КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 1, с. 51–57 **http://www.izdatgeo.ru**

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(51-57)

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НА ПРОГНОЗНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Г.П. Пустовойт[1], Э.С. Гречищева[2], С.И. Голубин[3], А.В. Аврамов[3]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; g-p-p@yandex.ru*
[2] *АО "Фундаментпроект", 125080, Москва, Волоколамское ш., 1, стр. 1, Россия; Grechisheva.E@fundamentproekt.ru*
[3] *ООО "ГазпромВНИИГАЗ", 142717, Московская обл., пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15, стр. 1, Россия; S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru, A_Avramov@vniigaz.gazprom.ru*

Проектирование объектов нефтегазовой отрасли в криолитозоне связано с решением ряда геотехнических задач, таких как обеспечение эксплуатационной надежности, которая, в свою очередь, обеспечивается принятием проектно-технических решений на основе прогнозных теплотехнических расчетов. Поведение грунтов во времени моделируется с учетом их физико-механических и теплофизических свойств. Параметры грунтов проектировщиками и изыскателями определяются зачастую не в лабораторных условиях, а рассчитываются по формулам или принимаются по табличным данным нормативных документов. В работе проведены сравнительные теплотехнические расчеты для нескольких вариантов исходных данных, полученных в ходе инженерных изысканий, и сделан вывод о необходимости экспериментального определения ряда параметров грунтов при проектировании в криолитозоне.

Теплотехнические расчеты, теплофизические свойства грунтов, инженерные изыскания, криолитозона

HOW THE TYPE OF INPUT DATA AFFECTS PROGNOSTIC TEMPERATURE CALCULATIONS FOR DESIGN IN PERMAFROST

G.P. Pustovoit[1], E.S. Grechishcheva[2], S.I. Golubin[3], A.V. Avramov[3]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; g-p-p@yandex.ru*
[2] *Fundamentproekt JSC, 1, Volokolamskoe road, Moscow, 125080, Russia; Grechisheva.E@fundamentproekt.ru*
[3] *Gazprom VNIIGAZ LLC, Projecting str. No. 5537, 15, Razvilka, Moscow region, 142717, Russia; S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru, A_Avramov@vniigaz.gazprom.ru*

The design of oil and gas facilities on permafrost commonly includes several geotechnical tasks. One of them is providing operational stability of buildings and structures by project solutions based on prognostic calculations. The behavior of soils is simulated proceeding from their thermal and other physical properties. Designers and researchers most often estimate the respective parameters by calculations and use tabular data from national design standards instead of laboratory testing. We have calculated and compared several variants of input data obtained by laboratory testing and retrieved from national design standards. The results demonstrate that laboratory determination of some thermal properties of soils is indispensable for design in permafrost.

Temperature calculations, thermal properties of soils, laboratory testing, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет активный процесс освоения углеводородных и рудных месторождений в регионах, расположенных в криолитозоне. Ввиду специфики инженерно-геологических условий северных регионов проектирование и строительство как площадных, так и линейных объектов на многолетнемерзлых грунтах требует особого подхода. Так, на стадии проектирования разрабатываются специальные мероприятия по температурной стабилизации грунтов и геотехническому мониторингу, которые основываются на результатах теплотехнического прогноза изменения во времени свойств грунтов и их температурных полей. По итогам расчетов разрабатываются те или иные технические решения для обеспечения эксплуатационной надежности объектов. Прогнозные теплотехнические расчеты требуют применения специализированных программных комплексов. Для решения прогнозных задач необходим ряд исходных данных: плотность грунта, естественная влаж-

© Г.П. Пустовойт, Э.С. Гречищева, С.И. Голубин, А.В. Аврамов, 2018

ность, температура начала замерзания, зависимость содержания незамерзшей воды от температуры, коэффициент теплопроводности, объемная или удельная теплоемкость. Все эти параметры определяются для грунтов в ходе инженерных изысканий.

