

Опыт оттаивания мерзлых горных пород

При дражной разработке мерзлых россыпей необходимо различать специфику подготовки пород к выемке для предварительной вскрыши торфов и собственно для драгирования. Главная цель вскрышных работ заключается в удалении пустых пород и обеспечении наивыгоднейших условий дражной разработки месторождения в целом. При оптимальном развитии горных работ наиболее приемлемым способом подготовки мерзлых пород к выемке при вскрыше торфов является послойное оттаивание, особенно на мелких и неглубоких россыпях, когда возможно создание 3...4 летнего опережения подготовительных работ. В то же время вскрышные работы могут быть организованы с использованием буровзрывных работ или других методов разрушения мерзлого массива.

При драгировании предварительное ослабление массива должно быть таким, чтобы, по крайней мере, обеспечить:

- производительную выемку пустых пород ниже горизонта вскрыши, при этом разрушение (плавление) льда-цемента не обязательно;
- производительную выемку песков и пород плотика, которые должны быть талыми перед промывкой, что необходимо для полноты извлечения металла.

Последнее обстоятельство имеет исключительно важное значение, так как предполагает, что способы подготовки мерзлых пород к драгированию должны обеспечивать разрушение (плавление) цементирующего льда.

Это может быть достигнуто при отрицательной температуре, лишь бы происходил процесс оттаивания, т.е. переход мерзлых пород в талые или морозные при условии, что последние не содержат цементирующего льда.

В настоящее время промышленность располагает большим научно-производственным опытом по оттаиванию мерзлых пород. Этот опыт базируется на практической деятельности горных предприятий Восточной

Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока, а также горнодобывающей промышленности США на Аляске и Канады.

Вопрос о тепловой мелиорации горных пород и почв при добыче россыпного золота в области многолетней мерзлоты и сельскохозяйственном земледелии в суровых климатических условиях Восточной Сибири впервые поставил П.И. Колосков в 1911...1915 гг.

В начале 30-х годов Колосковым были высказаны суждения о путях изменения теплового режима почв и пород в области многолетней мерзлоты и глубокого зимнего промерзания почвы.

Значительный вклад в развитие методов оттаивания мерзлых пород с целью повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых внесли научные коллективы Института мерзлотоведения АН СССР им. В.А. Обручева, Института мерзлотоведения СО АН СССР, ВНИИ-1, ЦНИГРИ, Иргиредмета, кафедры мерзлотоведения МГУ, МГРИ, ЛГИ, МГИ и других научных организаций. Результаты этих исследований освещены в трудах В.П. Бакакина, В.Т. Балобаева, Э.И. Богуславского, Ю.М. Ведяева, В.Г. Гольдтмана, Ю.Д. Дядькина, В.В. Знаменского, А.И. Калабина, В.А. Кудрявцева, В.С. Лукьянова, Б.А. Оловина, А.В. Павлова, Г.З. Перльштейна, С.В. Потемкина, В.Г. Пятакова, А.В. Рашкина, В.М. Старкова, П.Ф. Стафеева, В.М. Харченко, С.Д. Чистопольского и др.

На основе обобщения богатейшего опыта отечественной и зарубежной горнодобывающей промышленности и теоретических исследований были разработаны способы оттаивания, которым свойственна общность по видам используемой энергии и принципам передачи тепла мерзлому массиву.

Первую классификацию способов оттаивания предложил В. Г. Гольдтман, в ней в качестве главного классификационного признака принят способ передачи тепла мерзлым породам и выделены три класса – кондуктивный, конвективный и комбинированный. Предложенная классификация сохраняет свое научное и методическое значение до сих пор.

С учетом дополнений, основанных на современных достижениях науки

и техники, она приведена в табл. 1.6.

При дражной разработке применяются главным образом те способы, в которых используется естественный источник тепла – солнечная энергия.

Способы оттаивания, основанные на кондуктивной теплопередаче потоков солнечной энергии, являются наиболее распространенными.

Таблица 1.6

**Классификация способов оттаивания мерзлых горных пород
(по В. Г. Гольдтману [23] – 1970, с дополнениями авторов)**

Класс	Способ переноса тепла	Группа	Способ оттаивания	Подгруппа	Технологические приемы и технические средства
I	Кондуктивный	1	Тепловая мелиорация	1.1	Естественное оттаивание
				1.2	Удаление растительного слоя, осушение
				1.3	Применение пленочных покрытий
		2	Послойное оттаивание	2.1	Периодическое удаление оттаявшего слоя
				2.2	Применение ускорителей
		3	Тепловые ванны	3.1	Солнечный водяной бассейн
				3.2	Применение пленочных жировых слоев на водной поверхности
				3.3	Солнечный водно-солевой бассейн
		4	Оттаивание накладными и погружными нагревателями	4.1	Накладные электрогрелки
				4.2	Погружные электрогрелки в скважинах
				4.3	Газо-пламенные погружные нагреватели
				4.4	Газо-пламенные поверхностные нагреватели
				4.5	Закрытые водяные иглы
				4.6	Горячий камень, пожар
4.7	Термохимические нагреватели				
II	Конвективный	1	Фильтрационно-дренажный	1.1	Питание и дренаж траншеями
				1.2	Питание и дренаж шурфами или скважинами
				1.3	Рыхление фильтрующих пород
		2	Дождевальн о-дренажный	2.1	Оборотное водоснабжение
				2.2	Дренаж в горные выработки
				2.3	Орошение под пленкой
		3	Фильтрацио	3.1	Погружение игл по мере оттаивания

