

КОРРЕКТНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Д.С. Паздерин, к.т.н., **Д.В. Аксенов**, **А.Е. Ерошкин**

ООО «Газпромнефть-Ямал»

А.В. Федорова

Тюменский индустриальный университет

Электронный адрес: Pazderin.DS@tmn.gazprom-neft.ru

В статье приводятся результаты натурных исследований максимальной глубины оттаивания насыпного грунта, используемые для проектирования инженерной подготовки. Приведены результаты геотехнического мониторинга и выполнено их сопоставление с прогнозным теплотехническим расчетом с применением различных методик.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты (ММГ), глубина сезонного оттаивания, теплотехнические расчеты, оптимизация насыпи, инженерная подготовка, замеры температуры грунтов

CORRECTNESS OF DETERMINING THE SEASONAL THAWING DEPTH IN A CRYOLITHIC ZONE

D.S. Pazderin, **D.V. Aksenov**, **A.E. Eroshkin**

Gazpromneft-Yamal LLC, RF, Tyumen

A.V. Fedorova

Tyumen Industrial University, RF, Tyumen

The article gives the results of field studies of the maximum thawing depth of fill-up ground, to be used for the design of engineering training. The results of geotechnical monitoring are presented and compared with the predictive thermotechnical calculations using various methods.

Keywords: permafrost soils, seasonal thawing depth, thermotechnical calculations, embankment optimization, engineering training, soil temperature measurements

DOI: 10.24887/2587-7399-2019-3-41-44

ВВЕДЕНИЕ

При освоении крупных нефтегазовых проектов разработки месторождений, расположенных на территории распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), как правило, вертикальную планировку местности проводят с помощью подсыпки (насыпи из непучинистого песка), что позволяет сохранить в мерзлом состоянии грунты в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации зданий и сооружений. Существует несколько методик (формул) расчета глубины оттаивания насыпного грунта, которые определяют проектную минимальную высоту подсыпки. В статье на примере Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) показано, какие методики являются эффективными и экономически обоснованными.

Согласно обязательному к применению приложению Г свода правил СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» нормативная глубина сезонного оттаивания может быть определена по данным натурных наблюдений по формуле

$$d_{th,n} = d'_{th} \sqrt{\frac{(T_{th,m} - T_{bf})t_{th,m}}{(T_{th} - T_{bf})t_{th}}}, \quad (1)$$

где d'_{th} – наибольшая глубина сезонного оттаивания грунта в годовом периоде, м, устанавливаемая по данным натурных наблюдений; T_{bf} – температура начала замерзания грунта, °С; $T_{th,m}$, $t_{th,m}$ – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур, °С, и продолжительность этого периода, ч, принимаемые по СП

131.13330.2012 (для климатических подрайонов ИБ и ИГ значения $T_{th,m}$, $t_{th,m}$ следует принимать с коэффициентом 0,9). При отсутствии данных натуральных наблюдений допускается определение $d_{th,n}$ по следующей формуле:

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th,c} - T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \frac{Q}{2q_1}, \quad (2)$$

где

$$Q = \left(0,25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right)(T_0 - T_{bf})k_m \sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}}; \quad (3)$$

$$q_1 = L_V + \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0,1\right) \times (C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})); \quad (4)$$

где L_V – объемная теплота таяния грунта, ккал/(м³·К) (1 кал = 4,18 Дж); λ_{th} – теплопроводность талого грунта, ккал/(м·ч·К); λ_f – теплопроводность мерзлого грунта, ккал/(м·ч·К); $t_{th,c}$ – расчетная продолжительность летнего периода, ч; C_{th} – теплоемкость талого грунта, ккал/(м³·К); C_f – теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м³·К); $T_{th,c}$ – расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С; T_{bf} – температура начала замерзания грунта, °С; T_0 – расчетная среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта, °С; t_1 – время, принимаемое равным 3600 ч; t_2 – время, принимаемое равным 7500 ч; $k_m = 1,0$ – коэффициент для песчаных грунтов.

Существующая практика проектирования показала, что проектная организация не располагает необходимыми натурными наблюдениями, и вычисления проводятся по формуле (2). Требования к проведению натуральных наблюдений достаточно жесткие [1]. Например, измерения температуры необходимо выполнять в течение летнего периода

не реже одного раза в 10 дней. Из формул (1) и (2) видно, что рассчитываемая величина сезонного оттаивания не зависит от многих влияющих на нее параметров. В расчетах не учитываются динамика климатических параметров в течение года, неоднородность геологического строения грунта, ландшафт (от которого зависит снегонакопление), начальное распределение температуры ММГ и др.

