

## **Новые технологии и способы оттаивания сезонных и многолетнемерзлых горных пород**

Большая часть золотоносных россыпных месторождений северо-восточных районов России поражена либо сплошной, либо островной многолетней мерзлотой. Вместе с тем, низкая среднегодовая температура атмосферного воздуха, незначительный снежный покров, наличие инверсии способствуют глубокому сезонному промерзанию горного массива. За продолжительный период с отрицательными среднесуточными температурами атмосферного воздуха, золотоносные пески и рыхлые отложения вскрыши, включающие гальку, гравий, песок, глину и дресву промерзают до 4,0-5,0 м и приобретают высокую прочность. Например, при переходе массива горных пород в мерзлое состояние (температура минус 1°С) энергозатраты, необходимые для его разрушения, повышаются в 10...15 раз. Поэтому выемка мерзлых горных пород драгами, экскаваторами, бульдозерами не эффективна или практически невозможна без качественного проведения специальных подготовительных работ по их оттаиванию.

Чтобы обеспечить фазовый переход пород из мерзлого – в талое состояние, на горнодобывающих предприятиях используют естественный источник энергии – солнечное тепло, т.к. более 60 % территории России, включая районы Забайкальского края, характеризуются существенным среднегодовым поступлением солнечной энергии от 3,5 до 4,5 кВт·ч/м<sup>2</sup> в день.

На дражных и гидромеханизированных разработках россыпей за счет солнечно-радиационного оттаивания мерзлых пород ежегодно подготавливаются к выемке десятки миллионов кубометров горной массы. Однако естественная солнечно-радиационная оттайка характеризуется низким коэффициентом использования солнечной энергии и не позволяет в сжатые сроки подготовить полигоны для более эффективной отработки. Поэтому при добыче драгоценного металла из россыпных месторождений, расположенных на

севере и северо-востоке страны, и в частности в районах с неблагоприятным суровым климатом и сложными горно-геологическими условиями, например, в Забайкальском крае, необходимо интенсифицировать процессы естественного оттаивания пород за счет повышения коэффициента использования солнечной энергии.

На протяжении нескольких десятков лет сотрудниками кафедры открытых работ Забайкальского государственного университета под руководством д.т.н., проф. А.В. Рашкина выполнялись научно-исследовательские работы по изысканию путей интенсификации оттаивания мерзлых пород. За этот период нами был разработан, запатентован и апробирован в производственных условиях целый ряд новых, эффективных способов оттаивания мерзлых горных пород, основанных на более полном использовании естественного источника тепла – солнечной энергии. Сравнительная оценка основных технико-экономических показателей естественного оттаивания мерзлых пород, гидроиглового, фильтрационно-дренажного и новых, разработанных на кафедре ОГР, способов оттайки приведена в таблице 5.4.

*Таблица 5.4*

**Технико-экономические показатели  
оттаивания мёрзлых пород в Забайкальском крае**

Способ оттаивания и подготовки мерзлых горных пород к выемке	Скорость оттаивания, м / год	Трудоемкость, чел ч / 1000 м <sup>3</sup>	Энергоемкость, кВт-ч / м <sup>3</sup>	Себестоимость (в относит. ед.)
Солнечно-радиационный:				
- естественный;	0,5-3,0	0,5-1,0	-	1,0
- под пленочным покрытием;	0,8-4,5	1,5- 2,5	0,1- 0,2	1,2-2,5
- с послойным удалением талого слоя;	5,0-20,0	10,0-25,0	0,8- 1,0	2,0- 4,0
- соляной солнечный бассейн	6,0-10,0	5,0-10,0	0,1- 0,2	1,2-2,5

Гидравлический: - фильтрационно-игловой; - с тепловыми ваннами; - электро-гидроразрыв пласта	5,0-20,0 5,0-20,0 5,0-20,0	15-60 5-10 25-60	3,0- 4,0 2,0-2,5 4,0-5,0	5,0-10,0 3,0-5,0 10,0-15,0
Дождевально-дренажный: - дождевание в атмосфере; - дождевание под пленкой	2,5- 5,5 3,0- 7,0	5-20 6-22	1,0- 1,5 1,0- 1,5	2,0- 3,0 3,0- 6,0
Фильтрационно- дренажный: - без рыхления; - с рыхлением бороздовых оросителей; - с использованием соляных солнечных нагревателей в траншеях -взрывогидравлический фильтрационно- дренажный	3,0- 6,0 4,0- 8,0 6,0-8,0 6,0-12,0	5-10 6-12 5-12 10-25	2,0- 2,5 3,0- 4,0 0,8- 1,2 2,5- 3,0	2,0- 4,0 4,0- 8,0 3,0-5,0 5,5- 10,0
Парооттаивание	3,0- 5,0	80- 120	10,0-20,0	10,0-15,0