			нно-игловой	3.2	Погружение игл бурением
				3.3	Размещение игл в скважинах
				3.4	Регулирование фильтрационного
				3.5	Гидроразрыв пласта

Окончание табл. 1.6

Класс	Способ переноса тепла	Группа	Способ оттаивания	Подгруппа	Технологические приемы и технические средства
II	Конвективный	4	Взрывогидравлический	4.1	Питание и дренаж траншеями
				4.2	Питание и дренаж шурфами или скважинами
III	Комбинированный	1	Пароигловой	1.1	Погружение игл по мере оттаивания
				1.2	Погружение игл бурением
				1.3	Применение плочных покрытий
		2	Электрофизический	2.1	Токи регулируемого высокого напряжения
				2.2	Токи промышленной частоты низкого напряжения
				2.3	Токи высокой частоты
				2.4	Электроосмос
		3	Электрогидравлический	3.1	Погружение игл бурением с последующим электрооттаиванием
				3.2	Электрооттаивание с последующим гидроразрывом пласта
		4	Физико-химический	4.1	ПАВ для регулирования тепловой мелиорации
4.2	Насыщение солевыми растворами				

Сущность способов заключается в применении приемов тепловой мелиорации, позволяющих изменять компоненты теплового баланса поверхности и повышать тепловой потенциал горных пород. При оттаивании на заданную глубину это достигается проведением подготовительных работ по осушению и удалению растительного слоя. При послойном оттаивании структуру теплового баланса изменяют периодическим удалением талого слоя.

Простые и логичные приемы тепловой мелиорации по осушению и удалению растительного покрова применялись эпизодически с самого начала

дражной разработки в условиях многолетней или сезонной мерзлоты. Первые опыты по промышленному использованию тепловой мелиорации были организованы В.П. Бакакиным в 1938 г. в верховьях р. Колымы [5, 6].

В это же время на дражных полигонах Аляски первые промышленные испытания солнечно-радиационного способа оттаивания провела компания «Аллювиал Голд Инн».

В результате золотопромышленники Аляски и Юкона на россыпях глубиной до 7,5 м повсеместно начали применять солнечную оттайку, вытеснив более дорогой способ фильтрационно-иглового оттаивания.

Опыт работы драг в условиях Аляски, Юкона, Клондайка и описание применяемых способов оттаивания приводятся в трудах О'Нейли, Кроуфорда, Пэтти, Макфарланда и Дейли.

Теоретическое и экспериментальное обоснование солнечно-радиационных методов оттаивания было дано впервые в трудах В.П. Бакакина, доказавшего возможность управления естественным теплообменом протаивающих горных пород с атмосферой с целью повышения эффективности их разработки за счет увеличения теплового потока в мерзлую толщу и глубины сезонного оттаивания в 2...3 раза. Им же была высказана идея применения светопрозрачных пленочных покрытий.

Эта идея получила отражение в исследованиях институтов ВНИИ-1, Иргиредмета, Института мерзлотоведения СО АН СССР. Модификацией способа оттаивания с пленочными покрытиями является способ с применением пленкообразующих составов, например, битумных эмульсий или синтетических смол.

Результаты экспериментальных исследований пленочных покрытий предопределили необходимость теоретического обобщения и создания методов расчета и моделирования процессов оттаивания с их применением. Разработка таких методов позволяет выявить возможности управления теплообменом с помощью теплопрозрачных покрытий и пути создания оптимальных, с точки зрения аккумуляции солнечной энергии, пленочных

покровов. В то же время детальное изучение сложного механизма теплообмена протаивающих пород в условиях резкого воздействия на основные компоненты теплового баланса представляет научный интерес.

Способ послойного оттаивания получил широкое применение в практике разработки мерзлых россыпей. Этим способом с использованием бульдозеров и скреперов оттаивают и одновременно удаляют свыше 110...120 млн. м³ горной массы в год. На дражных разработках послойное оттаивание применяют в основном до уровня воды. Иногда осуществляют понижение уровня воды траншеями или ведут вскрышу торфов с организацией водоотлива насосными станциями. Всего на дражных полигонах объемы послойного оттаивания оцениваются в 8...10 млн. м³/год.

