Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №2, Том 5 / 2018, No 2, Vol 5 <https://t-s.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS218.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS218 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS218>)

Статья поступила в редакцию 26.05.2018; опубликована 18.07.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Макаров А.С., Краев А.Н. Обоснование геометрического и временного масштаба модели автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в лабораторных условиях // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/15SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS218

For citation:

Makarov A.S., Kraev A.N. (2018). Justification of the geometric and time scale of the motor road model on permafrost soils under laboratory conditions. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS218

УДК 624.139.6

Макаров Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Аспирант кафедры «Геотехники»
E-mail: Mak351218@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=930145

Краев Алексей Николаевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Доцент кафедры «Строительные конструкции»
Кандидат технических наук
E-mail: kraev_aln@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=546741

Обоснование геометрического и временного масштаба модели автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в лабораторных условиях

Аннотация. В статье авторами предложено проведение маломасштабных экспериментов с целью повторения температурно-влажностных условий эксплуатации исследуемых натурных объектов с учетом временного и геометрического масштабного факторов. С целью проверки правильности выбранной зависимости временного масштаба от геометрического было выполнено численное моделирование простых объектов с идентичными теплофизическими характеристиками. Численное моделирование осуществлялось по двухслойной явной разностной схеме с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи. Объекты в геометрическом масштабе $M^Г$ 1:1 и временном масштабе $M^В$ 1:1 моделировались в программном комплексе QFrost. Объекты в геометрическом масштабе $M^Г$ 1:30 и временном масштабе $M^В$ 1:900 моделировались при помощи программы Microsoft Office Excel. Приводится сопоставление данных численного моделирования, выполненного в программном комплексе QFrost и Microsoft Office Excel. Дана оценка возможности применения временного масштаба в зависимости от геометрического масштаба. Выполнено математическое моделирование плоскопараллельного промораживания основания автомобильной дороги в геометрическом масштабе $M^Г$ 1:1 и временном масштабе $M^В$ 1:1 в программном комплексе QFrost. Приводится сопоставление результатов математического

моделирования и маломасштабного лабораторного эксперимента, выполненного в геометрическом масштабе $M^Г$ 1:30 к размерам моделируемого объекта с учетом выбранной зависимости временного масштаба от геометрического масштаба. Выявлены наиболее вероятные причины расхождения результатов экспериментального и численного моделирования. Сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям.

Ключевые слова: автомобильная дорога; многолетнемерзлый грунт; экспериментальные исследования; численное моделирование; температура; промораживание грунта; масштабный фактор

Проведение натурных экспериментов и мониторинг исследуемых объектов (зданий и сооружений) является дорогостоящим и трудоемким мероприятием, в том числе в условиях Арктики. Альтернативой натурным экспериментам являются экспериментальные исследования в лабораторных условиях с учетом масштабного фактора [1, 5].

Основные достоинства лабораторных экспериментов:

- сокращение затрат на проведение работ;
- малая продолжительность испытаний по времени.

Основной недостаток лабораторных экспериментов:

- невозможность или неточность повторения природно-климатических и инженерно-геологических условий относительно моделируемого объекта.

Цель проведения маломасштабных экспериментов: повторить с высокой точностью условия эксплуатации исследуемых натурных объектов с учетом временного и геометрического масштабного факторов [2, 4].

В центральной научно-исследовательской лаборатории «Строительство на вечной мерзлоте» ФГБОУ ВО «ТИУ» коллективом авторов был проведен ряд лабораторных исследований на экспериментальном стенде, позволяющем моделировать температурно-влажностные условия основания и земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах.

По окончании серии исследований плоскопараллельного промораживания образца грунта с квазистационарным температурным режимом в лабораторных условиях на экспериментальном стенде производилась обработка полученных данных. С целью верификации результатов эксперимента в лабораторных условиях было проведено численное моделирование промораживания идентичного образца грунта. Результаты сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования показали высокую сходимость значений изменения температуры исследуемого объекта во времени [6].

Численное моделирование плоскопараллельного промораживания образца грунта выполнялось двухслойной явной разностной схемой с применением метода балансов и с энтакпийной формулировкой задачи в программе Microsoft Office Excel [3, 7, 8, 9, 10].