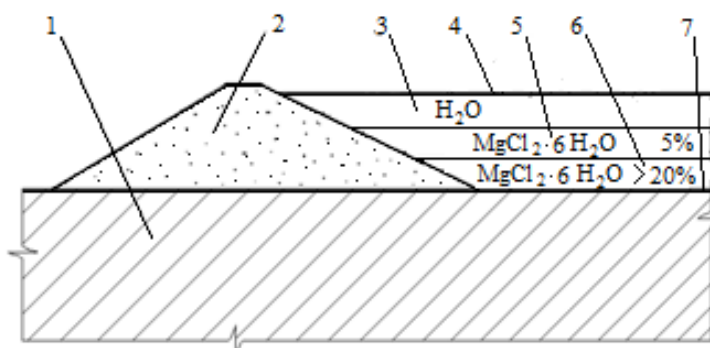
На основании проведенных исследований разработана методика подготовки мерзлых горных пород к выемке в суровых климатических условиях, позволяющая с высокой точностью прогнозировать параметры оттаивания мерзлого массива. Основные положения методики базируются на результатах научно-исследовательских работ с учетом практического опыта горнодобывающих предприятий Забайкальского края.

Одним из путей повышения эффективности солнечно-радиационной оттайки является применение тепловых ванн, создание которых требует минимальных трудозатрат на сооружение водоподпорных дамб или водоудерживающих плотин и заполнение полигонов водой из поверхностных водотоков. Однако идеи тепловых ванн не нашли широкого практического применения из-за значительных потерь тепловой энергии в результате испарения воды с поверхности водоема и слоевой диффузии, под действием которой нагретые за счет солнечной радиации нижние слои воды, имея

меньшую плотность, поднимаются к поверхности, а верхние – наоборот опускаются вниз. Использование соляного солнечного бассейна с активацией теплообмена в придонном слое, позволяет снизить до минимума эти недостатки тепловых ванн и повысить коэффициент полезного действия солнечной энергии до 0,70-0,75 [34, 165].

Соляной солнечный бассейн (рис. 5.14) – это водоем глубиной 1...2 м с концентрированным рассолом в придонном слое.

Принцип работы соляного солнечного бассейна – это аккумуляция тепловой солнечной энергии слоями водных растворов солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  или технической соли магния  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (бишофит). Благодаря созданию в водоеме вертикального градиента плотности возникает температурный градиент, способствующий повышению температуры рассола в придонном слое.



**Рис. 5.14. Схема соляного солнечного бассейна [191]:**

1 – мерзлые горные породы; 2 – водоподпорная плотина; 3 – слой пресной воды; 4 – тонкий слой технического масла; 5 – изолирующий (градиентный) слой с увеличивающейся книзу концентрацией водного раствора технической соли магния (бишофит); 6 – слой горячего рассола с максимальной концентрацией; 7 – зачерненное дно водоема

Для создания ССБ сооружают водоподпорную плотину или дамбу. Мерзлые горные породы оттаиваемого участка, предварительно покрытого слоем черной полиэтиленовой пленки, заливают слоями водных растворов соли

(более двух слоев) со ступенчатым понижением её концентрации от нижних слоёв к верхним [143, 165, 191].

В нижней – придонной части бассейна размещают слой рассола с максимальной концентрацией реагента в воде, вышерасположенный изолирующий слой, а он может быть представлен несколькими прослойками, заполняют водным раствором с повышающейся к низу концентрацией. Верхний слой соляного солнечного бассейна заполняется пресной водой с нулевой концентрацией реагента.

В процессе преобразования солнечной энергии в тепловую к.п.д. соляного солнечного бассейна значительно снижается за счет процесса испарения воды с поверхности водоема. При этом потери энергии значительно выше общих потерь энергии, теряемых водоемом за счет теплообмена с окружающей средой. Поэтому для снижения испарения воды на поверхность водоема наносится тонкий молекулярный слой технического масла. Снижение энергоемких затрат тепла на конвективный перенос и испарение дает возможность значительно повысить температуру массива мерзлых горных пород, увеличить скорость оттаивания и в целом усилить теплотехнический эффект соляного солнечного бассейна в 1,5...2 раза.

Для снижения тепловых потерь за счет диффузии в отдельно взятом слое и на контакте между слоями толщина одного слоя принимается минимально возможной (до 0,35 м).

Суммарная мощность (толщина) всех слоев соляного солнечного бассейна не должна превышать 1,0...2,0 м. Поэтому в зависимости от величины ступени изменения концентрации растворов в слоях общее количество слоев может изменяться от 3 до 5.