Первые исследования структуры и динамики компонентов теплового баланса при послойном оттаивании выполнены В.Т. Балобаевым. Им же предложен метод и формулы расчета глубин послойного оттаивания с учетом теплообмена на поверхности.

Разработкой методик расчета послойного оттаивания занимались И.Т. Рейнюк, Б.А. Оловин и А.В. Павлов.

Способ тепловых ванн применяется для ускорения оттаивания. Но для этого необходимо эффективно снизить затраты тепла на испарение, достигающие 77 % от общего количества тепла, теряемого водоемом за счет теплообмена с атмосферой, в результате чего формируется тепловой поток в массив в целом меньше, чем на естественной поверхности. Исследованиями ВНИИ-1 установлено, что тепловые ванны являются мощным аккумулятором солнечной энергии при условии предотвращения испарения с их поверхности, а уменьшение испарения можно достичь путем покрытия водной поверхности молекулярным слоем масляных пленок на основе нефти и ее производных.

Способ соляного солнечного бассейна (ССБ) позволяет повысить коэффициент полезного действия солнечной энергии до 0,7...0,75. Принципиальное отличие ССБ от способа тепловых ванн заключается в

создании градиентов плотности жидкости по глубине бассейна с помощью, например, солей магния, кальция и натрия: хлористый магний $MgCl_2$ или его техническая соль бишофит $6H_2O \cdot MgCl_2$, хлористый натрий и калий $NaCl$ и KCl . Градиент плотности по глубине препятствует конвекции в растворе и уменьшает передачу тепла от нижнего придонного слоя к остывающему верхнему. В результате интенсивной аккумуляции солнечной энергии температура придонного слоя повышается до $60...90\text{ }^\circ\text{C}$.

Способы оттаивания с искусственными источниками тепла не получили применения в практике разработки россыпей и горного дела из-за высокой энергоемкости и трудоемкости работ. Действительно, на нагрев и оттаивание одного кубометра горных пород требуется $100...150$ МДж ($30...40$ кВт·ч) электроэнергии. Для создания готовых к выемке запасов в объеме $30...40\%$ годовой производительности 250-литровой драги (с учетом естественных таликов и использования солнечной энергии) необходимы энергетические мощности порядка $1...1,5$ МВт, что в $1,1...1,5$ раза больше мощностей дражных агрегатов.

Способ оттаивания газопламенными нагревателями требует большого расхода горючего и отличается высокой стоимостью работ. Термохимический способ оттаивания испытывался в 50-х годах в строительной промышленности. Он основан на использовании тепла, выделяемого при восстановлении окиси железа алюминием. По технологии способ практически не отличается от буровзрывного способа рыхления, но требует значительного расхода дорогостоящего термита.

Способы глубинного оттаивания горных пород основаны на конвективной теплопередаче. В качестве теплоносителя используется вода, нагретая в природных условиях солнечной радиацией или искусственными источниками энергии, гораздо реже используют насыщенный пар.

Фильтрационно-дренажный способ с канавным питанием впервые испытан в 1921 г. на Аляске. В России способ применялся с 1951 г. в долине р. Омчак, где оттаяно более 2 млн. m^3 горных пород [23, 24], позднее – в

комбинате «Алданзолото» и долине р. Б. Тарын комбината «Индибирзолото». Недостатком способа является большой объем подготовительных работ (до $0,34 \text{ м}^3$ на 1 м^3 оттаиваемых пород). Питание и дренирование буровыми скважинами по сравнению с канавным орошением уменьшает объем подготовительных работ и улучшает возобновление фильтрации после первого сезона оттаивания. В целом фильтрационно-дренажный способ не получил широкого распространения из-за жестких ограничений по водопроницаемости пород: коэффициент фильтрации должен быть не менее 30 м/сутки при полном отсутствии глинистых прослоек. Теория фильтрационно-дренажного способа разрабатывалась В.В. Знаменским и В.Г. Гольдтманом на основе рассмотрения процессов теплообмена в системе «атмосфера – неводонасыщенные горные породы – фильтрующие водонасыщенные талые породы – мерзлые водонепроницаемые породы» [23].

Гидроигловой способ в последние годы не нашел широкого применения из-за недостатка высокопроизводительного бурового оборудования. Для широкого применения гидроиглового способа в условиях Восточной Сибири необходимы исследования по разработке техники и технологии погружения гидроигл, в частности станков гидроударного бурения, а также исследования по управлению теплообменом с целью повышения коэффициента полезного действия и изысканию способов повышения температуры воды за счет солнечной энергии.

Способ парового оттаивания применяется для создания талых объемов на весенний период работы драги в условиях не предохраненных от промерзания полигонов. Он является наиболее дорогим и малопродуктивным.

Электрофизический способ нагрева мерзлых пород характеризуется зависимостью скорости оттаивания от электрического сопротивления пород, которое при отрицательных температурах достигает нескольких тысяч ом·м, а при оттаивании уменьшается в сотни и тысячи раз. Для повышения скорости оттаивания применяют установки высокого регулируемого напряжения или

высокочастотный прогрев.