Разностная схема называется двухслойной, если в каждое уравнение для совершения шага по времени входят узлы двух временных слоев. Схема называется явной, если результат вычисляется через несколько соседних точек имеющихся данных. Т. е. в двухслойной явной схеме для перехода на новый временной слой (перемещения расчетной области во времени) используются данные предыдущего временного слоя.

Балансовый подход означает, что в расчетной области выделяются блоки, при этом среда рассматривается как непрерывная, но в пределах каждого блока грунт считается однородным.

Для перехода на новый временной слой рассчитываются теплотокеты между соседствующими блоками и решаются уравнения баланса тепла. При этом считается, что температуры относятся к геометрическим центрам блоков [10].

В расчетной области (в образце грунта) выделялись блоки одинакового размера в количестве 20 штук. Ширина образца равна 100 см, высота – 20 см, шаг по оси абсцисс равен $h_x = 100$ см, по оси ординат – $h_y = 1$ см. Размер каждого блока составляет 1x100 см. Переход каждого блока на новый временной слой осуществлялся по следующей формуле:

$$I^{j+1} = I + \frac{\tau}{v} \sum_k q_k s_k, \quad (1)$$

где τ – шаг по времени, v – объем блока (при постановке задачи в пространстве одного или двух измерений размер блока по «незадействованной» координате полагается равным 1 м), q_k – плотность теплового потока от сопредельных блоков и граничных условий, s_k – площади соответствующих граней [7].

Математических ограничений в дискретизации расчетной области по координатным осям не имеется. Однако для устойчивости явной схемы при дискретизации времени должно выполняться следующее условие:

$$\tau = \frac{h^2}{2\alpha}, \quad (2)$$

α – коэффициент температуропроводности; h – шаг пространственной сетки, аппроксимируемый для многомерных задач исходя из шагов по всем осям:

$$\frac{1}{h^2} = \sum \frac{1}{h_i^2}. \quad (3)$$

Проведение следующих численных экспериментов, моделирующих работу земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах на экспериментальном стенде, показало, что для минимизации погрешности результатов необходимо уменьшить шаг пространственной сетки. При уменьшении шага пространственной сетки вдвое, шаг во времени уменьшается вчетверо и т. д. [7], что делает вычисления в программе Microsoft Office Excel трудоемкими и продолжительными по времени, объем полученных данных сложно анализировать.

С целью автоматизировать процесс проведения численных экспериментов, описывающих водно-тепловой режим исследуемого объекта при промораживании и оттаивании, выполнялось в несколько этапов математическое моделирование образцов в программном комплексе QFrost с последующим сопоставлением результатов моделирования, полученных в программах QFrost и Microsoft Office Excel в геометрическом масштабе $M^Г$ 1:1 и $M^Г$ 1:30, в масштабе времени $M^В$ 1:1 и $M^В$ 1:900 соответственно.

QFrost – программа, позволяющая создавать аналоговые теплофизические процессы в грунтах. В программе QFrost при моделировании используется двухслойная явная разностная схема с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи [7, 9, 10].

На первом этапе в программе QFrost моделировался грунтовый блок шириной $b = 1$ м и толщиной $m = 1$ м и постоянными граничными условиями. Температура на границе (верхняя грань блока) составила $T_{f,m} = -20$ °С, температура в начальный момент времени по всему объему грунта блока – $T_{нач} = +25$ °С, температура начала замерзания грунта блока – $T_{bf} = -0,20$ °С, теплотокет на остальных гранях блока отсутствует. В численном эксперименте моделировался только холодный период работы грунта. Блок выполнен из суглинка со следующими

физическими характеристиками: плотность сухого грунта $\rho_d = 1508 \text{ кг/м}^3$ и влажность $W = 30 \%$. Теплофизические характеристики грунта блока приведены в таблице 1. В программе QFrost геометрический и временной масштаб был принят $M^Г 1:1$ и $M^В 1:1$ соответственно. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта блока по времени в $M^В 1:1$ составила 120 сут. Изменение температуры грунта блока в течение 120 сут. показано на рисунке 1.