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Нормативными документами в разных случаях допускается как прямое измерение указанных характеристик, так и определение их расчетным путем. Основные нормативные документы, в соответствии с которыми осуществляются инженерно-геологические изыскания в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, следующие: “Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов”, часть 4 [*СП 11-105-97*], “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” [*СП 25.13330.2012*]. Они устанавливают требования к показателям свойств, видам и объемам определения характеристик грунтов. Такие физические характеристики грунта, как плотность и естественная влажность, экспериментально определяются в лабораторных или полевых условиях и являются необходимыми параметрами в расчете классификационных показателей по ГОСТ 25100-2011. Температура начала замерзания грунта, количество незамерзшей воды в зависимости от температуры, коэффициент теплопроводности и теплоемкость грунтов необходимы для теплотехнических расчетов и часто принимаются согласно табличным данным.

В табл. 1 дано сравнение требований нормативных документов к определению физических и теплофизических характеристик мерзлых грунтов, необходимых для прогнозных расчетов. Например, СП 11-105-97 разделяет лабораторные испытания на предпроектной стадии изысканий, проектной и стадии рабочей документации. При инженерных изысканиях при проведении проектных работ норматив устанавливает прямое определение физических и теплофизических характеристик для зданий и сооружений 1-го и 2-го уровней ответственности. В то же время СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” не делает разделения для стадий проектирования, но допускает определение физических и теплофизических характеристик расчетом для зданий и сооружений 2-го и 3-го уровней ответственности. Таким образом, для зданий и сооружений 2-го уровня ответственности СП 11-105-97 устанавливает прямое определение физических и теплофизических характеристик, а СП 25.13330.2012 – расчетное (далее под расчетными характеристиками понимаются таблицы и формулы из соответствующих документов).

Кроме разделения по стадиям изысканий и уровням ответственности зданий и сооружений, СП 11-105-97 регламентирует определение характеристик в зависимости от гранулометрического состава грунта, а также от засоленности. В то же время СП 25.13330.2012 не делает такого подробного разделения, а устанавливает зависимость только от уровня ответственности сооружения и только при строительстве по принципу I (сохране-

Таблица 1. **Требования нормативных документов к определению физических и теплофизических характеристик грунтов**

Характеристика	Нормативный документ	Изыскания для предпроектной стадии			Изыскания для разработки					
					проектной документации			рабочей документации		
		Уровень			Уровень			Уровень		
		1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й
Количество незамерзшей воды в засоленных грунтах и льдах	СП 11-105-97	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р
Количество незамерзшей воды в незасоленных грунтах	СП 11-105-97	Р	Р	Р	Р	Р	Р	+	+	Р
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р
Температура начала замерзания засоленных грунтов	СП 11-105-97	Р	Р	Р	+	+	+	+	+	Р
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р
Температура начала замерзания незасоленных грунтов	СП 11-105-97	Р	Р	Р	+	+	+	+	+	Р
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р
Коэффициент теплопроводности талых и мерзлых грунтов	СП 11-105-97	Р	Р	Р	+	+	Р	+	+	Р
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р
Объемная теплоемкость талых и мерзлых грунтов	СП 11-105-97	Р	Р	Р	+	+	Р	+	+	Р
	СП 25.13330.2012	+	Р	Р	+	Р	Р	+	Р	Р

Примечание. “+” – прямое определение, “Р” – расчетное определение.
разночтение в требованиях к определению свойств, идентичность требований к определению свойств.

ние грунтов основания в мерзлом состоянии). Необходимость экспериментального или допустимость расчетного определения характеристик для теплотехнических расчетов при строительстве по принципу II вообще не оговаривается. Из табл. 1 видно, что более чем в 40 % случаев, упомянутых в нормативных документах, есть расхождения в требованиях к лабораторному или расчетному определению показателей физических и теплофизических свойств. Полностью совпадают требования на лабораторное определение характеристик только для зданий и сооружений 1-го уровня ответственности при изысканиях для разработки рабочей документации. Практически полностью совпадают требования к расчетному определению характеристик для сооружений 3-го уровня ответственности при изысканиях для предпроектной стадии и разработки рабочей документации. Во всех остальных случаях в документах наблюдается несогласованность требований: один документ устанавливает лабораторное определение, а другой – расчетное, и наоборот. Как правило, в техническом задании на проведение инженерно-геологических изысканий в районах распространения многолетнемерзлых грунтов содержатся требования к производству работ в соответствии с обоими указанными выше нормативными документами.

