В Эстонии выявлен и разведан целый ряд месторождений, в Ленинградской области пушено в эксплуатацию Кингисеппское месторождение. Планами предусмотрены поиски и разведка новых площадей фосфоритов в сильно заболоченных и залесенных районах. При разведке названных месторождений в проведении буровых работ встретились трудности, вызванные сложностями строения и состава продуктивной толщи, которые хорошо видны на примере Кингисеппского месторождения. Несмотря на сравнительно небольшую мощность (в среднем 4 м) промышленная толща отличается значительной пестротой литологического состава и подразделяется на две свиты: ладожскую — нижнюю, мощностью 1,8—3,2 м, и тосненскую — верхнюю, мощностью 0—2,0 м.

Основные особенности строения промпачки сводятся к следующему.

1. Разрез продуктивной толщи представлен преимущественно песками (мелко-, среднезернистыми — ладожская свита и разномзернистыми — тосненская), т. е. рыхлыми отложениями.

2. По всей мощности продуктивной толщи периодически встречаются линзы и прослои песка мощностью от 0,1 до 3 м, в той или иной степени насыщенные конкрециями на карбонатном цементе, определенного стратиграфического положения не занимающие.

3. В нижней части продуктивной толщи (ладожская свита) помимо прослоев с конкрециями встречаются линзы и прослои конкреционных и монолитных песчаников на железисто-доломитовом цементе, мощностью от 0,5 до 2,5 м, т. е. крепко сцементированных пород. Определенного стратиграфического положения эти породы также не занимают. Их участие в разрезе фосфоритного пласта составляет 5—10% от общей его мощности.

4. Содержание фосфорного ангидрита по разрезу неоднородно и связано с литологическими особенностями. Наиболее высокий процент содержания фосфорного ангидрита отмечается в рыхлых отложениях — песках, причем в разномзернистых песках тосненской свиты много выше (11,9%), чем в мелко- и среднезернистых ладожской (5,5%). Присутствие в песках конкреций, прослоев песчаников снижает содержание фосфорного ангидрита до 4,3%.

Правильное определение процентного содержания фосфорного ангидрита по разрезу, а следовательно, и в промышленных типах руд зависит от точности, с которой выделяются литологические типы пород и подсчитываются их мощности, т. е. на первое место выступает качество и выход керна.

Упомянутые выше трудности буровых работ сводились к следующему. В обводнении месторождения участвуют три водоносных горизонта, два из которых залегают в кровле (четвертичный и таллинско-восховский) и один — в подошве промпласта (кембро-ордовикский). Кембро-ордовикский водоносный горизонт приурочен к оболочкам и тискреским пескам и песчаникам ($Сm_2ts + O_1pk$). Общая мощность водоносного горизонта в среднем составляет 23—25 м. Нижним водоупором является толща «синих» кембрийских глин. Из-за напора в кембро-ордовикском горизонте оболочковые пески отличаются крайней неустойчивостью, плавучим характером.

Бурение проводится «всухую» с последовательным, параллельным или (при напорном характере плавучины в продуктивной толще) с опережающим креплением скважины обсадными трубами, а в отдельных случаях желонкой или колонковым снарядом с клапаном в коронке. Бурение часто сопровождается «подплывом» и образованием «пробок», что приводит к излишнему (более 100%) выходу керна. Данные о выходе керна по рудному интервалу при бурении более 1100 скважин на Кингисеппском месторождении следующие:

Выход керна, %	60	60—65	65—70	70—80	80—90	90—100
Частота выхода керна, % .	0,96	4,58	12,11	38,71	29,71	13,96

Длина рейса при проходке по продуктивной толще колеблется в пределах от 0,5 до 2 м. Для уменьшения оплывания стенок скважины при проходке фосфоритовой толщи «всухую» рейс увеличивают до 2,5—3,5 м, но и в этом случае пройти весь слой за один рейс очень трудно и не удается полностью исключить оплывание стенок скважины, образование «пробок» и прочие явления, вызывающие ошибки при опробовании керна.

Анализ первичной документации керна, расчисток и забойного опробования по разработанным блокам Северного участка Кингисеппского

месторождения, проведенный геологической службой комбината «Фосфорит», свидетельствует о разрушении оболочек песчаников и перемешивании материала в процессе избирательного истирания карбонатов при бурении. Этот процесс наиболее интенсивно происходит при расхождении снаряда в скважине (особенно при роторном бурении), характерном для бурения «всухую», когда плотные и твердые куски керна подвергаются разрушению, частичному истиранию на забое, а мягкий материал и частицы разрушенного керна перемешиваются и переходят в шлам.