Рисунок 1. Изменение температуры грунта блока в течение 120 сут. в $M^В 1:1$ (составлено авторами)

Таблица 1

Теплофизические характеристики грунта моделируемого блока

Наименование	Значение
Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии $\lambda_f, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,80
Теплопроводность грунта в талом состоянии $\lambda_{th}, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,59
Удельная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии $C_f, \text{кДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$	2805,60
Удельная теплоемкость грунта в талом состоянии $C_{th}, \text{кДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$	3332,70
Теплота таяния (замерзания) грунта $L_v, \text{МДж/м}^3$	84,83
Температура начала замерзания грунта $T_{bf}, ^\circ\text{C}$	-0,20

Составлено авторами

Параллельно было проведено моделирование грунтового блока в Microsoft Office Excel по двухслойной явной разностной схемой с применением метода балансов и с энтальпийной формулировкой задачи. Вышеприведенный численный метод заложен в алгоритм программы QFrost. Температура граничных и начальных условий, коэффициент теплообмена, теплофизические и физические характеристики грунта блока были приняты идентичными к моделируемому блоку в программе QFrost. При расчете в Microsoft Office Excel геометрический и временной масштаб был принят $M^Г 1:30$ и $M^В 1:900$ соответственно. Исходя из принятого геометрического масштаба размер блока составил $0,033 \times 0,033 \text{ м}$. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта блока по времени в $M^В 1:900$ составила 3,20 ч, что соответствует 120 сут. в $M^В 1:1$. Изменение температуры грунта блока в течение 3,20 ч при $M^В 1:900$ показано на рисунке 2.

Исходные данные			Время в масштабе 1:1			Расчет в масштабе 1:30				
						Время, ч	Расчет температуры, °C		Расчет относительного объема талой фазы	
							Граница	Блок 1	Граница	Блок 1
Tbf=	-0.20	°C	Месяцы	Дни	Часы					
λth=	1,59	Вт/м*°C		0	0	0	-20,00	25,00	-20,00	100,00%
Cth=	925,75	Вт*ч/м³*°C		4	90	0,100	-20,00	21,28	-20,00	100,00%
r=	0,033333	м		8	180	0,200	-20,00	17,87	-20,00	100,00%
sk=	0,033333	м²		11	270	0,300	-20,00	14,74	-20,00	100,00%
v=	0,001111	м³		15	360	0,400	-20,00	11,87	-20,00	100,00%
τ≤	0,161731	ч		19	450	0,500	-20,00	9,24	-20,00	100,00%
τ=	0,1	ч		23	540	0,600	-20,00	6,82	-20,00	100,00%
				26	630	0,700	-20,00	4,60	-20,00	100,00%
Cf=	779,33	Вт*ч/м³*°C	1	30	720	0,800	-20,00	2,57	-20,00	100,00%
λf=	1,8	Вт/м*°C		34	810	0,900	-20,00	0,71	-20,00	100,00%
				36	858	0,953	-20,00	-0,20	-20,00	100,00%
Lv=	23563,89	Вт*ч/м³		38	900	1,000	-20,00	-0,20	-20,00	96,98%
				41	990	1,100	-20,00	-0,20	-20,00	90,55%
1/h ₁ ²=	900	м		45	1080	1,200	-20,00	-0,20	-20,00	84,12%
1/h ₂ ²=	900	м		49	1170	1,300	-20,00	-0,20	-20,00	77,69%
1/h²=	1800	м		53	1260	1,400	-20,00	-0,20	-20,00	71,27%
h²=	0,000556	м		56	1350	1,500	-20,00	-0,20	-20,00	64,84%
			2	60	1440	1,600	-20,00	-0,20	-20,00	58,41%
α=	0,001718			64	1530	1,700	-20,00	-0,20	-20,00	51,98%
				68	1620	1,800	-20,00	-0,20	-20,00	45,56%
				71	1710	1,900	-20,00	-0,20	-20,00	39,13%
				75	1800	2,000	-20,00	-0,20	-20,00	32,70%
				79	1890	2,100	-20,00	-0,20	-20,00	26,27%
				83	1980	2,200	-20,00	-0,20	-20,00	19,85%
				86	2070	2,300	-20,00	-0,20	-20,00	13,42%
			3	90	2160	2,400	-20,00	-0,20	-20,00	6,99%
				94	2250	2,500	-20,00	-0,20	-20,00	0,56%
				94	2258	2,509	-20,00	-0,20	-20,00	0,00%
				98	2340	2,600	-20,00	-2,03	-20,00	0,00%
				101	2430	2,700	-20,00	-3,85	-20,00	0,00%
				105	2520	2,800	-20,00	-5,49	-20,00	0,00%
				109	2610	2,900	-20,00	-6,96	-20,00	0,00%
				113	2700	3,000	-20,00	-8,28	-20,00	0,00%
				116	2790	3,100	-20,00	-9,47	-20,00	0,00%
			4	120	2880	3,200	-20,00	-10,53	-20,00	0,00%

Рисунок 2. Изменение температуры грунта блока в течение 3,20 ч при M^B 1:900 (составлено авторами)

Результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel представлены на сравнительном графике изменения температуры грунта блока во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 соответственно (см. рисунок 3).