В случае таких разночтений в целях оптимизации финансовых и временных затрат, как правило, отдается предпочтение расчетному определению физических и теплофизических характеристик, которое проводится согласно Приложению Б [*СП 25.13330.2012*]. Это приложение имеет ряд допущений и является в большой мере обобщением накопленного за многие годы теоретического и экспериментального материала. В соответствии с пунктом Б.5 температура начала замерзания зависит только от типа грунта и его засоленности. Для незасоленного грунта она принимается постоянной величиной для каждого типа грунта и не зависящей от влажности, несмотря на множество публикаций, посвященных влиянию влажности на температуру начала замерзания [*Вотяков, 1952; Савельев, 1971; Шевелев, 1979; Методы..., 2004; Алексютина, Мотенко, 2017*]. Все характеристики обобщены для песков разных фракций, поэтому и гравелистые, и пылеватые пески характеризуются одним и тем же значением показателей свойств. Однако в районах распространения мерзлых грунтов процессы мерзлотной дезинтеграции способствуют увеличению пылевато-глинистой фракции, в том числе в песчаных грунтах [*Алексютина, Мотенко, 2017*]. Это приводит к росту количества связанной воды в грунтах и, следовательно, к снижению температуры начала замерзания, увеличению содержания незамерзшей воды, изменению теплофизических характеристик [*Основы..., 2001; Методы..., 2004; Чеверев, 2004*].

Определение количества незамерзшей воды в грунте при разных температурах в пункте Б.6 [*СП 25.13330.2012*] основано на его засоленности и числе пластичности. Таким образом, во всех незасоленных песках (в том числе пылеватых) и в некоторых супесях содержание незамерзшей воды равно 0 %, однако в реальности оно отлично от нуля [*Вотяков, 1952; Основы..., 2001; Алексютина, Мотенко, 2017*].

Теплофизические характеристики грунтов определяются по таблице Б.8 [*СП 25.13330.2012*]. Большим преимуществом СП 25.13330.2012 по сравнению со СНиП 2.02.04-88 является дополнение в части теплофизических характеристик засоленных грунтов. Поскольку теплофизические характеристики грунтов зависят от многих факторов (гранулометрический состав, влажность, плотность сухого грунта, засоленность и др.) [*Теплофизические свойства..., 1984*], полный набор их комбинаций сложно учесть. Поэтому таблица Б.8 является обобщением для некоторых разновидностей грунтов, выделенных по классификационным показателям. Так, обобщены характеристики для песков разных фракций, а также для разновидностей грунтов по засоленности. Например, все слабозасоленные пески определенной влажности и плотности характеризуются одинаковым значением показателей теплофизических свойств. Однако при прочих равных условиях у песка с засоленностью 0.05 и 0.14 % характеристики могут различаться более чем на 10 %, а если при этом первый из них гравелистый, а второй – пылеватый, то значения варьируются еще больше.

Таким образом, в теплотехнических расчетах зачастую принимаются заведомо неточные исходные данные, которые могут привести к заметному искажению прогнозных результатов, на основе которых принимаются решения о выборе принципа строительства, а также мероприятий температурной стабилизации грунтов и инженерной защиты для обеспечения устойчивости зданий и сооружений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье представлены результаты сравнительных теплотехнических расчетов с использованием экспериментальных (лабораторных) значений теплофизических параметров грунтов и их значений, принятых по [*СП 25.13330.2012*]. Для моделирования выбраны два грунта: песок средней крупности и суглинок легкий. Расчеты выполнены для трех вариантов исходных данных для этих грунтов. В первом случае все теплофизические характеристики грунтов приняты по данным лабораторных испытаний (вариант 1). Во втором случае значения теплоемкости и коэффициента теплопроводности грунтов приняты согласно таб-

личным данным [*СП 25.13330.2012*], количество незамерзшей воды – по лабораторным данным (вариант 2). В третьем случае количество незамерзшей воды в грунте, теплоемкость и коэффициент теплопроводности приняты по [*СП 25.13330.2012*] (вариант 3). Физические и теплофизические свойства грунтов, использованные в расчетах, представлены в табл. 2–4.

