

## Мероприятия по изменению режима теплообмена на поверхности земли и их влияние на распределение температуры в грунте

**В.Г. Кондратьев**, Д.Г.-М.Н.

(ООО «ТрансИГЭМ»),

**А.Г. Перекупка**, К.Ф.-М.Н.,

**С.С. Примаков**, К.Т.Н.,

**А.С. Петрова**

(ОАО «Гипротюменнефтегаз»,

Группа ГМС)

Адрес для связи: primakovss@gtng.ru

**Ключевые слова:** температура, теплообмен, температурный режим, многолетнемерзлый грунт, мероприятия по защите мерзлых пород, солнечная радиация, эффективное излучение, снежный покров, расчистка снега, расчет.

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию и освоению северных районов Российской Федерации, характеризующихся наличием многолетнемерзлых грунтов, которые значительно осложняют освоение месторождений углеводородного сырья и строительство сооружений для подачи газа и нефти потребителю.

Хозяйственное освоение территории нарушает естественный процесс теплообмена многолетнемерзлых грунтов с атмосферой: изменяются высота и плотность снежного покрова, состав и сплошность растительного покрова, гидрогеологический режим грунтов; происходит увлажнение или осушение поверхности земли и др. Это в свою очередь вызывает изменение температурного режима, динамики и глубины сезонного и многолетнего оттаивания и промерзания грунтов, интенсивности развития криогенных процессов и явлений, негативно воздействующих на трубопроводы и другие сооружения.

В связи с указанным при проектировании, строительстве и эксплуатации различных сооружений, возводимых на многолетнемерзлых грунтах, необходимо знать инженерно-геокриологические условия территории в естественной обстановке и их изменения в процессе освоения территории. Этим изменениям придается особое значение вследствие необходимости разработки специальных инженерных мероприятий по обеспечению мерзлого состояния льдистого грунта, которое является определяющим фактором при первом принципе строительства (с сохранением мерзлых пород), а следовательно, и устойчивости сооружений [1].

Наряду с уже известными и широко применяемыми мероприятиями по защите мерзлых пород от влияния теплотехни-

**The measures of heat exchange variation on the earth surface and their influence on the temperature distribution in the soil**

V.G. Kondratiev (TransEGEM OOO, RF, Moscow),  
A.G. Perekupka, S.S. Primakov, A.S. Petrova,  
(Giprotyumenneftegas OAO, HMS Group, RF, Tyumen)

E-mail: primakovss@gtng.ru

**Key words:** temperature, heat exchange, temperature regime, permafrost soil, measures of permafrost protection, solar radiation, effective-terrestrial radiation, snow mantle, snow clearing, calculation.

The heat exchange between the atmosphere and the earth surface has a significant effect on the temperature distribution in the soil. The conditions variation on the ground surface leads to change of thermal regime and permafrost soil thickness. The calculations taking into account the key factors of the temperature regime forming allows to predict the temperature distribution in the soil. Thereby it is getting possible to correctly regulate the thermal-physic situation in the soil by the measures of heat exchange variation on the earth surface.

ческих объектов, такими как использование теплоизоляционных покрытий и термостабилизаторов, следует отметить мероприятия, осуществляемые исключительно на поверхности почвы и влияющие на процессы теплообмена между атмосферой и поверхностью земли, что позволяет регулировать температурный режим массива грунта. К таким мероприятиям относятся [2]:

- применение солнцезащитных навесов, уменьшающих поступление на поверхность грунта солнечной радиации;
- расчистка снега в зимний период, что увеличивает эффективное излучение с поверхности почвы;
- окраска грунта в светоотражающий цвет или использование гравия природного белого цвета, что повышает отражательную способность (альбедо) поверхности.

Основной целью данной работы являлось создание инструмента для анализа эффективности мероприятий по изменению режима теплообмена на поверхности земли и определить их влияние на распределение температуры в грунте. Для решения поставленной задачи разработана численная модель теплообмена и создан программный модуль расчета температуры в грунте.

Из-за сложности учета всех геотеплофизических параметров и их реализации в численной модели были выделены наиболее существенные, которые можно измерить доступными приборами или взять из материалов изысканий.