Существующая технология бурения разведочных скважин вызывает искажение истинного распределения различных литологических разновидностей пород в составе фосфатной толщи. Обычно завышается роль в разрезе рыхлых разностей и соответственно занижается роль крепких. Создается неправильная картина в распределении промышленных руд по разрезу, выясняющаяся в процессе эксплуатации месторождения.

В поисках оптимальной технологии проходки фосфоритной толщи с целью сохранения в кернах структурной и текстурной целостности породы сотрудники кафедры технологии и техники бурения скважин Ленинградского горного института и Ленинградской геологической экспедиции СЗГУ в 1970—1971 гг. провели опытные работы по исследованию возможности и перспектив нового способа проходки скважин — бурения с одновременным замораживанием проходимых пород.

Задача о промерзании пород забоя в процессе бурения впервые решена Б. Б. Кудряшовым. Основы теории этого способа бурения* использованы для практических расчетов параметров процесса бурения с одновременным замораживанием: температуры циркуляционной среды, глубины промерзания пород забоя и допустимой механической скорости. Допустимая механическая скорость бурения в зависимости от температуры циркуляционной среды в зоне забоя, теплофизических свойств и глубины промерзания пород забоя, а также условий теплообмена определялась из приближенного уравнения

$$V = \frac{1}{\frac{z}{a_1} - \frac{1}{t_{cp} k} \left[c_2 \gamma_2 T_n + (1-\psi) \rho_1 i r \right]},$$

$$\frac{1}{k} = \frac{z}{\lambda_1} + \frac{1}{a_3},$$

где $\frac{1}{k}$ — термическое сопротивление теплопередачи через ледогрунтовую корку на забое ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С} / \text{ккал}$); z — глубина промораживания забоя, м; λ — коэффициент теплопроводности породы, $\text{ккал} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$; a — коэффициент температуропроводности породы, $\text{м}^2 / \text{ч}$; c — удельная весовая теплоемкость породы, $\text{ккал} / (\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$; γ , ρ — удельный вес и плотность породы, $\text{кг} / \text{м}^3$; i , ψ — льдистость и коэффициент пористости породы, %; r — скрытая теплота кристаллизации воды, $\text{ккал} / \text{кг}$; T_n , t_{cp} — ес-

* Б. Б. Кудряшов, В. К. Чистяков. Принципы расчета параметров бурения с одновременным замораживанием проходимых пород. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 7, вып. 2, 1969.

В. К. Чистяков. Исследование способа бурения скважин с одновременным замораживанием проходимых пород. Автореф. канд. дисс. Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1969.

Б. Б. Кудряшов. Закономерности опережающего забоя замораживания при бурении скважин с промывкой холодоносителем. См. настоящий сборник.

тественная температура породы и средняя температура холодоносителя у забоя, $^{\circ}\text{C}$; α_3 — коэффициент теплоотдачи на забое, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Индекс i относится к мерзлой, индекс 2 — к талой породе.

Анализ уравнения показывает, что процесс бурения с опережающим промерзанием пород забоя может происходить только при определенных соотношениях между механической скоростью бурения и заданной глубиной промерзания пород.

Для расчетов приняты следующие параметры, характеризующие физические и теплофизические свойства мелко-, средне-, разноразмерных оболочек влагонасыщенных песков Кингисеппского месторождения фосфоритов: $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$; удельный вес скелета породы $\gamma_{\text{ск}}$ γ_1 и γ_2 соответственно равны 1850, 2060 и 2100 кг/м^3 , влажность породы $W = 15\%$; $\psi = 30\%$; c_1 и c_2 составляют 1,0 и $0,25 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$; λ_1 и λ_2 равны 2,5 и $2,1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $a_1 = 0,005 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Основываясь на первых исследованиях по обоснованию выбора рациональных схем охлаждения циркуляционных сред при бурении и имеющемся отечественном и зарубежном опыте бурения с замораживанием проходимых пород, для проведения опытного бурения с замораживанием на Кингисеппском месторождении в качестве холодоносителя был принят технический керосин, охлаждаемый в специальной теплоизолированной емкости сухим льдом — твердой двуокисью углерода (CO_2). Ниже приводятся основные теплофизические характеристики сухого льда:

Температура испарения при 1 атм, $^{\circ}\text{C}$	—78,5
Температура плавления (для жидкой углекислоты), $^{\circ}\text{C}$	—56,6
Удельный вес промышленного сухого льда, г/см^3	1,4
Общая холодопроизводительность, ккал/кг	159
в том числе скрытая теплота сублимации	137

Экспериментальное бурение осуществлялось с помощью установки поискового бурения УПБ-25. Схема размещения оборудования приводится на рис. 1. Чтобы определить геологический разрез опытной скважины, предварительно была пробурена скважина обычным способом с промывкой водой по вмещающим породам и «всухую» по продуктивной толще.