Экспериментальные данные получены в аккредитованной лаборатории АО "Фундаментпроект". Измерения температуры начала замерзания производили на сертифицированном приборе ИРС-1 с точностью ±0.05 °С. Теплофизические свойства грунта определяли зондовым методом с помощью прибора KD2-Pro с точностью ±2.5–5.0 % для коэффициента теплопроводности и ±5 % для удельной теплоемкости [*ASTM D5334-14, 2014*]. Содержание незамерзшей воды определяли контактным методом [*Методы..., 2004*] с различием двух параллельных определений не более чем 0.1 % при влажности от 0 до 2 % и не более 0.3 % при влажности выше 5 %. Точность поддержания температуры образцов при испытаниях составила ±0.1 °С. Отметим, что достоверность результатов должна обеспечиваться сертификацией приборов, их периодической поверкой и калибровкой.

Прогнозные расчеты проводились на период 30 лет, что в среднем соответствует сроку эксплуатации объектов инфраструктуры добычи и транспортировки нефти и газа. Начальная температура грунтов по всей глубине принималась равной –1 °С. Расчетная область по глубине составляла 40 м; на ее верхней границе задавались граничные условия III рода, на нижней и боковых границах – II рода с нулевым тепловым потоком.

Природно-климатические показатели принимались усредненными за период времени с 1990 по 2015 г. согласно данным сайта Atlas-Yakutia.ru по метеостанции Игарка. Поскольку моделирование выполнялось с целью сравнительного прогноза температурных полей, влияющих на устойчивость инженерных сооружений объектов нефтегазового комплекса, предполагалось, что в пределах площадок инженерных сооружений дневная поверхность полностью свободна от растительности. Природно-климатические показатели, используемые в расчетах, приведены в табл. 5, значения граничных условий III рода, принятые на их основе, – в табл. 6.

Расчеты проводились с использованием программного комплекса Geoheat3d [*Свидетельство..., 2017*]. Он сертифицирован и предназначен

Таблица 2. **Физические и теплофизические свойства грунтов**

Тип грунта	λ_f	λ_{th}	C_f	C_{th}	ρ_d, кг/м^3	W_{tot}	W_p	T_{bf}, °С
	Вт/(м·К)		кДж/(м^3·К)			д.е.		
Согласно лабораторным данным (вариант 1)								
Песок	3.06	1.73	1627	2260	1582	0.232	–	–0.4
Суглинок	1.99	1.6	2100	2570	1720	0.206	0.164	–0.4
Согласно СП 25.13330.2012 (варианты 2, 3)								
Песок	2.99	2.59	1933	2728	Лаб. д.	Лаб. д.	–	Лаб. д.
Суглинок	1.76	1.49	2421	3057	Лаб. д.	Лаб. д.	Лаб. д.	Лаб. д.

Примечание. Лаб. д. – лабораторные данные; проч. обозн. по: [*СП 25.13330.2012*].

Таблица 3. **Влажность за счет содержания незамерзшей воды для песка**

Варианты 1, 2*		Вариант 3**	
T, °С	W_w, %	T, °С	W_w, %
–0.4	23.2	–0.4	23.2
–0.5	11.0	–0.5	0.0
–0.6	6.5	–0.6	0.0
–0.7	3.5	–0.7	0.0
–0.8	2.0	–0.8	0.0
–1.4	0.7	–1.4	0.0
–2.2	0.6	–2.2	0.0
–15.0	0.5	–15.0	0.0
–30.0	0.1	–30.0	0.0

* Согласно лабораторным данным.
** По: [*СП 25.13330.2012*].

Таблица 4. **Влажность за счет содержания незамерзшей воды для суглинка**

Варианты 1, 2*		Вариант 3**	
T, °С	W_w, %	T, °С	W_w, %
–0.4	20.6	–0.4	20.60
–0.5	18.8	–0.5	10.66
–0.6	17.3	–1.0	9.51
–0.8	14.0	–2.0	8.20
–1.1	10.0	–3.0	7.54
–1.4	7.6	–4.0	7.22
–3.0	5.0	–8.0	6.72
–15.0	3.1	–15.0	6.23
–30.0	2.0	–30.0	5.20

* Согласно лабораторным данным.
** По: [*СП 25.13330.2012*].