К таким параметрам отнесли:

- величину суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную площадку в единицу времени,  $Q_c$ ;
- среднемесячную температуру воздуха  $t_{в3}$ ;
- альбедо поверхности  $A$ ;

Таблица 1

Параметр	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
$t_{\text{всп}}, ^\circ\text{C}$	-26,7	-25,8	-22,5	-14,2	-5,5	5,2	13,4	10,7	4,2	-6,5	-19,4	-24,9
$v, \text{ м/с}$	6,9	6,1	7	6,6	6,6	6,2	5,3	5,4	5,3	6,4	6,2	6,8
$h_c, \text{ м}$	0,25	0,3	0,34	0,38	0,21	0	0	0	0	0,08	0,15	0,2
$Q_c, \text{ кДж(ккал)/}$ $(\text{см}^2 \cdot \text{мес})$	0,98 (0,2)	7,35(1,5)	27,4 (5,6)	51,5 (10,5)	65,7 (13,4)	71,1 (14,5)	71,1 (14,5)	46,1 (9,4)	21,6 (4,4)	9,8 (2)	2,5 (0,5)	0 (0)
$A, \%$	80	80	80	80	40	20	20	20	20	50	80	80

Таблица 2

Тип грунта	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$W$	$C_r, \text{ Дж/К}$	$C_m, \text{ Дж/К}$	$\lambda_r, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_m, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
418011 Песок	1610	0,21	686	520	1,91	2,11
208032 Суглинок	1110	0,4	740	505	1,35	1,55
208021 Суглинок	1290	0,3	720	520	1,25	1,35

**Примечание.**  $\rho$  – плотность грунта;  $W$  – суммарная влажность грунта;  $C_r, C_m$  – теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунта;  $\lambda_r, \lambda_m$  – теплопроводность соответственно талого и мерзлого грунта.

- скорость ветра  $v$ ;
- высоту снежного покрова  $h_c$ .

Численная модель основана на решении одномерного нелинейного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $t$  – температура,  $x$  – координата;  $\tau$  – время,  $a$  – коэффициент температуропроводности [3]. Граничные условия для зимнего и летнего периодов различны. Летом на поверхности почвы задаются граничные условия III рода, в которых в качестве дополнительного слагаемого, учитывающего влияние солнечной радиации, используется величина радиационного баланса [4],

$$R = Q_c(1-A) - I_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{эф}}$  – эффективное излучение.

В зимний период снежный покров учитывается как дополнительный слой с собственным коэффициентом теплопроводности. Между мерзлым и талым грунтами существует фазовый переход, который также учитывается в граничных условиях. На нижней границе задаются граничные условия II рода, т.е. нулевой поток.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений была построена разностная схема, которая является явной, ее устойчивость обеспечивается определенным выбором шагов по времени и пространству.

В качестве примера для расчета использовались данные с метеостанции «Тазовское» (табл. 1).

Расчет выполняется для следующего геологического поперечника:

Грунт	Толщина, м
418011 Песок	1,2
208032 Суглинок	3,3
418011 Песок	2,2
208021 Суглинок	8,3

Параметры грунтов приведены в табл. 2.

Были проведены пять вариантов расчетов:

1) для грунта в естественных условиях, т.е. с использованием исходных данных без применения мероприятий по изменению режима теплообмена;

2) для грунта, на поверхности которого в летний период устанавливается солнцезащитный навес, что уменьшает влияние прямой солнечной радиации;

3) для грунта, на поверхности которого в зимний период ведется расчистка снега, следовательно, исключается теплоизолирующее влияние снежного покрова;

4) для грунта, поверхность которого покрыта гравием белого цвета для увеличения альбедо;

5) для грунта, на поверхности которого установлен солнцезащитный навес и ведется расчистка снега.

Результаты расчета представляют собой кривые распределения температуры поверхности почвы по месяцам и распределения температуры грунта по глубине.

Рассмотрим распределение температуры поверхности почвы по месяцам при применении указанных мероприятий, сравним их с распределением температуры воздуха и между собой. Из рис. 1 видно, что в естественных условиях температура поверхности грунта всегда несколько выше температуры воздуха: зимой за счет снежного покрова, который сокращает эффективное излучение поверхности, летом за счет интенсивного нагрева поверхности почвы прямой и рассеянной солнечной радиацией. Только в весенние и осенние месяцы температура поверхности близка к температуре воздуха.