Рисунок 3. График изменения температуры грунта блока во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 (составлено авторами)

Сопоставляя результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel в момент времени, равный значению времени продолжительности моделирования теплофизических процессов грунта блока $t = 120$ сут., сделаны следующие выводы:

Значение температуры моделируемого грунта (блока) в момент времени $t = 120$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost согласно данным журналирования равно $T_{\text{QFrost}} = -10,01$ °C, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{Excel}} = -10,53$ °C. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T = 0,52$ °C. Вероятной причиной разницы значений температур может быть дискретизация времени.

На втором этапе в программе QFrost моделировался грунтовый стержень шириной $b = 1$ м и высотой $m = 2$ м. При моделировании грунтового стержня выделены блоки одинакового размера в количестве 2 штук, размер каждого блока составляет 1×1 м. Температура граничных и начальных условий, теплофизические и физические характеристики грунта, геометрический и временной масштабы моделирования стержня были приняты идентичными к моделируемому блоку в программе QFrost, рассматриваемому на первом этапе. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта стержня по времени в M^B 1:1 составила 120 сут. Изменение температуры грунта стержня в течение 120 сут. показано на рисунке 4.

Параллельно было проведено моделирование грунтового стержня в Microsoft Office Excel. Температура граничных (верхняя грань стержня) и начальных условий, теплофизические и физические характеристики грунта, геометрический и временной масштабы моделирования стержня были приняты идентичными к моделируемому блоку в программе Microsoft Office Excel, рассматриваемому на первом этапе. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта (блока) по времени в M^B 1:900 составила 3,20 ч, что соответствует 120 сут. в M^B 1:1. Изменение температуры грунта блока в течение 3,20 ч при M^B 1:900 показано на рисунке 5.

Рисунок 4. Изменение температуры грунта стержня в течение 120 сут. в M^B 1:1 (составлено авторами)

Исходные данные	Время в масштабе 1:1			Расчет в масштабе 1:30						
				Время, ч	Расчет температуры, °C			Расчет относительно объема талой фазы		
	Месяцы	Дни	Часы		Граница	Блок 1	Блок 2	Граница	Блок 1	Блок 2
Tbf= -0,20 °C				0	-20,00	25,00	25,00	-20,00	100,00%	100,00%
λth= 1,59 Вт/м*°C				4	-20,00	21,28	25,00	-20,00	100,00%	100,00%
Cth= 925,75 Вт*ч/м³*°C				8	-20,00	18,45	24,43	-20,00	100,00%	100,00%
г= 0,033333 м				11	-20,00	16,19	23,50	-20,00	100,00%	100,00%
sk= 0,033333 м²				15	-20,00	14,33	22,37	-20,00	100,00%	100,00%
ν= 0,001111 м³				19	-20,00	12,74	21,13	-20,00	100,00%	100,00%
τ≤ 0,161731 ч				23	-20,00	11,33	19,83	-20,00	100,00%	100,00%
τ= 0,1 ч				26	-20,00	10,05	18,52	-20,00	100,00%	100,00%
Cf= 779,33 Вт*ч/м²*°C	1	30	720	0,800	-20,00	8,88	17,21	-20,00	100,00%	100,00%
λf= 1,8 Вт/м*°C		34	810	0,900	-20,00	7,78	15,92	-20,00	100,00%	100,00%
		38	900	1,000	-20,00	6,74	14,66	-20,00	100,00%	100,00%
Lv= 23563,89 Вт*ч/м³		41	990	1,100	-20,00	5,76	13,44	-20,00	100,00%	100,00%
		45	1080	1,200	-20,00	4,82	12,25	-20,00	100,00%	100,00%
1/h _с ² = 900 м		49	1170	1,300	-20,00	3,92	11,10	-20,00	100,00%	100,00%
1/h _с ² = 900 м		53	1260	1,400	-20,00	3,05	9,99	-20,00	100,00%	100,00%
1/h _с ² = 1800 м		56	1350	1,500	-20,00	2,22	8,92	-20,00	100,00%	100,00%
h _с ² = 0,000556 м	2	60	1440	1,600	-20,00	1,42	7,88	-20,00	100,00%	100,00%
		64	1530	1,700	-20,00	0,65	6,88	-20,00	100,00%	100,00%
α= 0,001718		68	1620	1,800	-20,00	-0,09	5,92	-20,00	100,00%	100,00%
		68	1633	1,815	-20,00	-0,20	5,78	-20,00	100,00%	100,00%
		71	1710	1,900	-20,00	-0,20	4,99	-20,00	97,62%	100,00%
		75	1800	2,000	-20,00	-0,20	4,19	-20,00	94,34%	100,00%
		79	1890	2,100	-20,00	-0,20	3,51	-20,00	90,58%	100,00%
		83	1980	2,200	-20,00	-0,20	2,94	-20,00	86,41%	100,00%
		86	2070	2,300	-20,00	-0,20	2,45	-20,00	81,89%	100,00%
	3	90	2160	2,400	-20,00	-0,20	2,04	-20,00	77,07%	100,00%
		94	2250	2,500	-20,00	-0,20	1,70	-20,00	72,01%	100,00%
		98	2340	2,600	-20,00	-0,20	1,40	-20,00	66,73%	100,00%
		101	2430	2,700	-20,00	-0,20	1,16	-20,00	61,28%	100,00%
		105	2520	2,800	-20,00	-0,20	0,95	-20,00	55,67%	100,00%
		109	2610	2,900	-20,00	-0,20	0,77	-20,00	49,94%	100,00%
		113	2700	3,000	-20,00	-0,20	0,62	-20,00	44,10%	100,00%
		116	2790	3,100	-20,00	-0,20	0,49	-20,00	38,17%	100,00%
	4	120	2880	3,200	-20,00	-0,20	0,39	-20,00	32,16%	100,00%