Таблица 5. **Природно-климатические показатели**

Месяц	Температура воздуха, °С	Высота снега, м	Плотность снега, т/м^3	Скорость ветра, м/с
I	–27.7	0.71	0.46	3.6
II	–25.2	0.82	0.53	3.3
III	–16.8	0.87	0.56	3.6
IV	–9.2	0.78	0.52	3.7
V	–0.6	0.19	0.24	3.8
VI	10.6	–	–	3.6
VII	15.7	–	–	3.3
VIII	12.0	–	–	3.1
IX	4.9	0.05	0.19	3.4
X	–6.3	0.23	0.25	3.8
XI	–20.3	0.45	0.33	3.3
XII	–25.1	0.58	0.39	3.7

Таблица 6. **Температура воздуха (T) и коэффициент теплообмена (α) на верхней границе**

Месяц	T, °С	α, Вт/(м^2·К)
I	–27.7	0.56
II	–25.2	0.55
III	–16.8	0.55
IV	–9.2	0.57
V	–0.6	1.08
VI	10.6	21.05
VII	15.7	18.93
VIII	12.0	18.03
IX	4.9	13.23
X	–6.3	0.95
XI	–20.3	0.64
XII	–25.1	0.59

для расчета промерзания–оттаивания и динамики температурных полей в грунтах, взаимодействующих со зданиями, сооружениями и внешней средой.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов (температурные поля) на конец летнего периода 30-го года для песков и суглинков приведены на рис. 1, 2 (на каждом рисунке отображены результаты согласно трем вариантам задания свойств грунтов). Температурные поля представлены с учетом температуры начала замерзания грунтов (T_{bf}) в виде разности $T - T_{bf}$. Оттенками желтого цвета показаны области, в которых грунт находится в оттаявшем состоянии. Глубина выражена в метрах.

Проведенные прогнозные теплотехнические расчеты наглядно демонстрируют, как способ определения теплофизических параметров грунтов может повлиять на ход изменения температуры во времени и на конечный результат. Так, при определении всех свойств экспериментальным путем глубина оттаивания в песке составила 3.7 м. Определение теплофизических свойств согласно СП 25.13330.2012, а количества незамерзшей воды экспериментальным путем дало увеличение глубины оттаивания до 8.4 м. А если и теплофизические свойства грунтов, и зависимость количества незамерзшей воды от температуры принять по СП 25.13330.2012, то глубина оттаивания увеличивается до 8.8 м. Для суглинков картина обратная, различия в прогнозных значениях глубины оттаи-

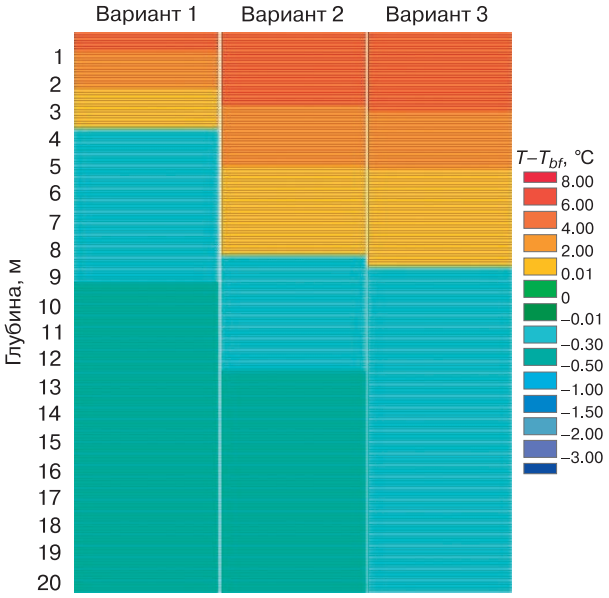

Рис. 1. Температурные поля на конец летнего периода 30-го года расчета для песков.