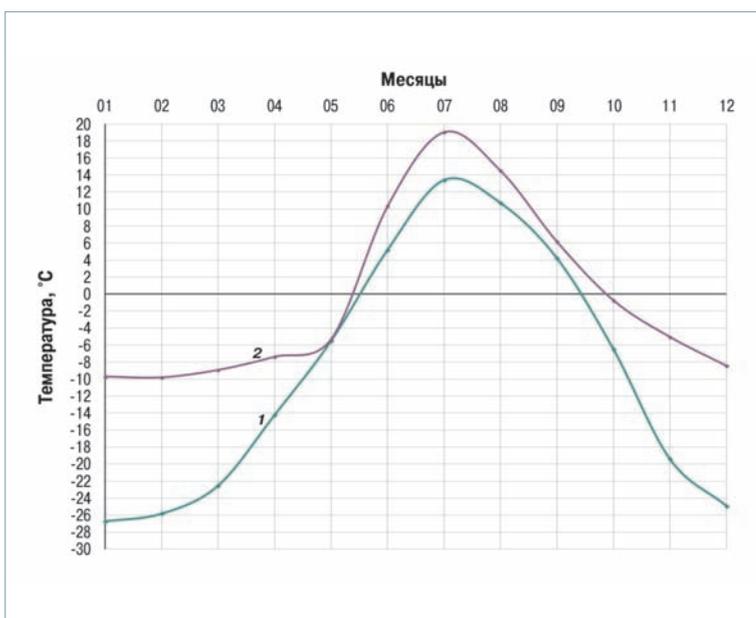


Рис. 1. Динамика температуры воздуха (1) и грунта (2) в естественных условиях

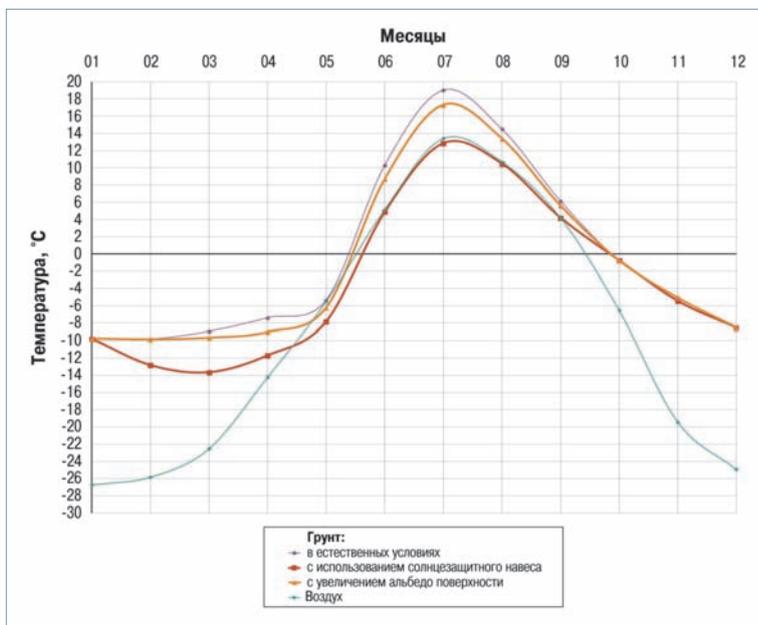


Рис. 2. Динамика температуры поверхности грунта при использовании мероприятий и температуры воздуха

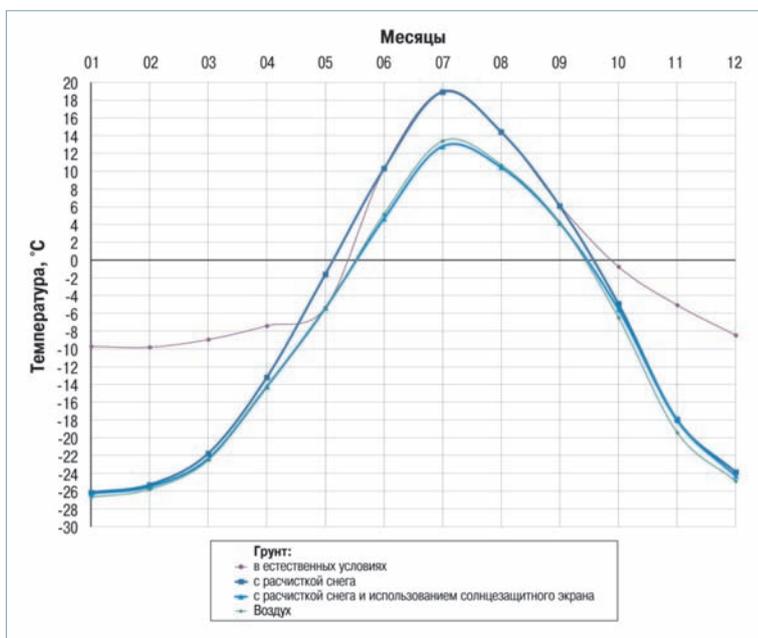


Рис. 3. Динамика температуры поверхности грунта при использовании мероприятий и температуры воздуха

Для уменьшения температуры поверхности могут применяться различные мероприятия. На рис. 2, 3 показано распределение температуры поверхности по месяцам при использовании мероприятий по изменению режима теплообмена. Из рис. 2 видно, что увеличение альбедо поверхности приводит к небольшому уменьшению температуры поверхности в летние месяцы, солнцезащитный навес в этот же период времени практически приближает температуру поверхности к температуре воздуха, следовательно, использование солнцезащитного навеса более эффективно, чем увеличение альбедо поверхности.

