

Лекция 5

ПОДГОТОВКА МЕРЗЛЫХ ПОРОД К РАЗРАБОТКЕ

КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ОТТАИВАНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Подготовка мерзлых горных пород к разработке в суровых климатических условиях входит неотъемлемой частью в комплекс строительных и открытых горных работ.

Основными способами подготовки являются подготовка пород взрывом, механическое рыхление, оттайка мерзлых пород и предохранение пород от промерзания.

Значительный вклад в развитие методов оттаивания мерзлых пород 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.Т. Балобаева, В.П. Бакакина, Э.И. Богуславского, Ю.М. Ведяева, В.Г. Гольдтмана, Ю.Д. Дядькина, В.В. Знаменского, А.И. Калабина, В.С. Лукьянова, В.И. Наточинского, Б.А. Оловина, А.В. Павлова, Г.З. Перльштейна, С.В. Потемкина, В.Г. Пятакова, А.В. Рашкина, В.М. Старкова, П.Ф. Стафеева, Н.Н. Страбыкина, В.М. Харченко, С.Д. Чистопольского и др.

В связи с интенсивным промышленным освоением северо-восточных районов России и значительным увеличением объемов производства строительных и открытых горных работ в криолитозоне задачи подготовки мерзлых пород к выемке, особенно оттаивание мерзлых пород и предохранение от сезонного промерзания, приобретают большое значение.

В настоящее время эти проблемы являются актуальными, так как северные и северо-восточные районы России характеризуется сложными, специфическими горно-геологическими, геокриологическими и природно-климатическими условиями.

Например, температурный режим Забайкальского края формируется под влиянием холодных областей севера и северо-востока Сибири.

Из-за продолжительного зимнего периода, составляющего около 170 сут, низкой среднегодовой температуры воздуха (минус 1,9...6,5 °С), а также незначительного снежного покрова (150...500 мм) на территории Забайкалья наблюдается повсеместное распространение многолетней мерзлоты (15...100 %).

При этом теплофизические свойства горных пород в мерзлом состоянии резко изменяются.

За счет увеличения связей между отдельными частицами минерального скелета горные породы приобретают очень высокую прочность.

Например, временное сопротивление сдвигу мерзлого суглинка при температуре (минус 2 °С) в 10...20 раз больше, чем талого. Поэтому разра-

ботка мерзлых пород не эффективна или практически невозможна без их предварительного оттаивания и предохранения талых пород от сезонного промерзания.

Практика дражной разработки россыпных месторождений показывает, что наиболее перспективными, эффективными являются способы, основанные на использовании естественных возобновляемых энергоресурсов (солнечной энергии, аккумулированной в воде).

Повышение степени использования солнечной энергии всего лишь на 3...4 % дает возможность увеличить глубину оттаивания мерзлых пород за сезон на 1 м.

Однако применяются эти способы совершенно недостаточно (не более 10 %). Поэтому для повышения производительности горных машин и в целом дражного флота необходима разработка новых и совершенствование известных способов оттаивания мерзлых горных пород, основанных на более полном использовании солнечной энергии.

Вопрос о тепловой мелиорации горных пород при добыче россыпного золота в области многолетней мерзлоты в суровых климатических условиях Восточной Сибири впервые поставил П.И.Колосков в 1911-1915 гг., а первые опыты по промышленному использованию тепловой мелиорации были организованы В.П. Бакакиным в 1938 г. в верховьях р. Колымы. Им же была высказана идея применения светопрозрачных пленочных покрытий, которая получила отражение в исследованиях институтов ВНИИ-1, Ирриредмета, Института мерзлотоведения СО АН СССР, и в дальнейшем получила весьма существенное развитие в теоретических и экспериментальных исследованиях д-ра техн. наук, проф. А.В. Рашкина.

Первую классификацию способов оттаивания мерзлых горных пород предложил В.Г. Гольдтман [1].