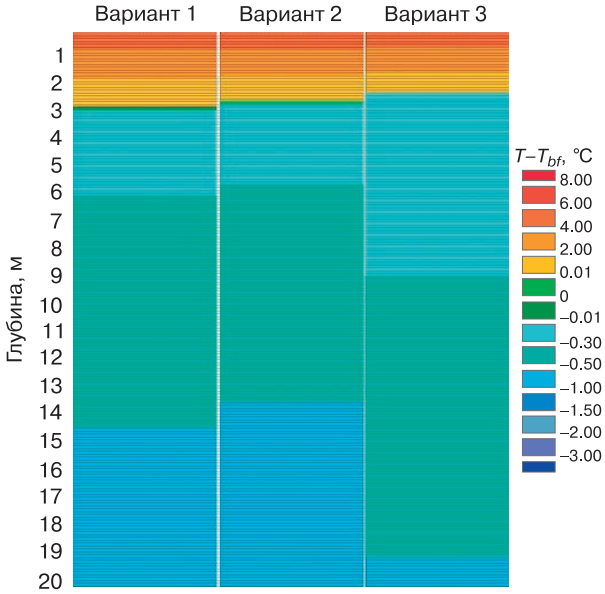

Рис. 2. Температурные поля на конец летнего периода 30-го года расчета для суглинков.

вания меньше: при использовании лабораторных данных глубина оттаивания составляет 2.9 м, а при использовании табличных – 2.5 м. На основе прогнозных расчетов для песков с использованием данных СП 25.13330.2012, вероятнее всего, будут заложены проектные мероприятия по температурной стабилизации грунтов, которые являются достаточно дорогостоящими и могут быть нецелесообразными. Это приведет к несоизмеримому удорожанию стоимости проекта по сравнению со стоимостью лабораторных определений на этапе инженерных изысканий. В случае с суглинками придется полагаться на своевременное выявление опасных процессов, не спрогнозированных заблаговременно, и на принятие непредусмотренных дополнительных оперативных инженерно-технических мер по предотвращению или устранению дефектов в процессе строительства и эксплуатации.

Объекты инфраструктуры нефтегазовых месторождений часто размещаются на площадках с искусственной песчаной подсыпкой, подстилаемой глинистыми грунтами. Результаты расчетов (температурные поля) на конец летнего периода 30-го года для такой площадки по трем вариантам задания свойств грунтов приведены на рис. 3. Мощность насыпного песчаного слоя принята равной 3 м. Начальные условия такие же, как в предыдущих расчетах.

Из расчетов для площадки с насыпью (см. рис. 3) следует, что в случае определения свойств согласно [*СП 25.13330.2012*] грунты должны оттаять на глубину 9.8 м, что нарушит принцип I использования грунтов в качестве оснований. Соответственно, для сохранения грунтов в мерзлом состоянии необходимо будет разрабатывать мероприятия по температурной стабилизации грунтов там, где по сути их быть не должно, так как расчет на основе лабораторных данных показывает, что оттаивание составит 4.5 м. Получается, сэкономив на инженерных изысканиях, заказчик будет вынужден потратить дополнительные средства на инженерную защиту и температурную стабилизацию грунтов.

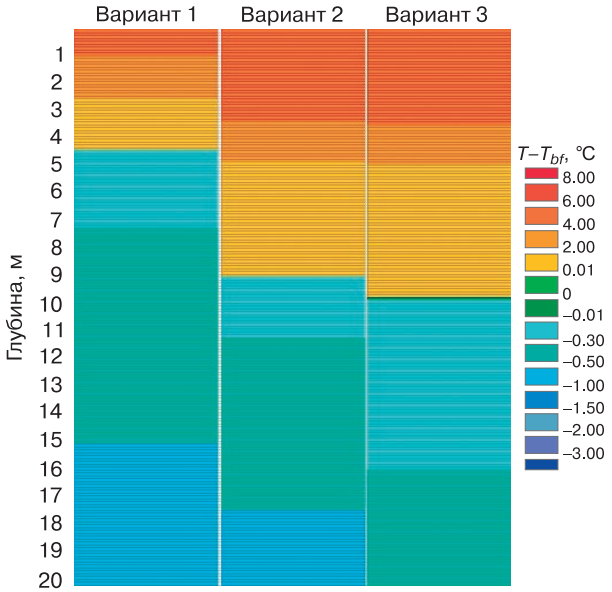

Рис. 3. Температурные поля на конец летнего периода 30-го года расчета для площадки с насыпью.