Селективно прозрачные для коротковолнового и длинноволнового излучений водные растворы солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  практически полностью пропускают поглощаемую поверхностью оттаиваемых горных пород

коротковолновую солнечную радиацию и вместе с тем задерживают длинноволновое излучение от поверхности оттаиваемых горных пород.

Техническая соль магния (бишофит)  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  легко растворимая, она позволяет при низких температурах окружающей среды создавать водные растворы высокой концентрации, поэтому является наиболее приемлемой для проведения исследований и создания соляного солнечного бассейна по сравнению с менее растворимыми солями хлористого натрия  $\text{NaCl}$  или хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$ .

Физической основой возможности получения таких высоких температур вблизи дна бассейна является подавление гравитационной конвекции — всплытия нагретой Солнцем вблизи дна жидкости вверх под действием архимедовой силы, т.к. плотность жидкости падает с ростом температуры. Чистая пресная вода подчиняется этому закону: по мере нагрева из-за термического расширения плотность уменьшается и нагретая вода всплывает вверх, отдавая тепло воздуху, а её место замещает холодная. Устанавливается непрерывный процесс конвекции с переносом теплоты от нагретого солнцем дна вверх и отдача ее воздуху [110, 150]. В соляном солнечном бассейне такой конвекции нет, потому что у крутосоленого рассола большой плотности, находящегося у дна, по мере нагрева плотность повышается из-за роста растворимости соли в воде и этот эффект пересиливает действие расширения жидкости. Соль в горячей воде растворяется быстрее, чем в холодной, в основном благодаря диффузии. Следовательно, при нагреве придонного слоя кристаллы соли быстрее переходят в рассол, увеличивая его плотность.

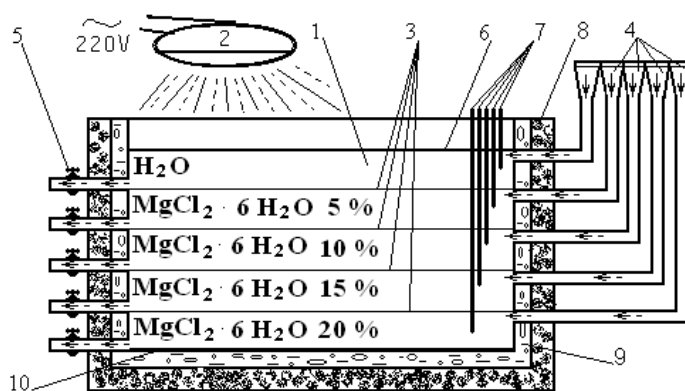
Основную часть энергии в солнечном спектре несут коротковолновые и ультрафиолетовые лучи, которые слабо поглощаются в толще воды и достигают дна.

Итак, в таком бассейне часть солнечного излучения — инфракрасного спектра полностью поглощается верхним слоем пресной воды, коротковолновое

– более низкими средними изолирующими слоями, а не поглощенная часть излучения, прошедшего сквозь воду, — темным дном. Теплопроводность существенно слабее конвекции, так что вблизи дна рассол будет нагреваться до упомянутых величин.

Для изучения и исследования теплового режима создана модель соляного солнечного бассейна с зачерненным дном (рис. 5.15) [143, 152, 160]. Модель соляного солнечного бассейна представляет собой емкость, выполненную из органического стекла высотой 0,3 м, длиной 0,5 м, шириной 0,3 м, заполненную пятью слоями водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  различной концентрации, но одинаковой толщины равной 0,05 м. Верхний слой модели заполняется чистой водой. Общая глубина ССБ составляет 0,25 м.

Концентрация водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  в каждом слое сохранялась постоянной.



**Рис. 5.15. Модель соляного солнечного бассейна:**

1 – слой воды; 2 – светильник; 3 – полиэтиленовая пленка или тонкие пластины оргстекла; 4 – воронки для подачи водных растворов технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  с различной концентрацией; 5 – вентиль; 6 – пленка специального масла; 7 – термометры; 8 – теплоизолятор (пенопласт толщиной 0,08 м); 9 – емкость ССБ; 10 – зачерненное дно

Придонный слой соляного солнечного бассейна заполняли раствором бишофита 20 % концентрации.