В ней в качестве главного классификационного признака принят способ передачи тепла мерзлым породам и выделены три класса – кондуктивный, конвективный и комбинированный.

Предложенная классификация до сих пор сохраняет свое научное и методическое значение.

С учетом дополнений, основанных на современных достижениях науки и техники, она приведена в табл. 2.1.

При дражной разработке нашли применение немногие из известных способов оттаивания, главным образом те, в которых используется естественный источник тепла – солнечная энергия.

Таблица 2.1

**Классификация способов оттаивания мерзлых горных пород
(по В.Г. Гольдтману [1] с дополнениями авторов)**

Класс	Способ переноса тепла	Группа	Способ оттаивания	Под-группа	Технологические приемы и технические средства
-------	-----------------------	--------	-------------------	------------	---

	Кондуктивный	Тепловая мелиорация		1	Естественное оттаивание		
				.1			
				1	Удаление растительного слоя, осушение		
		Послойное оттаивание		Тепловые ванны		1	Применение пленочных покрытий
						.2	
						2	Периодическое удаление оттаявшего слоя
						2	Применение ускорителей оттаивания
		Оттаивание накладными и погружными нагревателями				3	Солнечный водяной бассейн
						3	Применение пленочных жировых слоев на водной поверхности
						.2	
						3	Солнечный водно-солевой бассейн
						.3	
						4	Накладные электрогрелки
		И	Кондуктивный	Фiltrация		4	Погружные электрогрелки в скважинах
						.2	
						4	Газо-пламенные нагреватели
				Дождевальное-дренажное			
4	Закрытые водяные иглы						
4	Горячий камень, пожог						
4	Термохимические нагреватели						
Фiltrация игловой				1	Питание и дренаж траншеями		
				1	Питание шурфами и скважинами		
				1	Рыхление фильтрующих пород		
				2	Оборотное водоснабжение		
				2	Дренаж в горные выработки		
				2	Орошение под пленкой		
				.1	Погружение игл по мере оттаивания		
				3	Погружение игл бурением		
				3	Размещение игл в скважинах		
				.4	Регулирование фильтрационного потока		
Взрывогидравлический				3	Гидро разрыв пласта		
				4	Питание и дренаж траншеями		
				.2	Питание и дренаж шурфами или скважинами		

Окончание табл. 2.1

класс	Способ переноса тепла	группа	Способ оттаивания	подгруппа	Технологические приемы и технические средства
II	Комбинированный		Игло-вой	.1	Погружение игл по мере оттаивания
				.2	Погружение игл бурением

			.3	Применение пленочных покрытий
	Электрофизический		.1	Токи регулируемого высокого напряжения
			.2	Токи промышленной частоты низкого напряжения
			.3	Токи высокой частоты
			.4	Электроосмос
	Электрогидравлический		.1	Погружение игл бурением с последующим электрооттаиванием
			.2	Электрооттаивание с последующим гидроразрывом пласта
	Физико-химический		.1	ПАВ для регулирования тепловой мелиорации
			.2	Насыщение солевыми растворами

Способы оттаивания, основанные на кондуктивной теплопередаче потоков солнечной энергии, являются наиболее распространенными. К ним относятся тепловая мелиорация, послойное оттаивание, тепловые ванны. Сущность способов заключается в применении приемов тепловой мелиорации (естественное оттаивание, морозобойное растрескивание, удаление растительного слоя, осушение, применение пленочных покрытий), позволяющих изменять компоненты теплового баланса поверхности и повышать тепловой потенциал пород.

Составляющая прямой солнечной радиации (Q' , Вт / м²) на горизонтальную площадку (S , м²) зависит от высоты солнца над горизонтом α и определяется по формулам [5, 12]:

$$Q' = Q_1 \times S', \quad (2.1)$$

где Q_1 – тепловой поток прямой солнечной радиации, Вт;

$$S' = S \times \sin \alpha; \quad (2.2)$$

$$\sin \alpha = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \tau, \quad (2.3)$$

где δ – склонение солнца;

τ – часовой угол солнца;

φ – географическая широта места наблюдений.