Общим недостатком электрооттаивания является большой расход электроэнергии, высокая трудоемкость и низкая производительность труда. По этим причинам этот способ не нашел применения при разработке мерзлых россыпей.

Физико-химические способы оттаивания основаны на понижении температуры плавления льда при контакте с водорастворимыми солями. Теория такого теплообмена практически не разрабатывалась, однако экспериментальные исследования были поставлены широко как в России, так и за рубежом. Этот способ имеет невысокую стоимость подготовки пород к выемке и позволяет проводить работы в ранний весенний период, когда другие способы, например, фильтрационно-игловой или тепловая мелиорация, малоэффективны или невозможны. К недостаткам следует отнести высокий расход реагентов ($10...25 \text{ кг/м}^2$), зависимость скорости оттаивания от водопроницаемости и водонасыщенности пород, коррозионная активность засоленных горных пород.

Электро-гидроигловой способ применяется для оттаивания сверхглубоких россыпей, содержащих мощные слои водонепроницаемых горных пород. Сущность его заключается в предварительном оттаивании фильтрационно-игловым способом большей части массива с высокой водопроницаемостью и последующим оттаиванием током низкого напряжения и промышленной частоты водопроницаемых высокольдистых слоев внутри массива. Экспериментальная проверка способа на Мароканской россыпи подтвердила возможность его применения при сравнительно невысокой себестоимости.

В.Г. Гольдтман предложил также электрический способ оттаивания пород концентрацией тока путем намораживания льда между электродами и стенкой скважины и последующего нагнетания солевого раствора до образования гидроразрыва пласта на заданной глубине.

Эффективность гидравлических способов повышается при

предварительном создании зон проницаемости в мерзлом массиве и рыхлении взрывным способом.

Применительно к гидроигловому оттаиванию такие исследования под руководством проф. Ю.Д. Дядькина выполнили Ленинградский горный институт и ВНИИ-1.

Дренажно-гидроигловой способ является комбинацией конвективных способов оттаивания. Он применяется на россыпях, содержащих наряду с водопроницаемыми породами слабопроницаемые. При этом массив разделяют оттаянными фильтрационно-игловым способом полосами-щелями, что улучшает дренаж при фильтрационно-дренажном оттаивании основной части массива.

Новыми являются способы кондуктивного оттаивания пород с помощью солнечной радиации с интенсификацией тепло- массообмена в поверхностном слое электроосмотическим переносом поровой влаги и применением поверхностно-активных веществ.

Интенсификация тепло- массообмена протаивающих пород электроосмотической фильтрацией достигается созданием в поверхностном слое, т.е. слое максимальных теплооборотов, системы поверхностных и глубинных электродов и управлением электроосмотическим потоком поровой влаги в межэлектродном пространстве путем периодического изменения полярности электродов в периоды максимального потока солнечной радиации таким образом, что они попеременно становятся катодами и анодами. При солнечном нагревании в момент времени, когда поверхностные электроды являются анодами, а погруженные – катодами, поровая влага под действием электроосмотических сил перемещается вниз, нагревая более холодные слои. После перемены полярности электродов влага поступает в верхние слои и нагревается в них. Период цикла зависит от электроосмотической активности пород и тепловой нагрузки на земную поверхность. Способ применим в сочетании с пленочными покровами на глинистых породах с низким коэффициентом фильтрации.

При обработке рыхлых горных пород слабоконцентрированными растворами поверхностно-активных веществ, например окиси этилена, наблюдается увеличение эффективной теплопроводности, обусловленной переносом массы. При наличии температурных градиентов в таких породах за счет высокой подвижности молекул окиси этилена происходит увеличение термической диффузии (эффект Соре), а диффузия вещества вызывает диффузионную теплопроводность (эффект Дюфо).

Технико-экономические показатели применяемых способов оттаивания и подготовки мерзлых пород к выемке колеблются в очень широком диапазоне (табл.1.7), поэтому выбор способа оттаивания и обоснование его оптимальных параметров в общей структуре взаимосвязанных подготовительных и добычных работ представляет весьма сложную технико-экономическую задачу.

Таблица 1.7

Технико-экономические показатели способов оттаивания и подготовки мерзлых пород к выемке