Перед началом экспериментального бурения с одновременным замораживанием проходимых пород в теплоизолированной емкости производилось охлаждение керосина. Для предварительного охлаждения 170 л керосина (начальная температура $+12^{\circ}\text{C}$) до температуры -35°C потребовалось 50 кг сухого льда. Время предварительного охлаждения составило 25 мин. Бурение по продуктивной толще проводилось колонковым снарядом $\varnothing 57 \text{ мм}$ и длиной 1,5 м. В качестве породоразрушающего наконечника использовалась твердосплавная коронка СМ-2 $\varnothing 59 \text{ мм}$.

Перед началом бурения скважина прокачивалась охлажденным керосином для создания надежного перекрытия четвертичных и ордовикских водоносных горизонтов промерзанием окружающих пород вокруг башмака обсадной трубы. Таким образом удавалось предотвратить утечки в зазор между стенками скважины и обсадными трубами при бурении. В процессе предварительной прокачки продолжительностью 10—20 мин температурный режим циркулирующего керосина стабилизируется. Разница между его температурами на входе и выходе из скважины уменьшается до $10\text{—}15^{\circ}\text{C}$.

Бурение продуктивной толщи велось на первой (250 об/мин) и второй (840 об/мин) скоростях вращения станка УПБ-25 с механической

скоростью 0,5—3,0 м/ч, регулируемой с помощью ручной лебедки станка за счет изменения давления на забой. Характер промерзания пород забоя определялся по выносу шлама: его увеличение свидетельствовало о неудовлетворительном промерзании, и наоборот. В процессе первого опыта проведено 4 рейса бурения с замораживанием и пройдено 2,5 м по полезной толще. Полученный керн представлен несколькими кусками мерзлых разнородных оболочковых песков, подобных по прочности песчаннику. Выход керна из-за многократных изменений режима бурения составил 75%.

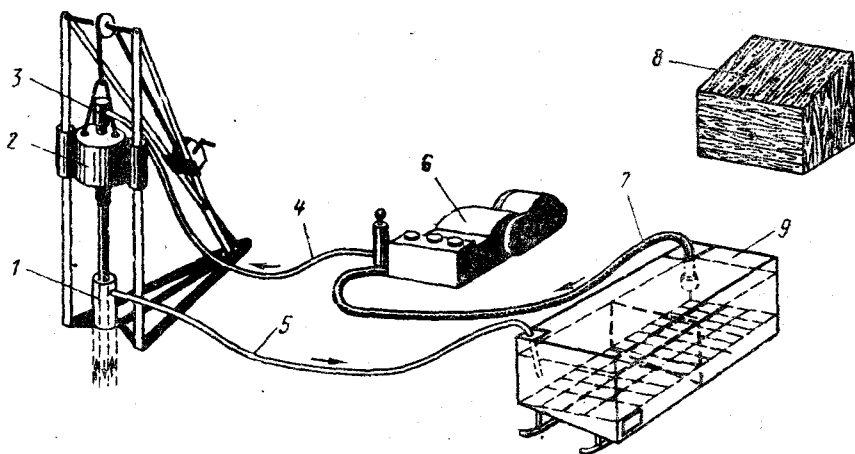


Рис. 1. Оборудование для бурения с одновременным замораживанием
1—кондуктор со сливным патрубком; 2—вращатель станка УП Б-25; 3—сальник; 4—нагнетательный шланг; 5—шланг для возврата керосина; 6—плунжерный насос; 7—всасывающий шланг; 8—теплоизолированный ларь для хранения твердой углекислоты; 9—теплоизолированная емкость для охлаждения керосина и сбора шлама

Результаты химического анализа керна и бороздовой пробы из расчистки на борту карьера в непосредственной близости от опытной скважины следующие, %:

	По сква- жине	По расчи- стке
P_2O_5	11,20	11,00
MgO	0,34	0,35
CaO	16,24	16,20
Нерастворимый осадок	67,52	—

Анализ этих данных показывает, что исследуемый способ позволяет получать керн, удовлетворяющей достоверности опробования. Неполный выход керна при опытном бурении объясняется влиянием изменений режима бурения в поисках оптимального, а также низкой влажностью песков (7—9%), осушенных близлежащим карьером.

Способ бурения с одновременным замораживанием благоприятно влияет также на состояние стенок скважины, которые, промерзая на глубину, обеспечивают сохранение их устойчивости и монолитности в течение нескольких часов после прекращения циркуляции и извлечения снаряда на поверхность.