Как следует из рис. 3, расчистка снега в зимние месяцы, увеличивая эффективное излучение с поверхности грунта, уменьшает температуру поверхности вплоть до температуры воздуха, обеспечивая более сильное промерзание грунта, что

в свою очередь замедляет процесс растепления в летние месяцы. При использовании солнцезащитного навеса и расчистки снега совместно можно добиться приближения температуры поверхности к температуре воздуха, т.е. теплообмен между поверхностью почвы и атмосферой будет осуществляться главным образом конвективным путем.

На рис. 4 показано распределение температур по месяцам на глубине 2,5 м. В отличие от естественных условий каждое из мероприятий снижает температуру грунта на данной глубине, а пики самых низких температур сдвигаются к более ранним датам.

Ключевые параметры, характеризующие влияние рассмотренных мероприятий по изменению режима теплообмена, представлены в табл. 3. Вследствие совместного применения снегоочистки и солнцезащитного навеса достигаются минимальные значения зимних и летних температур и глубины протаивания. Полное промерзание грунта происходит гораздо раньше, чем в естественных условиях.

Результаты выполненных расчетов хорошо коррелируются с экспериментами, проведенными на Аляске [5] и Тибете [6, 7]. Так, на Аляске при разработке наиболее экстремальных методов «лечения» земляного полотна автодороги в районах многолетнемерзлых пород путем охлаждения откосов рассматривались три метода [5]:

- 1) сооружение на откосах дороги навеса из дерева и фанеры для затенения грунта в течение лета и предохранения от влияния снега, как теплоизоляционного покрова зимой;
- 2) периодическая (один раз в месяц) очистка от снега в течение зимы участка бермы размером 6×21 м;
- 3) установка на откосах насыпи термосифонов с испарителем длиной 10,5 м и радиатором длиной 2,4 м.

Навесами были покрыты два опытных участка. На одном участке на южном откосе дороги размещались семь навесов длиной по 9,6 м и шириной по 3,6 м, что позволило закрыть поверхность размером 25,2 м вдоль и 9,6 м поперек насыпи. На другом участке навес имел размеры 4,2×7,2 м. Навесы были приподняты над землей на высоту 0,6 м.

Из всех проверяемых мероприятий применение навесов оказалось наиболее эффективным. По мнению авторов экспериментов, они могут быть достаточными для охлаждения насыпей на 3-5 °С в течение нескольких лет. Снегоочистка также эффективна, однако данное мероприятие может потребовать больших трудозатрат в годы обильных снегопадов.

По предложению ТрансИГЭМ в Китае в 2005 г. солнцезащитный навес из панелей-сэндвичей был сооружен на откосах насыпи (рис. 5) и над основной площадкой непосредственно над Цинхай-Тибетской железной дорогой [8]. По данным натурных наблюдений [7] навесы на откосах насыпи могут понижать температуру грунтов на 3-5 °С и обеспечивать стабильность земляного полотна на сильнольдистых многолетнемерзлых грунтах.