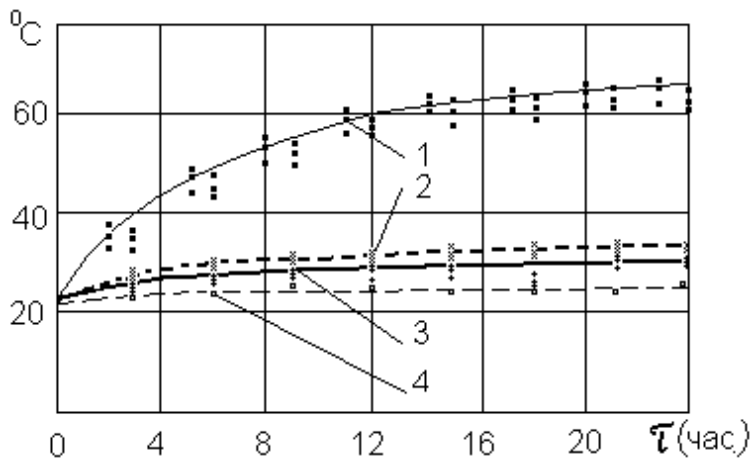
В вышерасположенных слоях концентрация раствора бишофита изменялась ступенчато с шагом 5 %. Слои водных растворов технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  разделяли тонким перфорированным оргстеклом (отверстия диаметром 1,5-2 мм).

В опытах были использованы светильники с люминесцентными лампами типа ЛБУ-30 (4 шт.), лампой накаливания мощностью 250 Вт, и ксеноновой короткодуговой – типа ДКсТВ-6000.

В процессе опытов применялись стандартные методика и приборы: температура воды и раствора в каждом слое на глубине 0,05 м, 0,10 м, 0,15 м, 0,20 м, 0,25 м измерялась ртутными термометрами, температура воздуха – термографом М-16. Температура окружающего воздуха изменялась от 22,4 до 24,7 °С.

Самую высокую температуру в процессе нагревания ССБ приобретает нижний придонный слой раствора, т.к. лучистая энергия поглощается зачерненным дном и передается в жидкость нижнему слою. Самая низкая температура наблюдается в верхнем слое с чистой водой. Понижение температуры воды в нем происходит за счет интенсивного теплообмена с окружающим атмосферным воздухом.

Температура раствора в нижнем слое ССБ за 12 часов работы светильника с люминесцентными лампами ЛБУ-30 увеличилась на 10 °С. Температура воды верхнего слоя при этом возросла лишь на 3-4 °С (рис. 5.16).



**Рис. 5.16. Изменение температуры придонного слоя ССБ и атмосферного воздуха:**

1, 2, 3 – температура придонного слоя при нагревании ССБ соответственно ксеноновой короткодуговой лампой ДКсТВ-6000; лампой накаливания мощностью 250 Вт; светильником с люминесцентными лампами ЛБУ-30; 4 – температура атмосферного воздуха

Температура раствора в нижнем слое ССБ за 12 часов работы светильника с люминесцентной и лампой накаливания возросла на 12...14 °С (см. рис. 5.16). После включения ксеноновой короткодуговой лампы ДКсТВ-6000 температура придонного слоя водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O}\cdot\text{MgCl}_2$  через 12 часов нагревания повысилась на 38...40 °С. При этом абсолютное значение температуры в придонном слое ССБ достигло 50...60 °С (см. рис. 5.16).

Температура воды в верхнем слое модели возросла в среднем на 10-12 °С. Причем при выключенной лампе температура придонного слоя за один час остывания модели снижается незначительно на 2-3 °С, а температура верхнего слоя понижается в три раза быстрее на 6-8 °С.

Корреляционный анализ выполненных исследований позволил установить корреляционные связи и подобрать функцию изменения температуры придонного слоя ССБ в зависимости от времени нагревания и вида применяемого источника излучения тепловой энергии (табл. 5.5).

*Таблица 5.5*

**Коэффициенты функций парной корреляции температуры придонного слоя соляного солнечного бассейна**

Вид применяемого источника тепловой энергии, регрессионная зависимость	Коэффициент корреляции	Погрешность аппроксимации	Коэффициенты регрессии	
			<i>A</i>	<i>B</i>
Ксеноновая лампа	0,96	± 2,96	23,63	13,21
Лампа накаливания	0,93	± 1,35	21,29	4,68
Люминисцентная лампа $t = A + B \cdot \lg(\tau)$	0,91	± 1,11	22,40	3,09

Данное регрессионная зависимость имеет высокую степень надежности (аппроксимации): коэффициенты корреляции более 0,91, а стандартные отклонения – доверительные границы (по Стьюденту с вероятностью  $P = 0,95$ ) не превышают  $\pm 3$ .

Результаты проведенных опытов подтверждают возможность и высокую эффективность применения соляного солнечного бассейна как аккумулятора тепловой энергии, которая может быть использована для оттаивания мерзлых пород при разработке золотоносных россыпных месторождений.

Достоверность экспериментальных исследований подтверждена признанием приоритета работ патентом Российской Федерации №2276236.

Анализ методов решения задач оттаивания-промерзания горных пород показывает, что для оценки способов оттаивания с применением соляного солнечного бассейна приемлемы аналитические решения задачи Стефана на основе приближенных методов, а также численные решения с использованием конечно-разностных методов и методы математического моделирования.