Прямая и рассеянная солнечная радиация входят в коротковолновый спектр с длиной волны $1,7 \cdot 10^{-7} \dots 4,0 \cdot 10^{-7}$ м (99 % теплового потока с длиной волны свыше $2,9 \cdot 10^{-7}$ м) и образуют суммарную радиацию (Q , Вт / м²) [9]:

$$Q = Q' + q, \quad (2.4)$$

где q – рассеянная солнечная радиация, Вт/м².

На земной поверхности поток суммарной радиации перераспределяется и часть ее отражается пропорционально альбедо поверхности (A , %), а другая часть (B_{κ} , Вт / м²) поглощается поверхностью:

$$B_{\kappa} = Q - R; \quad (2.5)$$

$$A = 100 \times R / Q. \quad (2.6)$$

На земную поверхность так же поступает часть длинноволнового (длина волн $4 \cdot 10^{-7} \dots 40 \cdot 10^{-7}$ м) излучения атмосферы (E_a , Вт / м²) и одновременно излучается в виде собственного излучения (E_z , Вт / м²), а их разность составляет эффективное излучение ($E_{эф}$, Вт / м²):

$$E_{эф} = E_z - E_a. \quad (2.7)$$

Результирующая лучистого теплообмена – радиационный баланс (B , Вт / м²) представляет алгебраическую сумму составляющих солнечной радиации [5]:

$$B = Q' + q + E_a - R - E; \quad (2.8)$$

$$B = Q - R - E_{эф}. \quad (2.9)$$

Радиационный баланс положителен, если результирующий поток направлен к земле и, следовательно, земная поверхность поглощает больше радиации, чем отдает, и наоборот, – отрицателен, если приходная часть меньше расходной.

Конвективный поток тепла (V , Вт) определяется по формуле М.П. Тимофеева:

$$V = 942 \times K_1 \times \Delta t, \quad (2.10)$$

где K_1 – коэффициент турбулентности, м² / с:

$$K_1 = 0,16 \times u_1 \times D \times [1 + (7,5 \times \Delta t) / u_1^2], \quad (2.11)$$

где Δt – разность температур воздуха на высотах 0,5 и 2,0 м, °С;

u_1 – скорость ветра на высоте $z = 1$ м, м / с;

D – коэффициент шероховатости:

$$D = 1 / (\ln 1 / z_0), \quad (2.12)$$

где z_0 – параметр шероховатости.

Затраты тепла на испарение (L , Вт) определяются по методу турбулентной диффузии [4]:

$$L = 1,47 \times K_1 \times \Delta e \times 10^5, \quad (2.13)$$

где Δe – разность упругости водяного пара на высоте 0,5 и 2,0 м, Па.

Практика ведения открытых горных работ, а также теоретические исследования показывают высокую эффективность и надежность применения известных способов солнечно-радиационного оттаивания мерзлых горных пород. При этом осушение поверхности и вскрыша растительного покрова в наибольшей степени влияют на глубину и скорость оттаивания [13].

Однако все применяемые интенсивные способы оттаивания мерзлых золотоносных россыпей характеризуются, как правило, высокой себестоимостью и энергоёмкостью, и это ограничивает их применение, а естественный солнечно-радиационный способ имеет низкий коэффициент использования солнечной энергии и длительный период оттаивания мерзлых пород. Например, за летний сезон глубина оттаивания мерзлых пород естественным солнечно-радиационным способом в северо-восточных районах Забайкальского края не превышает 2,2 м [15].

Наиболее приемлемым способом подготовки мерзлых дражных полигонов при вскрыше торфов является послойное оттаивание.

Структуру теплового баланса при послойном оттаивании мерзлых пород изменяют периодическим удалением талого слоя.