Способ оттаивания и подготовки мерзлых пород к выемке	Скорость оттаивания, м/год	Трудоемкость, чел·ч/1000 м ³	Энергоемкость, кВт·ч/м ³	Себестоимость	
				р/м ³ *)	относительная
Солнечно-радиационный:					
- естественный	0,5...3,0	0,5...1,0	-	1,5...3,0	1
- под пленочным покрытием	0,8...4,5	1,5...2,5	0,1...0,2	1,8...7,5	1,2...2,5
- с послойным удалением оттаявшего слоя	5,0...20,0	10,0...25,0	0,8...1,0	3,0...7,5	2...4
Фильтрационно-игловой	5,0...20,0	15,0...60,0	3,0...4,0	7,5...21,0	5...10
Дождевально-дренажный:					
- дождевание в открытой атм.	2,5...5,5	5,0...20,0	1,0...1,5	2,4...4,5	2...3
- дождевание под пленкой	3,0...7,0	6,0...22,0	1,0...1,5	4,5...9,0	3...6
Фильтрационно-дренажный:					
- без рыхления	3,0...6,0	5,0...10,0	2,0...2,5	4,5...7,5	3...5
- с рыхлением	4,0...8,0	6,0...12,0	3,0...4,0	6,0...12,0	4...8
Электрооттаивание	-	30,0...80,0	30,0...40,0	24,0...54,0	15...20
Парооттаивание	3,0...5,0	80,0...120,0	10,0...20,0	15,0...45,0	10...15

Буровзрывное рыхление	-	100,0...180,0	0,8...1,0	60,0...90,0	20...30
Механическое рыхление	-	18,0...24,0	0,8...1,1	15,0...21,0	5...10
*) В ценах 2000 года					

Эта задача осложняется тем, что выбранный способ оттаивания существенно влияет на продолжительность подготовительных работ в целом, поэтому учет фактора времени представляется не менее важным, чем учет себестоимости энергоемкости, трудоемкости и скорости оттаивания.

В целом высокоинтенсивные способы оттаивания и подготовки мерзлых пород к выемке характеризуется значительно более высокой себестоимостью и энергоемкостью в сравнении с солнечно-радиационным способом (без удаления оттаявшего слоя).

Вместе с тем высокую скорость оттаивания или низкие затраты, присущие избранному способу, нельзя рассматривать в отрыве от технологии предохранения пород от промерзания, от технологии и интенсивности вскрыши торфов, в особенности при послойном их оттаивании и удалении, а также без учета стоимости и продолжительности использования и рекультивации земель горного отвода, без учета ценности извлекаемого полезного ископаемого, эффективности геологической и мерзлотной разведки и т.д.

Обоснование способа оттаивания на основе оптимизации всего комплекса подготовительных работ, взаимоувязанных во времени и пространстве с добычными работами, по критерию приведенной прибыли в работе.

Расчёт параметров игловой гидрооттайки

Игловая гидрооттайка – наиболее трудоемкий способ оттаивания мерзлых пород, включающий два основных процесса: установка гидроигл и нагнетание в них воды.

Перед проведением игловой гидрооттайки осуществляют подготовительные работы, включающие полное удаление растительного и

илистого слоя до галечников, планировку поверхности, на которой будет производиться оттайка, проведение выработок водозабора и водоотведения, осушение оттаиваемого полигона.

Вода в каждую иглу подается из специальных распределителей. Ее количество регулируется специальной задвижкой. Подаваемая в иглы вода должна быть чистой и не содержать взвесей более 50 мг/л. Продолжительность действия иглы (T , сут) зависит от температуры воды в водоеме, из которого ее подают [4, 12]:

$$T = \frac{0,866 \times L^2 \times H_0 \times Q_{уд}}{c_e \times \rho_B \times W \times \alpha \times t_B \times 24}; \quad (3.48)$$

$$T = \frac{0,895 \times b^{2,234} \times \left(\frac{i}{W}\right)^{0,707} \times (0,1 H_0 + 1) \times e^{0,02(t_B - 10)}}{t_B}, \quad (3.49)$$

где L – шаг установки игл, м;

H_0 – глубина оттаивания, м;

$Q_{уд}$ – затраты тепла на нагревание и оттаивание 1 м³ горных пород, кДж / м³;

c_e – удельная теплоёмкость воды, $c_B = 4,187$ кДж / (кг °С),

$\rho_B = 1000$ кг / м³ – плотность воды;

W – расход воды на иглу, м³ / ч;

t_B – температура нагнетаемой в иглу воды, °С;

K_B – средний за время действия иглы коэффициент относительной боковой теплоотдачи воды восходящего фильтрационного потока в талике цилиндрической формы, рассчитывают через критерий теплового подобия Фурье, по приближенным формулам или принимают по справочным данным (см. Потемкин, 1991, табл.3, стр.15), в приближенных расчетах принимают $K_B = 0,4 \dots 0,5$.

Затраты тепла на нагревание и оттаивание 1 м³ пород определяют по формуле (3.34) или по табл. 3.10.

В формуле (3.40) параметр b принимается в зависимости от шага игл (см. Потёмкин, 1991, с.79).