Скорость оттаивания мерзлых пород ( $\xi$ , м / сут) при использовании соляного солнечного бассейна в основном зависит от температуры придонного слоя раствора и воздуха, льдистости горных пород и периода оттайки

$$\xi = \delta \sqrt{\frac{2 \times \lambda_T \times t_n \times \tau \times K}{Q_\phi}}, \quad (5.49)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий замедление скорости сезонного оттаивания пород из-за оттока тепла в мерзлый грунт, изменяется от 0,6 до 1,0;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности талых пород, Вт/(м · °С);  $t_n$  – температура придонного слоя соляного солнечного бассейна, °С;  $\tau$  – период оттаивания, сут;  $K$  – коэффициент учитывающий неоднородность рыхлых отложений;  $Q_\phi$  – теплота фазового перехода, Дж/м<sup>3</sup>

$$Q_\phi = 93 \times G, \quad (5.50)$$

где  $G$  – льдистость горных пород, кг/м<sup>3</sup>.

Аналитические расчеты показали, что при температуре придонного слоя 50...60 °С скорость оттаивания мерзлых пород достигает 5...15 м/год.

В то же время детальное изучение сложного механизма теплообмена протаивающих пород и определение к.п.д. соляного солнечного бассейна в условиях воздействия на основные компоненты теплового баланса представляет научный и практический интерес.

Поток солнечной энергии ( $q_{над}$ , Вт/м<sup>2</sup>), падающий на единицу поверхности бассейна можно определить из уравнения баланса тепла [34, 165]

$$q_{над} = q_{отр} + q_{a.p} + q_{ном} + q_{пол}, \quad (5.51)$$

где;  $q_{отр}$  – энергия, отражаемая поверхностью, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{a.p}$  – энергия, аккумулируемая раствором, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{ном}$  – энергия, теряемая бассейном в результате теплообмена с окружающей средой, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{пол}$  – полезная энергия, затрачиваемая на оттаивание мерзлых горных пород, Вт/м<sup>2</sup>.

Последние три слагаемых в формуле (5.51) численно равны солнечной энергии, проникающей через поверхность бассейна. Используя средний интегральный коэффициент отражения ( $R$ ), определим отраженную энергию

$$q_{отр} = Rq_{над}. \quad (5.52)$$

Отношение полезной работы к затраченной определяет к.п.д. тепловой машины. Поэтому, если под полезной работой принять количество солнечной энергии, отдаваемое соляным солнечным бассейном мерзлым породам ( $q_{пол}$ ), а под затраченной работой солнечную энергию, падающую на поверхность бассейна ( $q_{над}$ ), то к.п.д. ( $\eta$ ) бассейна определяется из выражения [34]

$$\eta = q_{пол} / q_{над}. \quad (5.53)$$

Суммарная солнечная энергия, падающая на поверхность бассейна, складывается из прямой и рассеянной радиаций [1, 5].

Подставив (5.51) и (5.52) в (5.53) и выполнив необходимые преобразования, определим

$$\eta = 1 - [R + (q_{ном} / q_{над}) + (q_{a.p} / q_{над})]. \quad (5.54)$$

Потери энергии на теплообмен с окружающей средой ( $q_{ном}$ ) складываются из потерь на испарение ( $q_u$ ), конвективный ( $q_k$ ) и лучистый ( $q_l$ ) теплообмен

$$q_{ном} = q_u + q_k + q_l. \quad (5.55)$$

Суммарные потери тепла на теплообмен с окружающей средой путем конвекции и излучения можно определяются по формуле

$$q_k + q_l = (\alpha_k + \alpha_l)(T_n - T_g), \quad (5.56)$$

где  $T_n$  – температура поверхностного слоя бассейна;  $T_g$  – температура воздуха;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи к воздуху;  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием.

Количество солнечной энергии, аккумулируемое в бассейне, состоящим из  $n$  горизонтальных слоев раствора, внутри каждого из которых все параметры сохраняются неизменными и изменяются лишь при переходе от слоя к слою, за время  $\Delta\tau$ , можно представить в виде

$$q_{a.p} = h \left[ \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_i \Delta T_i) \right] / \Delta\tau, \quad (5.57)$$

где  $h$  – толщина рассматриваемого слоя, одинаковая для всех слоев, м;  $C_i$  – удельная теплоемкость рассматриваемого слоя раствора, кДж/(кг $^{\circ}$ С);  $\gamma_i$  – удельный вес рассматриваемого слоя раствора, зависящий от концентрации, кг/м $^3$ ;  $\Delta T_i = (T_{i, k+1} - T_{i, k})$  – изменение температуры  $i$ -го слоя,  $^{\circ}$ С в интервале времени  $\Delta\tau$ , ч.