ВЫВОДЫ

1. Несогласованность нормативных документов относительно способа определения тех или иных свойств грунтов вводит в “заблуждение” как заказчиков и проектно-изыскательские организации, так и экспертов, поскольку в техническом задании на инженерные изыскания обычно указывается, что работы должны быть выполнены в соответствии и с СП 11-105-97, и с СП 25.13330.2012.

2. Наибольшая разница результатов прогнозных расчетов по табличным и экспериментальным данным установлена для песчаных грунтов, так как именно для песков данные в СП 25.13330.2012 являются обобщением в большей степени, чем для суглинков.

3. От теплопроводности, теплоемкости и количества незамерзшей воды непосредственно зависит динамика процессов, и их прямое определение обязательно должно проводиться при проектировании и строительстве в криолитозоне. Документов, регламентирующих теплотехнические расчеты и предписывающих прямое определение теплофизических свойств грунтов, нет. Поэтому на стадии разработки технического задания на инженерные изыскания заказчикам необходимо прописывать требование на прямое определение этих параметров, поскольку в дальнейшем это может в значительной мере повлиять как на капитальные и эксплуатационные затраты, так и на надежность объектов в целом.

Литература

Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдарацкой губы Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 13–25.

Aleksyutina, D.M., Motenko, R.G., 2017. The composition, structure, and properties of frozen and thawed deposits on the Baidaratskaya Bay coast, Kara Sea. Earth’s Cryosphere XXI (1), 11–22.

Вотяков И.Н. К вопросу о методике определения фазового состава воды в мерзлых грунтах естественной структуры // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. М., Изд-во АН СССР, 1952, вып. 3, с. 72–87.

Votyakov, I.N., 1952. On the method for estimation of water phase composition in frozen soils of natural structure, in: Permafrost Studies in Yakutia. Izd. AN SSSR, Moscow, Issue 3, pp. 72–87. (in Russian)

Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 507 с.

Ershov, E.D. (Ed.), 2004. Methods for Geocryological Studies. Moscow University Press, Moscow, 507 pp. (in Russian)

Основы геокриологии. Т. 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, 688 с.

Ershov, E.D. (Ed.), 2001. Fundamentals of Geocryology. Book 4. Dynamic Geocryology. Moscow University Press, Moscow, 688 pp. (in Russian)

Савельев Б.А. Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых горных пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1971, 505 с.

Saveliev, B.A., 1971. Physics, Chemistry, and Structure of Natural Ice and Permafrost. Moscow University Press, Moscow, 505 pp. (in Russian)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610461. М., Федерал. служба по интеллект. собственности РФ, 2017.

Computer Program No. 2017610461, 2017. Certificate of Registration. Federal Agency for Intellectual Property of the Russian Federation. (in Russian)

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М., Госстрой РФ, 1999, 54 с.

SP 11-105-97, 1999. Engineering-Geological Surveys for Construction. Part IV. Regulations for Works in Permafrost. Gosstroi RF, Moscow, 54 pp. (in Russian)

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Мин-во регион. развития РФ, 2012, 109 с.

SP 25.13330.2012, 2012. Basements and Foundations on Permafrost. Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow, 109 pp. (in Russian)

Теплофизические свойства горных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 204 с.

Ershov, E.D. (Ed.), 1984. Thermal Properties of Rocks. Moscow University Press, Moscow, 204 pp. (in Russian)

Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.

Cheverev, V.G., 2004. The Nature of Cryogenic Properties of Soils. Nauchnyi Mir, 234 pp. (in Russian)

Шевелев А.С. Физико-механические характеристики многолетнемерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1979, 129 с.

Shevelev, A.S., 1979. Mechanical Properties of Permafrost. Stroyizdat, Moscow, 129 pp. (in Russian)

ASTM D5334-14. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. West Conshohocken, USA, 2014, 53 p.

Поступила в редакцию
4 марта 2017 г.