После определения продолжительности действия иглы рассчитывают:

- годовую производительность иглы (P_u , м³ / сезон) [2, 12, 14]

$$P_u = 0,866 \times L^2 \times H_o; \quad (3.50)$$

- общее число игл ($N_{общ}$, шт.) [1, 12]

$$N_{общ} = \frac{1,15 \times S}{L^2}; \quad (3.51)$$

- число одновременно работающих игл (при $T = 0,5 T_{общ}$) [12]

$$N_o = \frac{T \times (N_{общ} - N_{пр})}{(T_{общ} - T)}, \quad (3.52)$$

если $T > 0,5 T_{общ}$, то $N_o = N_{общ} - N_{пр}$;

- производительность насосной станции (W_n , м³/ч)

$$W_n = N_o \times W; \quad (3.53)$$

- суммарный расход воды на оттаивание пород участка (W_o , м³)

$$W_o = 24 \times W \times T \times N_{общ}, \quad (3.54)$$

где S – площадь оттаиваемого участка, м²;

$N_{пр}$ – число игл, для которых бурение и оттаивание пород производилось в прошлом сезоне;

$T_{общ}$ – продолжительность всего сезона оттаивания (тёплый период), сут.

Для технико-экономического обоснования удельного расхода воды на иглу необходимо вычислить затраты на погружение игл и затраты на нагнетание воды через иглы.

Затраты на бурение (Z_b , р / год) определяют по формуле

$$Z_b = N_{общ} \times H_b \times \left[\frac{c_b + A}{(P_b \times T_{общ} \times 24)} \right], \quad (3.55)$$

где H_b – глубина бурения (обычно $H_b = H_o - 1,5$), м;

c_{σ} – себестоимость бурения (включает заработную плату бурильщиков, стоимость изношенных игл и буровых коронок), р / м;

A – затраты на ремонт и амортизацию бурового станка, р / год;

P_{σ} – средняя за сезон производительность бурового станка, м / ч.

Затраты на нагнетание воды определяют по формуле (р / год)

$$Z_n = c_w \times W_o + 24 \times c_m \times T_{\text{общ}} + Z_m, \quad (3.56)$$

где c_w – себестоимость нагнетания воды в иглы (включая затраты на электроэнергию для насосов, смазочные материалы, замену изношенных деталей), р / м³;

c_m – расходы на заработную плату персонала, обслуживающего насосную станцию, систему водоснабжения и действующие иглы, р/ч;

Z_m – затраты на монтаж и демонтаж насосного оборудования, магистральных и распределительных трубопроводов, р / год.

Суммарные и удельные затраты определяют по формулам:

$$Z_n = Z_{\sigma} + Z_n; \quad (3.57)$$

$$Z_{y0} = Z / (S \times H_o). \quad (3.58)$$

Расчёты выполняют для нескольких вариантов расхода воды через иглу – обычно в диапазоне $W = 0,5 \dots 3,5$ м³ / ч. При этом руководствуются следующими указаниями и рекомендациями. В хорошо проницаемых породах с коэффициентом фильтрации более 20 м/сут увеличение расхода воды сокращает продолжительность действия иглы и повышает суточную производительность оттайки.

В слабопроницаемых породах с высоким содержанием глинистых и пылеватых частиц увеличение расхода воды способствует образованию в талике суффозионных каналов, по которым вода-теплоноситель без существенной теплоотдачи выносится из оттаиваемого массива.

Предельно большие расходы назначают в зависимости от коэффициента фильтрации пород и глубины погружения иглы (табл. 3.19).

Таблица 3.19

Наибольший расход воды на иглу в зависимости от свойств пород и глубины погружения [1]

Характеристика пород	Коэффициент фильтрации, м / сут	Наибольший расход при глубине погружения, м ³ / ч	
		менее 12 м	более 12 м
Суглинки и супеси пылеватые (илистые), однородные с включениями гравия, дресвы гальки, щебня, валунов	Менее 3	1,1	1,5
Песок однородный или с гравием и галькой	3 - 8	2,1	2,5
Гравий с песком и галькой	8 - 20	3,6	4,1
Галька с гравием и песком	Более 20	Не ограничивается	

В неоднородных породах и массивах расход воды назначают с учётом мощности и водопроницаемости слоёв.

Принятый расход не должен превышать пропускную способность иглы (гидравлические расчёты системы водоснабжения выполняют по соответствующим инструкциям и методическим указаниям [1]). Практически предельный расход воды через иглу длиной 10 м при внутреннем диаметре 20 мм не может превышать 2,5 м³ / ч и при внутреннем диаметре 28 мм пропускная способность иглы той же длины не превышает 4 м³ / ч.

Пример №7

Определить технико-экономические показатели гидроигловой оттайки мерзлых горных пород, если средняя температура воды $t_g = 10$ °С, площадь участка оттайки $S = 10000$ м², глубина оттаивания $H_o = 8$ м, содержание льда в породе (льдиность) $G = 250$ кг / м³, температура мёрзлых горных пород $t_m = -2,0$ °С, продолжительность тёплого периода $T_{общ} = 2160$ ч (90 сут).