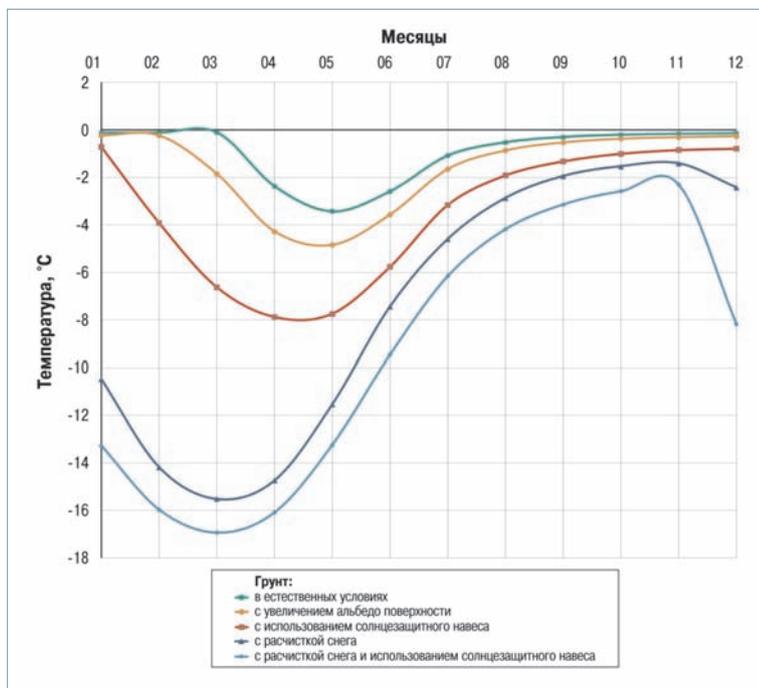


Рис. 4. Динамика температуры грунта на глубине 2,5 м

Таблица 3

Температура поверхности грунта, °С		Глубина протаивания, м	Дата полного промерзания
максимальная	минимальная		
Естественные условия			
19,3	-10,5	1,9	22.03
Увеличение альbedo поверхности			
17,6	-10,8	1,8	08.03
Использование солнцезащитного навеса			
13,1	-14,1	1,5	15.01
Расчистка снега			
19,2	-26,3	1,7	15.12
Расчистка снега и использование солнцезащитного навеса			
13,1	-26,3	1,4	22.11



Рис. 5. Солнцезащитный навес на откосе насыпи Цинхай-Тибетской железной дороги на участке льдистых грунтов в основании (август 2006 г.)

### Выводы

1. Мероприятия по изменению теплообмена на поверхности грунта значительно изменяют его температурный режим.
2. Совместное использование солнцезащитного навеса и снегоочистки является наиболее эффективным мероприятием по сохранению грунта в мерзлом состоянии. Данное мероприятие обеспечивает минимальную глубину протаивания грунта и достаточно низкую температуру самого грунта для обеспечения несущей способности строительных оснований.

3. Использование в расчетах в качестве верхнего граничного условия температуры воздуха в естественных условиях не вполне корректно, так как данное условие может быть достигнуто только с использованием ряда мероприятий на поверхности грунта.

4. Применение программного модуля для прогнозирования формирования температурного режима с учетом ключевых параметров теплообмена на поверхности, а также мероприятий, влияющих на теплообмен, позволяет более качественно разрабатывать решения по безопасной эксплуатации зданий, трубопроводов и других сооружений на территориях распространения многолетнемерзлых пород.

### Список литературы

1. Фельдман Г.М. Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов – М.: Наука, 1973. – 254 с.
2. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. – Чита: ПолиграфРесурс, 2011. – 176 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики – М.: Наука, 1972. – 736 с.
4. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов – Новосибирск: Наука, 1979. – 284 с.
5. Zarling J.P., Breley A.W. Thaw stabilization of roadway embankments constructed over permafrost. – Alaska DOT&PF Report No FHWA-AK-RD-87-20, 1986. – 34 p.
6. Feng Wenjie, Wen Zhi, Sun Zhizhong & Wu Junjie. Application and Effect Analysis of Awning Measure on Cold Regions//Proceeding of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xi'an, China. – Lanzhou: Lanzhou University Press, 2009. – P. 148-160.
7. Niu Fujin, Shen Yongping. Guide of Field Excursion after Asian Conference on Permafrost (Aug. 10-16, 2006). China, Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. – 28 p.
8. Кондратьев В.Г. Цинхай-Тибетская железная дорога: грандиозная попытка решить проблему стабилизации земляного полотна на вечной мерзлоте // Геотехника. – 2011. – № 1. – С. 4-11.

### References

1. Fel'dman G.M., *Metody rascheta temperaturamogo rezhima merzlykh grunтов* (Methods of calculating the temperature of frozen soil), Moscow: Nauka Publ., 1973, 254 p.
2. Kondrat'ev V.G., *Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh* (The stabilization of the roadbed on permafrost soils), Chita: PoligrafResurs Publ., 2011, 176 p.
3. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A., *Uraveneniya matematicheskoy fiziki* (Equations of mathematical physics), Moscow: Nauka Publ., 1972, 736 p.
4. Pavlov A.V., *Teplofizika landshaftov* (Thermophysics of landscapes), Novosibirsk: Nauka Publ., 1979, 284 p.
5. Zarling J.P., Breley A.W., *Thaw stabilization of roadway embankments constructed over permafrost*, Report NO FHWA-AK-RD-81-20, 1986.
6. Feng Wenjie, Wen Zhi, Sun Zhizhong & Wu Junjie, *Application and effect analysis of awning measure on cold regions*, Proceeding of the eighth international symposium on permafrost engineering, 15-17 October, 2009, Xi'an, China, pp. 148-160.
7. Niu Fujin, Shen Yongping, *Guide of field excursion after Asian conference on permafrost* (Aug. 10-16, 2006), Lanzhou, China, 2006, 28 p.
8. Kondrat'ev V.G., *Geotekhnika*, 2011, no. 1, pp. 4-11.