Рисунок 5. Изменение температуры грунта стержня в течение 3,20 ч при M^B 1:900 (составлено авторами)

Результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel представлены на сравнительном графике изменения температуры грунта стержня во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 соответственно (см. рисунок 6).

Рисунок 6. График изменения температуры грунта стержня во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 (составлено авторами)

Сопоставляя результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel в момент времени, равный значению времени продолжительности моделирования теплофизических процессов грунта блока t = 120 сут., сделаны следующие выводы:

1. Значение температуры первого блока моделируемого грунтового стержня в момент времени t = 120 сут. при численном эксперименте в программе QFrost и в Microsoft Office Excel равно T₁ блока QFrost = T₁ блока Excel = -0,20 °C, что соответствует температуре начала замерзания грунта стержня.

2. Значение относительного объема талой фазы первого блока моделируемого грунтового стержня в момент времени $t = 120$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $V_{1 \text{ блока QFrost}} = 31,00 \%$, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $V_{1 \text{ блока Excel}} = 32,16 \%$. Абсолютная погрешность относительного объема талой фазы составила $\Delta V_{1 \text{ блока}} = 1,16 \%$.
3. Значение температуры второго блока моделируемого грунтового стержня в момент времени $t = 120$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{2 \text{ блока QFrost}} = 0,48^\circ\text{C}$, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{2 \text{ блока Excel}} = 0,39^\circ\text{C}$. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{2 \text{ блока}} = 0,09^\circ\text{C}$.

На третьем этапе в программе QFrost моделировалась крестовидная фигура (см. рисунок 7). При моделировании крестовидной фигуры выделены блоки одинакового размера в количестве пяти штук, размер каждого блока составляет 1×1 м. Температура граничных (отмечена желтой линией) и начальных условий, теплофизические и физические характеристики грунта, геометрический и временной масштабы моделирования крестовидной фигуры были приняты идентичными к моделируемому блоку в программе QFrost, рассматриваемому на первом этапе. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта крестовидной фигуры по времени в M^B 1:1 составила 60 сут. Изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 60 сут. показано на рисунке 7.