Этим способом с использованием бульдозеров, бульдозеро-рыхлителей и скреперов оттаивают и одновременно удаляют свыше 110...120 млн м³/год горных пород [4, 12].

На дражных полигонах применение послойного оттаивания ограничивается возможностями и эффективностью использования мощной землеройной техники, урезом воды и мощностью золотоносного пласта.

Разработкой методик расчета послойного оттаивания занимались В.Т. Балобаев, Б.А. Оловин, А.В. Павлов и И.Т. Рейнюк. Экспериментальные исследования по применению способов послойного оттаивания приведены в работах Н.К. Ключкина, К.В. Кошлакова, Л.Н. Морозова и Г.А. Сулина. При этом установлена эмпирическая зависимость между временем и эффективностью послойного оттаивания

$$h = \tau / (a + b\tau), \quad (2.14)$$

где h – мощность оттаявшего слоя, м;

τ – время оттаивания слоя, сут;

a – эмпирический коэффициент, $a = 0,066...0,128$;

b – эмпирический коэффициент, $b = 0,036...0,047$.

3.3. Практическая работа №5.

Расчет солнечно-радиационного оттаивания мерзлых горных пород

Среди известных способов оттаивания мерзлых горных пород выделяют естественные способы и способы оттаивания с искусственным источником тепла.

В практике ведения горных работ под естественным способом оттаивания принято называть совокупность приемов горнотехнической тепловой мелиорации, направленных на ускорение оттаивания под действием лучистой энергии солнца. Осушение поверхности и удаление растительного покрова в наибольшей степени влияют на глубину и скорость оттаивания. Удаление снега в Забайкальском крае не влияет на ускорение оттаивания.

Оттайка мерзлых пород солнечной радиацией происходит под действием тепло- и массообменных процессов в системе «атмосфера приземного воздуха – искусственное покрытие – поверхностный слой талых пород – подвижная граница фазового перехода – мерзлые породы». В поверхностном слое выделяется подсистема «поверхность – слой суточных колебаний температуры». Формирующиеся поля температуры, влажность пород, динамика движения границы фазового перехода зависят от этих процессов и свойств оттаиваемого массива.

Чтобы выявить пути повышения эффективности оттаивания пород, необходимо установить количественные закономерности в формировании потоков тепла и влаги, а также их связи с полями температуры и влажности.

Способы оттаивания с искусственными источниками тепла не получили широкого применения в практике ведения горных и строительных работ.

Главным образом нашли применение те способы оттайки мерзлых пород, в которых используется естественный источник тепла – солнечная энергия.

Способы оттаивания, основанные на кондуктивной теплопередаче потоков солнечной энергии, являются наиболее распространенными. К ним относятся тепловая мелиорация; послойное оттаивание; тепловые ванны; оттаивание погружными и накладными нагревателями.

Сущность способов заключается в применении приемов тепловой мелиорации (естественное оттаивание, удаление растительного слоя, осушение, применение пленочных покрытий), позволяющих изменять компоненты теплового баланса поверхности и повышать тепловой потенциал горных пород.

Способы глубинного оттаивания горных пород основаны на конвективной теплопередаче. Теплоносителем является вода, нагретая в природных условиях солнечной радиацией. К ним относятся фильтрационно-дренажное, дождевально-дренажное, гидроигловое и взрывогидравлическое оттаивание.

Комбинированные способы оттаивания горных пород и грунтов применяются в ограниченных масштабах из-за большого расхода электроэнергии, высокой трудоемкости и низкой производительности. К ним относятся паро-игловая, электрофизическая, электрогидравлическая и физико-химическая оттайка.