При последующих опытах бурения отмечены осложнения: а) образование сальников на переходнике колонковой трубы из частиц шлама, сцементированных льдом; б) прихваты колонковой трубы в скважине при превышении допустимой скорости, обеспечивающей надежное промерзание пород забоя; в) частичное истирание мерзлых кусков керна и

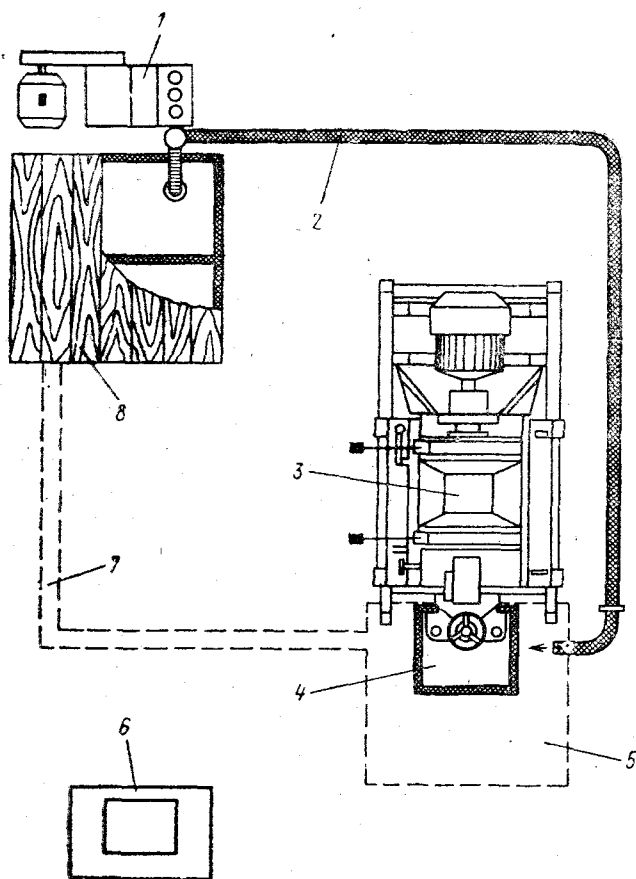


Рис. 2. Схема опытного стенда конструкции ЛГИ по бурению с одновременным замораживанием

1 — промывочный насос НБ-7-1М; 2 — нагнетательный шланг; 3 — станок ЗИФ-3ЮМ; 4 — блок грунта; 5 — бетонированный шурф; 6 — потенциометр самопишущий ПСР-1-01; 7 — желобная система; 8 — теплоизолированный зумпф с сухим льдом и дизельным топливом

разрушение их потоком керосина в случае применения одинарной колонковой трубы; г) оставление керна в скважине из-за отсутствия специального кернозахватывающего устройства. Предотвращение этих осложнений позволит разработать оптимальную технологию бурения с одновременным замораживанием.

Для выяснения механизма промораживания и очистки забоя, определения оптимальных параметров режима бурения и рациональной конструкции инструмента в лаборатории кафедры технологии и техники бурения скважин ЛГИ оборудован опытный стенд (рис. 2). В качестве холодоносителя при экспериментальном бурении использовалось аркти-

ческое дизельное топливо. Искусственные блоки влагонасыщенного песка готовились в деревянных ящиках размерами $0,6 \times 0,6 \times 1$ м. Гранулометрический состав и влажность близки оболовым пескам Кингисеппского месторождения. В блоках размещены термодатчики для измерения температуры породы при бурении компенсационным методом. Экспериментальное бурение велось твердосплавными и алмазными коронками $\varnothing$ 59 и 93 мм. Расход жидкого холодоносителя составил 25—30 л/мин, температура изменялась от 5 до -30°C . В процессе опыта регистрировались проходка, механическая скорость, технологические параметры режима бурения, поле температур породы в блоке и промывочной жидкости в различных точках циркуляционной системы.

Данные экспериментального бурения в лабораторных условиях в основном совпали с полученными при бурении на месторождении, но позволили однозначно объяснить причины осложнений. Для эффективного бурения с одновременным замораживанием необходимо усовершенствовать конструкцию породоразрушающего инструмента, теплоизолировать снаряд в целях экономного транспортирования холода, применить приспособления для устранения размыва керна. Эти вопросы находятся в стадии разработки.

Первые опыты бурения с одновременным замораживанием пород продуктивной толщи подтвердили основные теоретические предпосылки исследуемого способа, позволили установить принципиальную возможность и существенную практическую целесообразность бурения скважин малого диаметра при разведке месторождения, а также необходимость продолжения дальнейших работ по его совершенствованию.