Шаг иглы $L = 4,0$ м. Число предварительно пробуренных игл $N_{np} = 10$ % от общего числа $N_{общ}$, производительность бурового станка $P = 1,5$ м / ч, себестоимость бурения $c = 100$ р / м, себестоимость нагнетания 1 м³ воды c_w

= 40 р / м³, амортизация и ремонт бурового станка $A = 400$ тыс. р / год, временные затраты на водоснабжение участка (зарплата персонала) $c_m = 1000$ р / ч, затраты на монтаж-демонтаж оборудования $Z_m = 750$ тыс.р / сезон.

Решение:

1. Затраты тепла на нагревание и оттаивание 1 м³ пород определяются по формуле 3.10.

$$Q_{уд} = 0,8 \times 2650 \times \left(\frac{1-250}{917} \right) \times \left(\frac{0,5}{10^{*}) + 2,0} \right) + 250 \times \left(\frac{0,5}{10^{*}) \times 4,187 + 2,0 \times 2,26 + 333,6} \right) =$$

$$= 100558 \text{ кДж/м}^3$$

*) - температуру талых пород t_m можно принимать по соотношению $t_m = \frac{(0,4 - 0,5)}{t_B}$.

2. Продолжительность действия иглы:

- по формуле (3.48)

$$T = \frac{0,866 \times 4^2 \times 8 \times 100588}{4,187 \times 1000 \times 0,5 \times 0,45 \times 10 \times 24} = 49,35 \text{ сут};$$

- по формуле (3.49)

$$T = \frac{(0,895 \times 4,7) \times \left(\frac{250}{0,5} \right)^{0,707} \times (0,11 \times 8,0 + 1) \times 2,718^{\left[\left(\frac{0,02}{10} \right)^{-10} \right]}}{10} = 64 \text{ сут.}$$

3. Производительность иглы (формула 3.50)

$$P_u = 0,866 \times 4^2 \times 8 = 111 \text{ м}^3 / \text{сезон.}$$

4. Общее число игл (формула 3.51)

$$N_{общ} = \frac{1,15 \times 10000}{4^2} = 719 \text{ игл.}$$

5. Число одновременно работающих игл (формула 3.41)

$$N_o = 719 - 72 = 647 \text{ игл (т.к. } T = 50 \text{ или } T = 64 \text{ сут, т.е. более } 0,5 \times 90 = 45 \text{ сут).}$$

6. Производительность насосной станции (формула 3.43)

$$W_n = 647 \times 0,5 = 324 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

1. Суммарный расход воды на оттаивание пород участка (формула 3.44)

$$W_o = 24 \times 0,5 \times 50 \times 719 = 431\,400 \text{ м}^3,$$

или $W_o = 24 \times 0,5 \times 64 \times 719 = 552\,200 \text{ м}^3.$

2. Затраты на бурение (формула 3.45)

$$Z_6 = 719 \cdot (8 - 1,5) \cdot \left[\frac{1000 + 400000}{(1,5 \cdot 90 \cdot 24)} \right] = 5,25 \text{ млн р.}$$

9. Затраты на нагнетание воды (формула 3.46)

$$Z_n = 40 \cdot 431400 + 24 \cdot 1000 \cdot 90 + 750000 = 20,17 \text{ млн р,}$$

или $Z_n = 40 \cdot 522200 + 24 \cdot 1000 \cdot 90 + 750000 = 25,00 \text{ млн р.}$

10. Суммарные затраты (формула 3.47)

$$Z = 5,25 + 20,17 = 25,42 \text{ млн р,}$$

или $Z = 5,25 + 25,00 = 30,25 \text{ млн р.}$

11. Удельные затраты (формула 3.48)

$$Z_{уд} = \frac{25,42 \cdot 10^6}{(8 \cdot 10000)} = 318 \text{ р / м}^3,$$

или $Z_{уд} = \frac{30,25 \cdot 10^6}{(8 \cdot 10000)} = 378 \text{ р / м}^3.$

Аналогично выполнены расчёты для расходов воды $W = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 \text{ м}^3 / \text{ч}$. Результаты расчётов приведены в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Основные технико-экономические показатели гидрооттайки *)

($S = 10 \text{ тыс. м}^2, H_o = 8 \text{ м}, G = 250 \text{ кг / м}^3, t_e = 10 \text{ }^\circ\text{C}, T_{общ} = 90 \text{ сут}$)

Показатели	Расход воды (W), м ³ / ч				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Продолжительность действия иглы (T, сут)	<u>50</u> 64	<u>25</u> 39	<u>17</u> 29	<u>13</u> 24	<u>10</u> 21
Число одновременно действующих игл (N ₀ , шт.)	<u>647</u> 647	<u>249</u> 495	<u>145</u> 308	<u>103</u> 235	<u>81</u> 197
Производительность насосной станции (W _н , м ³ / ч)	<u>324</u> 324	<u>249</u> 495	<u>217</u> 461	<u>206</u> 470	<u>202</u> 492
Суммарный расход воды на оттаивание пород участка (W _о , тыс. м ³)	<u>431</u> 552	<u>431</u> 673	<u>431</u> 751	<u>431</u> 828	<u>431</u> 906
Затраты на бурение (Z _б , млн р.)	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
Затраты на нагнетание воды (Z _н , млн р.)	<u>20,17</u>	<u>20,17</u>	<u>20,17</u>	<u>20,17</u>	<u>20,17</u>