Другим распространенным методом прогнозного расчета динамики теплового состояния ММГ является численный метод. Методы таких прогнозов в настоящее время достаточно хорошо разработаны [2] и регламентированы (РСН 67-87. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами).

РАСЧЕТ ПО СП 25.13330.2012 БЕЗ УЧЕТА НАТУРНЫХ ДАННЫХ

При разработке проектно-сметной документации Новопортовского НГКМ проектным институтом выполнен расчет минимально допустимой высоты насыпи для выполнения инженерной подготовки.

При расчете температура грунта на глубине нулевых амплитуд (10 м) принята равной -3 °С на основании материалов изысканий теплофизические свойства насыпного грунта (песок ИГЭ-70) приведены в табл. 1. Расчет выполнен по формуле (2), из которой следует:

$$Q = (0,25 - 3672/3600)(-3-0)1\sqrt{1,7 \cdot 465 \cdot 3672} = 3935,63 \text{ ккал/м}^3,$$

$$q_1 = (0,25 - 3672/3600)(-3-0) \cdot 1 \times \sqrt{1,7 \cdot 465 \cdot 3672} = 3935,63 \text{ ккал/м}^3,$$

$$Q_1 = L_V + (t_{th,c}/7500 - 0,1)(C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})),$$

где $L_V = 1690 \cdot 0,11 \cdot 80 = 14872$ ккал/м³;

$t_{th,c} = 1,15 \cdot 2880 + 0,1 \cdot 3600 = 3672$ ч; C_{th} – теплоемкость талого грунта, ккал/(м³·К),

$T_{th,c} = 1,4 \cdot 7,1 + 2,4 = 12,34$ °С; $T_{bf} = 0$ °С, λ_{th} – теплопроводность талого грунта, ккал/(м·ч·К); $T_0 = -3,0$ °С.

В результате расчетов глубина сезонного оттаивания составила 2,64 м.

РАСЧЕТ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

В связи с тем, что в приведенных выше расчетах использовались формулы, не описывающие процесс оттаивания/промерзания

Таблица 1

Показатели	Песок		Суглинок ИГЭ-208031
	ИГЭ-70	ИГЭ-448011	
Теплопроводность талого грунта, ккал/(м·ч·К):	1,51	1,73	1,29
талого мерзлого	1,70	1,94	1,39
Объемная теплоемкость грунта, ккал/(м ³ ·К):	559	652	755
талого мерзлого	465	497	538
Плотность скелета грунта, кг/м ³	1690	1550	1330
Влажность	0,11	0,20	0,32
Толщина слоя, м	2,0	4,3	13,0
Начальная температура грунта, °С	-3,0	-3,0	-3,0

Таблица 2

Средняя температура воздуха, °С												
по месяцам												за год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
-24,8	-24,1	-21,9	-13,7	-5,3	2,9	11,0	10,0	4,5	-4,9	-16,8	-21,9	-8,8

влажного грунта и не учитывающие всех влияющих факторов, было принято решение выполнить сравнительный прогнозный теплотехнический расчет в сертифицированном программном комплексе (ПК) Frost 3D Universal. При определении граничных условий на поверхности грунта применялась методика, описанная в работе [2].

Свойства грунтов, принятые для расчета численным методом, представлены в табл. 1, средняя месячная температура воздуха на метеостанции Новый Порт – в табл. 2.

По результатам прогнозного теплотехнического расчета глубина сезонного оттаивания на конец летнего периода составила 1,6 м.

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В летне-осенний период 2018 г. на территории кустовой площадки № 3 Новопортовского месторождения были проведены натурные исследования по определению максимальной глубины сезонного оттаивания. Следует учесть, что летний период 2018 г. был аномально теплым по сравнению с нормативными климатическими данными, приведенными в СП 131.13330.2012 Строительная климатология (с изменениями от 17 ноября 2015 г.).

Для определения температуры грунта по глубине были пробурены четыре термометрические скважины глубиной до 5,5 м. Они располагались на удалении от объектов, способных оказать влияние на чистоту эксперимента, т.е. вне их теплового влияния. В термометрических скважинах были установлены стационарные термоносы с шагом датчиков температуры 0,25 м. Для считывания показаний использовался логгер (периодичность фиксации показаний датчиков – 4 раза в сутки).

По результатам натурных исследований наибольшая глубина оттаивания грунта составила 1,78 м.