Глубину оттаивания под действием солнечной радиации определяют по формуле [4]:

$$h_{om} = -(\lambda_m / N) + \sqrt{(\lambda_m / N)^2 + (2\lambda_m / Q_\phi) \times (M / N - 273) \times \tau - (\lambda_m \times t_m / Q_\phi) \times \sqrt{\tau / (\pi \times a_m)}}, \quad (3.11)$$

где τ – продолжительность оттаивания (продолжительность тёплого периода, когда температура воздуха выше 0 °С), ч;

Q_ϕ – удельная теплота фазового перехода ($Q_\phi = 93 \cdot G$ Вт · ч / м³, здесь G – льдистость, кг / м³);

λ_m, λ_m – коэффициенты теплопроводности талых и мёрзлых пород, Вт/(м · °С);

a – коэффициент температуропроводности мёрзлых пород, м²/ч, $a_m = \lambda_m / C_{om}$, здесь C_{om} – объёмная теплоёмкость мёрзлых пород, Вт · ч / (м³ · °С);

t_m – среднегодовая температура мёрзлых пород, °С;

$M, \text{Вт} / \text{м}^2; N, \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ – средние за тёплый период значения

параметров теплообмена, рассчитываются отдельно для «естественного» способа и для способа оттаивания с применением теплопрозрачных покрытий в зависимости от значений метеопараметров по формулам [4]:

1) «естественный» способ

$$M_e = (1 - A) \cdot Q + K_1 + K_2 \times e + (K_3 + K_4 \times e) \times V + [K_5 + (K_6 - K_7 \times e) \times V] \times t_e, \quad (3.12)$$

$$N_e = K_8 + K_9 \times V + K_{10} \times t_e, \quad (3.13)$$

где $K_1 \dots K_{10}$ – постоянные коэффициенты, характеризующие вид поверхности, для «естественного» способа оттаивания принимают: $K_1 = 4060$, $K_2 = 0,057$, $K_3 = 1980$, $K_4 = 0,038$, $K_5 = 24,6$, $K_6 = 3,72$, $K_7 = 131 \cdot 10^{-6}$, $K_8 = 15,4$, $K_9 = 7,32$, $K_{10} = 0,052$;

A – альбедо (коэффициент отражения коротковолновой солнечной радиации);

Q – среднее за тёплый период значение потока солнечной радиации, Вт/м²;

V – среднее значение скорости ветра, м / с;

t_e – средняя за тёплый период температура воздуха, °С;

e – упругость водяного пара, н / м²;

2) оттаивание с применением теплопрозрачных покрытий [4]:

$$M_n = \lambda_n / \varphi \times \{ \alpha_1 \times T_e + Q \times [1 - \rho_1 \times (1 - A_e) - A_n - A_e \times \rho_1^2 \times (1 - 2 \times A_n) - \alpha] - L_n \} + (1 + \delta_n \times \alpha_1 / \varphi \times \{ Q[\alpha / 2 + \rho_1 \times (1 - A_e)] + (1 - A^1 - \alpha^1 / 2) \times (4,9 \times T_o - 50 - 0,1 \times Q) \}). \quad (3.14)$$

$$N_n = (\alpha_2 + 2,27 \times \alpha_3 / \delta_e^{0,25}) \times [1 + (\alpha_1 \times \delta - \lambda) / \varphi] + 4,9(1 - A^1 - \alpha^1 / 2) \times (1 + \delta \times \alpha_1 + \delta \times \alpha_1 / \varphi). \quad (3.15)$$

где $\alpha_1 = 6,164 + 3,605 \cdot V; \quad (3.16)$

$$\alpha_2 = 4,77 \cdot [1 + (0,55 - 1370 \cdot \delta_n) \cdot V]; \quad (3.17)$$

$$\alpha_3 = 0,37 \cdot [1 + (1,72 - 3440 \cdot \delta_n) \cdot V]; \quad (3.18)$$

$$\varphi = \alpha_1 \cdot \lambda_n / (\alpha_2 + 2,27 \cdot \alpha_3 / \delta_e^{0,25}) - \alpha_1 \cdot \delta_n + \lambda_n, \quad (3.19)$$