	25,00	29,83	32,95	36,03	39,15
Суммарные затраты на гидрооттайку (3, млн р.)	<u>25,42</u> 30,25	<u>25,42</u> 35,08	<u>25,42</u> 38,20	<u>25,42</u> 41,28	<u>25,42</u> 45,61
Удельные затраты ($Z_{уд}, р / м^3$)	<u>318</u> 378	<u>318</u> 453	<u>318</u> 493	<u>318</u> 531	<u>318</u> 570

*) – в числителе результаты расчетов с использованием формулы (3.48), в знаменателе – формулы (3.49)

Расчёты показывают, что использование формулы (3.48) по сравнению с формулой (3.49) занижает продолжительность действия иглы, число одновременно действующих игл и потребную производительность насосной станции.

Эта формула не позволяет выявить зависимость суммарных и удельных затрат от расхода воды.

Зависимость суммарных и удельных затрат от расхода воды обусловлена уменьшением коэффициента боковой теплоотдачи при увеличении расхода воды через иглу. Поэтому при расчётах целесообразно коэффициент теплоотдачи определить по формуле

$$K_6 = 0,052 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot H_0}{W}}, \quad (3.59)$$

где λ – теплопроводность талых водонасыщенных пород Вт / (м °С).

Как видно из расчётов (по формуле 3.49), минимальные затраты на гидрооттайку мерзлых горных пород достигаются при наименьших расходах воды.

Однако при этом необходимо иметь большое количество одновременно действующих игл (например, при $W = 0,5 \text{ м}^3 / \text{ч}$ – 647 игл, а при $W = 2,5 \text{ м}^3 / \text{ч}$ – 197 игл), что повлечёт увеличение затрат, фактически не отражённых в формуле (3.55).

Задание для самостоятельной работы №7

1. Выполнить расчет гидроигловой оттайки мерзлых горных пород.

2. Выполнить анализ полученных результатов и сделать соответствующие выводы.

Исходные данные представлены в табл. 3.21, 3.22.

Температуру мерзлых горных пород и продолжительность тёплого периода года принять по данным табл. 3.5. Льдистость горных пород – по табл. 3.13.

При использовании формулы (3.59) коэффициент теплопроводности талых водонасыщенных пород принимать по результатам задачи №2 для соответствующего варианта.

Таблица 3.21

Исходные данные к расчету параметров игловой гидрооттайки

Номер варианта	Глубина оттаивания, H_o , м	Шаг иглы, L , м	Расход воды, W , м ³ /ч	Температура воды, $t_в$, °С	Площадь участка, S , тыс. м ²	Число предварительно пробуренных игл N_{np} , % от их общего числа $N_{общ}$
1	4	2,0	0,8	11,0	40	10
2	5	2,5	1,8	10,5	50	15
3	6	3,0	0,9	9,8	60	12
4	7	3,5	2,0	10,1	70	15
5	8	4,0	1,1	9,8	80	14
6	9	4,5	2,2	9,5	90	16
7	10	5,0	2,3	8,5	100	20
8	11	5,5	2,4	8,1	55	10
9	12	6,0	2,5	9,2	45	17
10	14	6,5	2,6	12,0	35	10
11	10	5,5	2,7	11,9	30	15
12	20	7,5	2,8	10,2	110	10

Затраты на монтаж оборудования (Z_m , р /сезон) в вариантах принимать пропорционально объёму оттаиваемых пород на участке

$$Z_m = 10 \times H_o \times S. \quad (3.60)$$

Например, для варианта №3

$$Z_m = 10 \cdot 6 \cdot 60000 = 3600000, \text{ р / сезон.}$$

Таблица 3.22

Исходные данные к расчету технико-экономических показателей гидрооттайки

Номер варианта	Производительность бурового станка, P_b , м / ч	Себестоимость бурения, c_b , р / м	Себестоимость нагнетания, c_w , р / м ³	Повременные затраты, c_m , р / ч	Амортизация и ремонт, A , р / год
1	1,0	500	10	800	200000
2	1,1	600	15	900	250000
3	1,2	700	20	1000	300000
4	1,3	800	25	1100	350000
5	1,4	900	30	1200	400000
6	1,5	1000	35	1300	450000
7	1,6	1100	40	1400	500000
8	1,7	1200	45	1500	550000
9	1,8	1300	50	1600	600000
10	1,9	1400	55	1700	650000
11	2,0	1500	60	1800	700000
12	2,1	1600	65	1900	750000
13	2,2	1700	70	2000	800000
14	2,3	1800	75	2100	850000