Записывая падающую солнечную энергию в виде суммы прямой и рассеянной радиации

$$q_{na\partial} = q_n + q_p \quad (5.58)$$

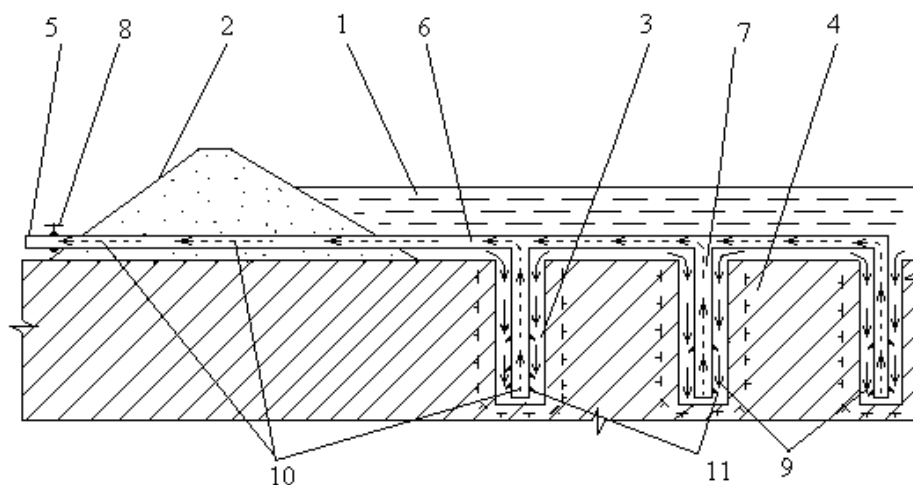
и подставляя (5.57, 5.58) в (5.55), получим

$$\eta = 1 - [R + (\alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda})(T_n - T_e)/(q_n + q_p) + h/(q_n + q_p) \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_i \Delta T_i)]. \quad (5.59)$$

Формула (5.59) показывает, что к.п.д. является функцией времени, поскольку значения  $\Delta T$ ,  $T_n$  и  $T_e$  зависят от времени. Она учитывает влияние основных факторов, определяющих теплообмен в соляном солнечном бассейне.

Сочетание тепловых ванн с известной фильтрационно-игловой оттайкой позволяет значительно сократить затраты на нагнетание воды через иглы в скважины и повысить скорость оттаивания мерзлых пород (рис. 5.17).

При этом подача теплоносителя к мерзлым породам происходит за счет гравитации непосредственно по скважине, а охлажденная вода удаляется из забоя скважины по водозаборному патрубку.



**Рис. 5.17. Способ оттаивания мерзлых горных пород и грунтов: пат. 2276236 Рос. Федерация. № 2004134004/03; заявл. 22. 11.2004; опубл. 10.05. 2006. Бюл. №13:**

1 – подогретая за счет солнечной энергии вода (теплоноситель); 2 – водоподпорная дамба; 3 – скважина; 4 – сезонно- и многолетнемерзлые породы; 5 – водосбросный патрубок; 6 – магистральный трубопровод; 7 – водозаборный патрубок; 8 – вентиль; 9 – направление движения теплоносителя; 10 – направление движения охлажденной воды; 11 – металлические пластины

Ускорение оттаивания пород происходит за счет повышения кондуктивно-конвективной теплоотдачи солнечной энергии, аккумулированной водой, мерзлым породам.

Общие затраты тепла на нагревание и оттаивание всего участка мерзлых пород ( $Q_{общ}$ , кДж / м<sup>3</sup>) определяются по формуле:

$$Q_{общ} = Q_{уд} \times S \times H_{от}, \quad (5.60)$$

где  $S$  – площадь участка оттайки, м<sup>2</sup>;  $H_{от}$  – глубина оттаивания, м;  $Q_{уд}$  – удельные затраты энергии на нагревание и оттаивание 1м<sup>3</sup> мерзлых пород, кДж / м<sup>3</sup> [92]

$$Q_{уд} = c_n \times \rho_n [1 - (G / \rho_l)] (t_m - t_{-m}) + G (-t_m \times c_l + t_m \times c_v + L), \quad (5.61)$$

где  $\rho_n$ ,  $\rho_l$  – соответственно плотность пород и льда, кг / м<sup>3</sup>;  $c_n$ ,  $c_l$ ,  $c_v$  – соответственно удельная теплоемкость пород, льда и воды, кДж / (кг·°C);  $G$  –

льдистость горных пород, кг / м<sup>3</sup>;  $t_m, t_M$  – температуры талых и мерзлых пород, °С;  $L$  – скрытая теплота плавления льда, равная 334 кДж / кг.