где δ_e – высота установки покрытия (толщина воздушного промежутка), м;

δ_n – толщина покрытия, м;

ρ_1 , α – интегральные коэффициенты пропускания и поглощения покрытия с учётом многократного отражения лучистых потоков между поверхностями пород и покрытия, определяются по формулам [4]:

$$\rho_1 = \exp(-k \times \delta) - \Delta\rho_1; \quad (3.20)$$

$$\alpha = 1 - A_n - \rho_1 \times (1 - A_e \times A_n), \quad (3.21)$$

где A_e – альbedo открытой увлажнённой поверхности пород;

A_n – альbedo покрытия;

k – коэффициент ослабления (для плёнки $k = 2,6 - 3,7$);

$\Delta\rho_1$ – относительное ослабление лучистого коротковолнового потока слоем конденсата ($\Delta\rho_1 = 0,03 - 0,04$);

α^l – коэффициент поглощения энергии покрытием в длинноволновом диапазоне;

A^l – коэффициент отражения длинноволнового излучения покрытием;

λ_n – коэффициент теплопроводности покрытия, Вт / (м⁰С);

L_n – средняя интенсивность энергозатрат на испарение осадков, (по экспериментальным наблюдениям $L_n = 12,9$ Вт / м);

T_o – температура открытой поверхности, °К, определяется по формуле [4]:

$$T_o = (273 \times \lambda_m + h_{om} \times M_e) / (\lambda_m + h_{om} \times N_e). \quad (3.22)$$

В формуле (3.11) при оттайке под пленкой необходимо (λ_m) умножить на коэффициент 1,2. При этом срок оттаивания мерзлых горных пород (τ) нужно увеличить на 10...15 сут.

Пример №3

Выполнить расчёт солнечно – радиационного оттаивания мёрзлых горных пород для следующих условий (табл. 3.6):

Таблица 3.6

Метеопараметры района разработки месторождения (р. Бодайбо)

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Солнечная радиация	Q	Вт/м ²	170
Средняя температура воздуха за теплый период года	t_{θ}	°С	+10,5
Скорость ветра	V	м/с	1,5
Упругость водяного пара	e	н/м ²	1050
Продолжительность теплого периода	τ	сут	148
Температура мёрзлых пород	t_m	°С	- 2,1

Тепловые свойства пород: коэффициенты теплопроводности соответственно талых и мёрзлых пород $\lambda_m = 1,04$ Вт / (м·°С), $\lambda_{\text{м}} = 1,3$ Вт / (м·°С); льдистость $G = 248$ кг / м³; объёмная теплоёмкость мёрзлых пород $c_{om} = 519$ Вт·ч / (м³·°С).

Характеристика теплопрозрачного покрытия: высота установки $\delta_{\theta} = 0,05$ м, толщина пленки $\delta_n = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м; коэффициенты отражения $A_z = 0,08$, $A_n = 0,17$, $A^l = 0,1$, $A = 0,12$; коэффициенты поглощения $\alpha = 0,028$, $\alpha^l = 0,43$; коэффициент пропускания $\rho_l = 0,813$; коэффициент теплопроводности $\lambda_n = 0,2$ Вт / (м · °С).

Учитывая суровые условия района р. Бодайбо, принять в мае 26 дней оттайки, или 624 час.