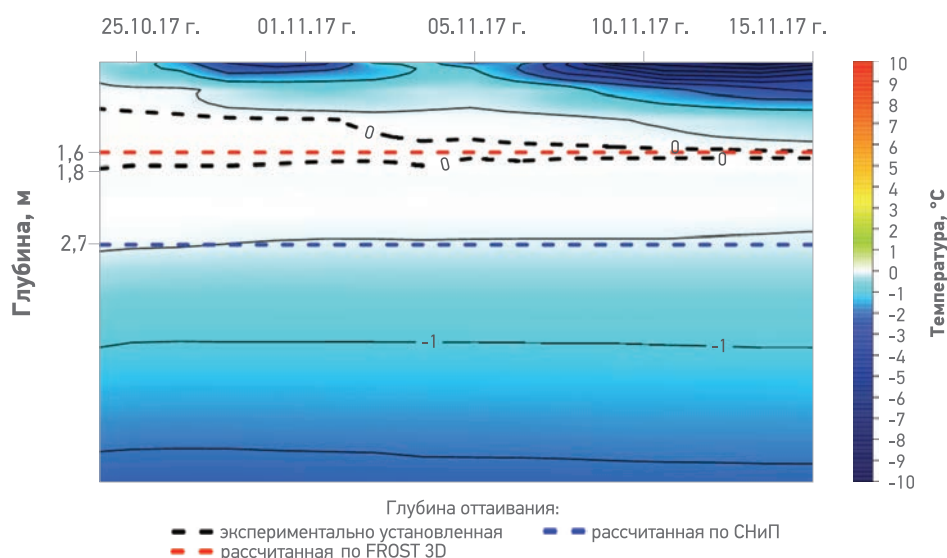
РАСЧЕТ ПО СП 25.13330.2012 С УЧЕТОМ НАТУРНЫХ ДАННЫХ

С учетом полученных натуральных данных был проведен расчет нормативной глубины сезонного оттаивания по формуле (1)

$$d_{th,n} = 1,78 \sqrt{\frac{(7,13 - (-0,1))2883}{(7,8 - (-0,1))3216}} = 1,62 \text{ м.}$$

Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта составила 1,62 м.

Результаты натурных исследований температуры грунтов представлены на рисунке.



Результаты натурных исследований температуры грунтов

Таблица 3

Методика вычислений	Глубина оттаивания, м
Расчет по СП 25.13330.2012 без учета натуральных данных	2,64
ПК Frost 3D Universal	1,60
Расчет по СП 25.13330.2012 с учетом натуральных данных	1,62

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты исследований приведены в табл. 3. Выявлена высокая сходимость результатов расчета численными методами, результатов натурных исследований и расчета по СП 25.13330.2012 с учетом натуральных данных. Результаты определения глубины сезонного оттаивания грунта, выполненного по СП 25.13330.2012 без учета натуральных данных, являются значительно завышенными по сравнению с результатами расчетов по другим методикам и экспериментов.

Полученные экспериментальные данные и результаты теплотехнических расчетов были направлены в проектный институт с требованием выполнить корректировку (пересмотр ранее выполненных проектных решений) по пересчету высоты инженерной подготовки (по СП 25.13330.2012 с учетом натуральных данных) для непостроенных объектов капитального строительства, а также

вновь проектируемых объектов. В результате корректировки проектной документации высота насыпи при инженерной подготовке строительства уменьшена на 0,9–1,2 м. Кроме того, уменьшение высоты насыпи позволило сократить длину свай в основании сооружений на ММГ.

ВЫВОДЫ

1. При выполнении теплотехнических расчетов по определению глубины сезонного оттаивания целесообразно применять численный метод расчета, т.к. для его выполнения не требуется проведения дополнительных исследований, при этом имеется возможность учета всех необходимых условий.
2. Проведенное исследование позволило существенно снизить капитальные вложения в инженерную подготовку, сократить объем материально-технических ресурсов и сроки строительных работ площадочных объектов Новопортовского месторождения.
3. Методика расчета минимальной высоты инженерной подготовки для объектов капитального строительства в условиях Крайнего Севера рекомендована к применению в других дочерних обществах «Газпром нефти» в качестве одного из лучших технологических решений.

Список литературы

1. Попов А.П. Технология геотехнического мониторинга в криолитозоне. // Инженерные изыскания. – 2009. – № 4. – С. 20–33.
2. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения теплотехнических задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI. – № 3. – С. 49–59.

Reference

1. Popov A.P., *Geotechnical monitoring technology in the cryolithozone* (In Russ.), Inzhenernye izyskaniya, 2009, no. 4, pp. 20–33.
2. Gorelik Ya.B., Pazderin D.S., *Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems in forecasting temperature field dynamics in the foundations of constructions on permafrost* (In Russ.), Kriosfera Zemli, 2017, V. XXI, no. 3, pp. 49–59.