Время оттаивания мерзлых пород затопленного участка ( $T$ , сут.) определяется по формуле:

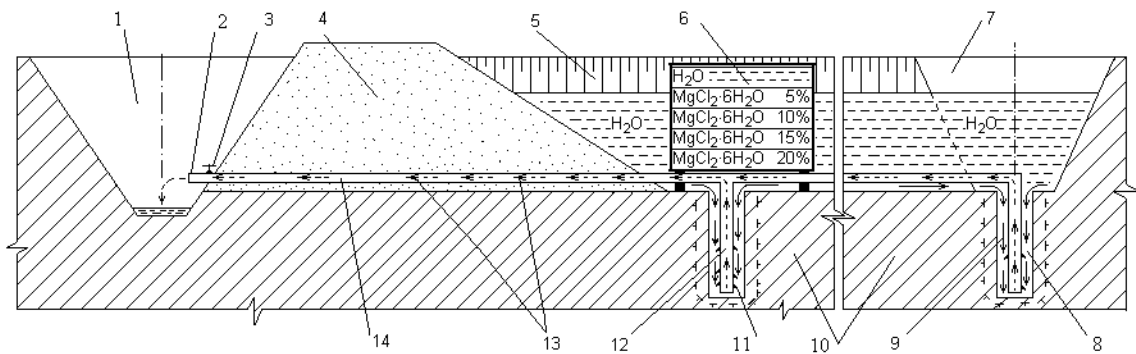
$$T = 0,866 \times b^2 \times H_{om} \times Q_{yd} / (24 \times c_e \times \rho_e \times W \times K_b \times t_e), \quad (5.62)$$

где  $b$  – расстояние между скважинами в ряду, м;  $c_e$  – удельная теплоёмкость воды,  $c_e = 4,187$  кДж / (кг °С),  $\rho_e = 1000$  кг / м<sup>3</sup> – плотность воды;  $W$  – расход воды на выходе водосбросного патрубка, м<sup>3</sup> / ч;  $K_b$  – средний коэффициент относительной боковой теплоотдачи воды нисходящего фильтрационного потока в талике цилиндрической формы, в приближенных расчетах принимают  $K_b = 0,4 \dots 0,5$ ;  $t_e$  – температура воды на затопленном участке, °С.

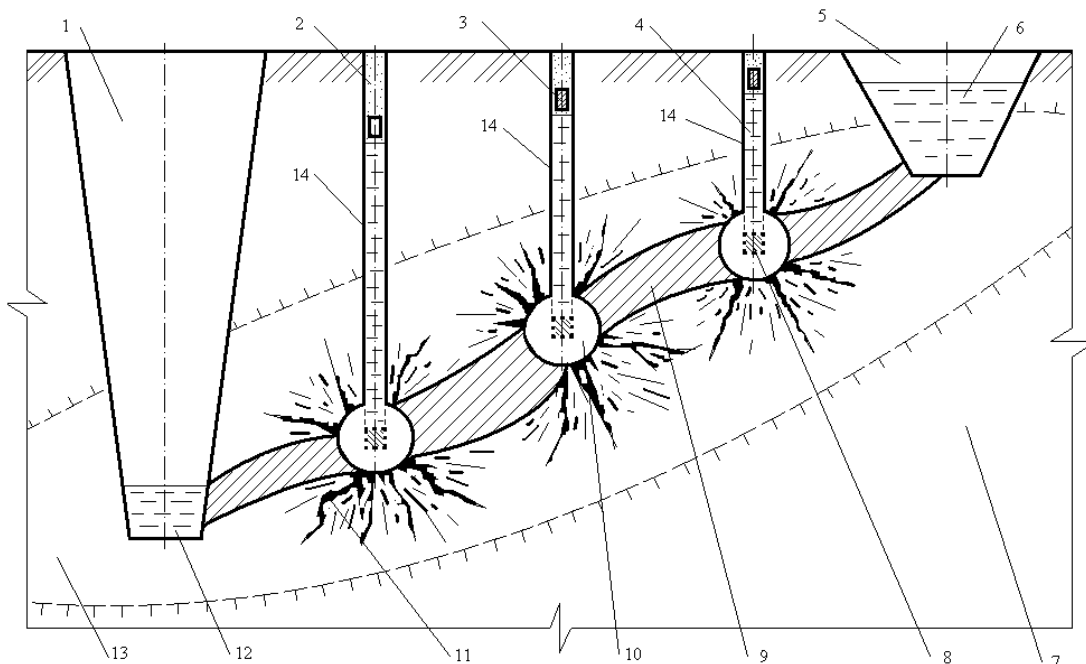
При соблюдении технологии ведения работ и расходе воды-теплоносителя от 0,5 до 2,5 м<sup>3</sup> / ч скорость оттаивания мерзлых пород может достигать 10-20 м за сезон.