Решение:

1. Определяем глубину оттаивания при естественном способе по формуле 3.11, предварительно рассчитав коэффициенты M_e и N_e по формулам 3.12, 3.13.

$$M_e = (1 - 0,12) \cdot 170 + 4060 + 0,057 \cdot 1050 + (1980 + 0,038 \cdot 1050) \cdot 1,5 + \\ + [24,6 + (3,72 - 131 \cdot 10^{-6} \times 1050) \cdot 1,5] \cdot 10,5 = 8152,674 \text{ Вт/м}^2; \quad N_e = \\ 15,4 + 7,32 \cdot 1,5 + 0,052 \cdot 10,5 = 26,93 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

Удельная теплота кристаллизации воды – плавления льда определяется как произведение скрытой теплоты кристаллизации воды и льдистости пород:

$$Q_{\Phi} = 93 \cdot 248 = 23064 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3.$$

Тогда глубина оттаивания на конец мая составит:

$$h_{i\delta} = -(1,04/26,93) + \sqrt{(1,04/26,93)^2 + (2 \cdot 1,04/23064) \cdot (8152,7/26,93 - 273) \cdot 624 - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{624/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})}} = 1,21 \text{ м};$$

на конец июня:

$$h_{i\delta} = -(1,04/26,93) + \sqrt{(1,04/26,93)^2 + (2 \cdot 1,04/23064) \cdot (8152,7/26,93 - 273) \cdot 1344 - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{1344/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})}} = 1,80 \text{ м};$$

на конец июля:

$$h_{i\delta} = -(1,04/26,93) + \sqrt{(1,04/26,93)^2 + (2 \cdot 1,04/23064) \cdot (8152,7/26,93 - 273) \cdot 2088 - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{2088/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})}} = 2,26 \text{ м};$$

на конец августа:

$$h_{i\delta} = -(1,04/26,93) + \sqrt{(1,04/26,93)^2 + (2 \cdot 1,04/23064) \cdot (8152,7/26,93 - 273) \cdot 2832 - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{2832/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})}} = 2,63 \text{ м};$$

на конец сентября:

$$h_{i\delta} = -(1,04/26,93) + \sqrt{(1,04/26,93)^2 + (2 \cdot 1,04/23064) \cdot (8152,7/26,93 - 273) \cdot 3552 - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{3672/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})}} = 2,96 \text{ м}.$$

2. Определяем глубину оттаивания при использовании теплопрозрачного покрытия по формуле 3.11. Вначале рассчитываем параметры M_n и N_n по формулам 3.14, 3.15, для чего вычисляем T_o , α_1 , α_2 , α_3 , φ по формулам 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20:

$$T_o = (273 \cdot 1,04 + 2,47 \cdot 8152,7) / (1,04 + 2,47 \cdot 26,93) = 302 \text{ °К};$$

$$\alpha_1 = 6,164 + 3,605 \cdot 1,5 = 11,57;$$

$$\alpha_2 = 4,77 \cdot [1 + (0,55 - 1370 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,7] = 8,56;$$

$$\alpha_3 = 0,37 \cdot [1 + (1,72 - 3440 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,7] = 1,3;$$

$$\varphi = 11,57 \cdot 0,2 / (8,56 + 2,27 \cdot 1,3 / 0,05^{0,25}) - 11,57 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3} + 0,2 =$$

0,356.

Температура воздуха принимается по шкале Кельвина:

$$T_e = 10,5 + 273 = 283,5 \text{ °К}.$$

$$M_n = 0,2 / 0,356 \cdot \{11,57 \cdot 283,5 + 170 \cdot [1 - 0,813 \cdot (1 - 0,08) - 0,17 -$$

$$\begin{aligned}
& - 0,08 \cdot 0,813^2 \cdot (1 - 2 \cdot 0,17) - 0,028] - 12,9) + \\
& + (1 + 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 11,57 / 0,365) \cdot \{170 \cdot [0,028 / 2 + \\
& + 0,813 \cdot (1 - 0,08)] + (1 - 0,1 - 0,43 / 2) \cdot (4,9 \cdot 302 - 50 - \\
& - 0,1 \cdot 170)\} = 3136,8 \text{ Вт/м}^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{\Pi} &= (8,56 + 2,27 \cdot 1,3 / 0,05^{0,25}) \cdot [1 + (11,57 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3} - \\
& - 0,2) / 0,356] + 4,9 \cdot (1 - 0,1 - 0,43 / 2) \cdot \\
& \cdot (1 + 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 11,57 / 0,356) = 9,87 \text{ Вт / (м} \cdot \text{°C)}.
\end{aligned}$$

Тогда глубина оттаивания составит на конец апреля (с 20 по 30):

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 240 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{240/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 1,08 - 0,02 = 0,94 \text{ м};
\end{aligned}$$

на конец мая:

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 984 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{984/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 2,18 - 0,04 = 2,01 \text{ м};
\end{aligned}$$

на конец июня:

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 1704 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{1704/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 3,13 - 0,05 = 2,95 \text{ м};
\end{aligned}$$

на конец июля:

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 2448 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{2448/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 3,44 - 0,06 = 3,25 \text{ м};
\end{aligned}$$

на конец августа:

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 3192 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{3192/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 3,93 - 0,07 = 3,73 \text{ м};
\end{aligned}$$

на конец сентября:

$$\begin{aligned}
h_{i\partial} &= -(1,248/9,87) + \sqrt{(1,248/9,87)^2 + (2 \cdot 1,248/23064) \cdot (3136,8/9,87 - 273) \cdot 3912 -} \\
& - (1,3 \cdot 2,1/23064) \cdot \sqrt{3912/(3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})} = -0,13 + 4,35 - 0,08 = 4,14 \text{ м}.
\end{aligned}$$

Фактическая глубина оттаивания мерзлых пород в апреле, мае, сентябре будет меньше, а в июне, июле, августе больше, чем расчетная, так как в расчетах принята средняя температура воздуха за теплый период года.

Задание для самостоятельной работы №3

1. Определить глубину оттаивания мёрзлых пород при естественном способе и при использовании теплопрозрачных пленок. Тепловые свойства мёрзлых пород принять согласно соответствующему варианту задачи №2 (льдистость, объёмная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности).

Коэффициент теплопроводности талых пород назначать через соответствующий коэффициент теплопроводности мёрзлых пород из соотношения ($\lambda_m = 0,8 \cdot \lambda_m$).

Характеристики теплопрозрачного покрытия принять согласно примеру №3. Метеопараметры приведены в табл. 3.7.

2. Построить графики зависимости $h_{от} = f(\tau)$ для двух способов оттаивания (продолжительность оттаивания изменять через 10...30 сут). Результаты расчётов для естественного способа сравнить с расчётами по формуле Стефана-Заальшютце.

3. Определить предельно возможную глубину оттаивания при использовании селективно прозрачных и предельно тонких плёнок, для чего принять: толщину плёнки $\delta_n = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м; коэффициенты отражения – $A_n = 0$, $A^l = 0,9$; коэффициенты поглощения – $\alpha = 0$, $\alpha^l = 0,1$.

Таблица 3.7

Исходные данные к расчету глубины оттаивания

Вариант	Метеопараметры района разработки месторождения					Температура мерзлых пород (t_m), °C
	Q , Вт / м ²	$t_в$, °C	V , м / с	e , н / м ²	τ , сут	
Прииск Дамбуки	190	11,5	3,1	1100	153	-2,1
Прииск Уркима	196	11,0	3,0	1150	150	-2,5
Ципикан	175	10,1	1,7	1120	149	-2,8
Прииск Дальняя Тайга	175	10,2	1,6	1060	147	-3,2
Енисейск, Красноярский край	189	9,9	1,4	1030	151	-1,5
Северо-Енисейск	185	8,6	1,3	1020	150	-2,0
Сусуман, Магаданская область	198	8,5	2,7	1210	146	-7,0
Прииск Софийск	207	9,5	2,0	990	148	-4,0
Усть-Карск	210	13,7	2,7	1110	149	-2,6
Прииск Средняя Борзя	214	12,4	3,0	1205	153	-1,1
Усть-Нера, Якутия	208	10,4	1,9	1215	145	-10,8