Фильтрационно-дренажный способ оттаивания мерзлых горных пород в последствие был усовершенствован путем установки в питающей и оросительных канавах для подогрева воды соляных солнечных нагревателей (рис. 5.18) и созданием внутри мерзлого массива расширяющихся зон проницаемости со значительным наклоном в направлении от питающей (5) к дренажной (1) канаве (рис. 5.19).

Наклонные зоны проницаемости обеспечивают непрерывное естественное (создаваемого силами гравитации) движение теплоносителя и многократное увеличение кондуктивно- конвективного теплообмена с мерзлыми горными породами.



**Рис. 5.18. Способ оттаивания мерзлых пород: пат. 2315155 Рос. Федерация. № 2006107354/03; заявл. 09. 03.2006; опубл. 20.01. 2008. Бюл. № 2. 6 с.:**  
 1 – дренажная траншея; 2 – водосбросный патрубок; 3 – вентиль; 4 – плотина; 5 – питающая канава; 6 – соляной солнечный нагреватель; 7 – питающая канава; 8 – скважина; 9 – направление движения подогретой воды по скважине; 10 – мерзлый массив; 11 – металлические пластины для создания турбулентного потока; 12 – водозаборный патрубок; 13 – направление движения охлажденной воды по трубам; 14 – магистральный трубопровод



**Рис. 5.19. Способ гидравлического оттаивания мерзлых пород: пат. 2380488 Рос. Федерация. №**

**2008143861/03; заявл. 05. 11. 2008; опубл. 27.01. 2010. Бюл. № 3. 6 с.:**  
 1 – дренажная канава; 2 – забойка; 3 – запирающий заряд взрывчатого вещества; 4 – вода, содержащая поваренную соль; 5 – питающая канава; 6 – подогретая за счет солнечной энергии воды (теплоноситель); 7 – мерзлый массив горных пород; 8 – камуфлетный заряд взрывчатого вещества; 9 – наклонный фильтрационный канал; 10 – камуфлетная полость; 11 – трещины камуфлетного взрыва; 12 – охлажденная дренажная вода; 13 – зона оттаивания горных пород; 14 – взрывные скважины

Способ оттаивания мерзлых пород с использованием наклонных фильтрационных каналов осуществляется в следующей последовательности (см. рис. 5.19): с помощью бульдозера удаляют почвенно-растительный слой; проходят питающую канаву (5) глубиной 0,5-0,7 м; на расстоянии более 20 м от нее создают дренажную канаву (1) глубиной до коренных пород; с помощью буровых станков в мерзлом массиве (7) бурят параллельно друг другу линейные ряды взрывных скважин (14) с увеличением их глубины в ряду и соответственно массы камуфлетного заряда взрывчатого вещества (8)

Наклонные зоны проницаемости обеспечивают непрерывное естественное (создаваемого силами гравитации) движение теплоносителя и многократное увеличение кондуктивно-конвективного теплообмена с мерзлыми горными породами.

Способ оттаивания мерзлых пород с использованием наклонных фильтрационных каналов осуществляется в следующей последовательности (см. рис. 5.19): с помощью бульдозера удаляют почвенно-растительный слой; проходят питающую канаву (5) глубиной 0,5-0,7 м; на расстоянии более 20 м от нее создают дренажную канаву (1) глубиной до коренных пород; с помощью буровых станков в мерзлом массиве (7) бурят параллельно друг другу линейные ряды взрывных скважин (14) с увеличением их глубины в ряду и соответственно массы камуфлетного заряда взрывчатого вещества (8) в направлении от питающей (5) к дренажной (1) канаве.

Взрывание камуфлетных зарядов в ряду производится с замедлением в направлении от питающей канавы к дренажной. При подаче взрывного импульса вначале взрывается запирающий заряд (3).

Увеличение массы заряда ВВ в скважинах по направлению к дренажной канаве позволяет создать расширяющийся наклонный фильтрационный канал (9).

В питающую канаву (5) самотеком подают подогретую за счет солнечной энергии воду (6), которая по расширяющемуся наклонному фильтрационному каналу (9) дренирует за счет сил гравитации в дренажную канаву (1) и обеспечивает путем кондуктивно-конвективного теплообмена фазовый переход горных пород из мерзлого (7) состояния в талое (13).

Проведенные исследования и сравнительный анализ полученных результатов показывают, что в сложных горногеологических условиях Забайкальского края применение новых способов оттаивания мерзлых пород является целесообразным.

### **ОТВЕТИТЬ НА ВОПРОСЫ:**

1. Основные законы термодинамики, параметры и единицы.
2. Современная теория развития мерзлых толщ.
3. Значение и связь термодинамики с другими науками.
4. Теплофизические основы сезонного промерзания и протаивания.
5. Термодинамическая система, обратимые и необратимые процессы.
6. Свойства мерзлых горных пород и их строение.