Рисунок 7. Изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 60 сут. в M^B 1:1 (составлено авторами)

Параллельно было проведено моделирование крестовидной фигуры в Microsoft Office Excel. Температура граничных и начальных условий, теплофизические и физические характеристики грунта, геометрический и временной масштабы моделирования крестовидной фигуры были приняты идентичными к моделируемому блоку в программе Microsoft Office Excel, рассматриваемому на первом этапе. Продолжительность моделирования теплофизических процессов грунта крестовидной фигуры по времени в M^B 1:900 составила 1,60 ч, что соответствует 60 сут. в M^B 1:1. Изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 1,60 ч при M^B 1:900 показано на рисунке 8.

Результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel представлены на сравнительном графике изменения температуры грунта крестовидной фигуры во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 соответственно (см. рисунок 9).

Сопоставляя результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel в момент времени, равный значению времени продолжительности моделирования

теплофизических процессов грунта крестовидной фигуры $t = 60$ сут., сделаны следующие выводы:

1. Значение температуры верхнего блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{верхнего блока QFrost}} = -7,27$ °С, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{верхнего блока Excel}} = -8,28$ °С. Абсолютная погрешность температуры $\Delta T_{\text{верхнего блока}} = 1,01$ °С. Вероятной причиной разницы значений температур может быть дискретизация времени.
2. Значение температуры центрального блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{центрального блока QFrost}} = 5,84$ °С, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{центрального блока Excel}} = 5,44$ °С. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{центрального блока}} = 0,40$ °С.
3. Значение температуры левого и нижнего блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{левого блока QFrost}} = T_{\text{нижнего блока QFrost}} = 12,12$ °С, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{левого блока Excel}} = T_{\text{нижнего блока Excel}} = 12,07$ °С. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{левого блока}} = \Delta T_{\text{нижнего блока}} = 0,05$ °С.
4. Значение температуры правого блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{правого блока QFrost}} = -0,10$ °С, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{правого блока Excel}} = -0,20$ °С. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{правого блока}} = 0,10$ °С.

[illegible]

Рисунок 8. Изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 1,60 ч при M^B 1:900 (составлено авторами)

Результаты сопоставления моделирования на трех этапах в программе QFrost и Microsoft Office Excel указывают на высокую сходимость значений изменения температуры исследуемого объекта во времени. Наибольшая абсолютная погрешность температуры наблюдается в верхнем блоке моделируемой грунтовой крестовидной фигуры. Погрешность значений температур зависит от дискретизации времени. При моделировании в три этапа в программе QFrost и Microsoft Office Excel приняты разные временные шаги, удовлетворяющие условию 2.

Рисунок 9. График изменения температуры грунта крестовидной фигуры во времени в M^B 1:1 и M^B 1:900 (составлено авторами)

В качестве примера влияния дискретизации времени на точность вычислений в программе Microsoft Office Excel было проведено численное моделирование грунта крестовидной фигуры. Температура граничных и начальных условий, теплофизические и физические характеристики грунта, геометрический и временной масштабы моделирования крестовидной фигуры были приняты идентичными к моделируемой крестовидной фигуре в программе QFrost, рассматриваемой на третьем этапе. На рисунке 10 показано изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 60 сут. при M^B 1:1.

Сопоставляя результаты численного моделирования в программе QFrost и Microsoft Office Excel в момент времени, равный значению времени продолжительности моделирования теплофизических процессов грунта крестовидной фигуры $t = 60$ сут. при M^B 1:1, сделаны следующие выводы:

1. Значение температуры верхнего блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{верхнего блока QFrost}} = -7,27$ °C, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{верхнего блока Excel}} = -7,26$ °C. Абсолютная погрешность температуры $\Delta T_{\text{верхнего блока}} = 0,01$ °C.
2. Значение температуры центрального блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{центрального блока QFrost}} = 5,84$ °C, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{центрального блока Excel}} = 5,90$ °C. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{центрального блока}} = 0,06$ °C.

3. Значение температуры левого и нижнего блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{левого блока QFrost}} = T_{\text{нижнего блока QFrost}} = 12,12$ °C, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{левого блока Excel}} = T_{\text{нижнего блока Excel}} = 12,19$ °C. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{левого блока}} = \Delta T_{\text{нижнего блока}} = 0,07$ °C.
4. Значение температуры правого блока моделируемой грунтовой крестовидной фигуры в момент времени $t = 60$ сут. при численном эксперименте в программе QFrost равно $T_{\text{правого блока QFrost}} = -0,10$ °C, при численном эксперименте в Microsoft Office Excel равно $T_{\text{правого блока Excel}} = -0,04$ °C. Абсолютная погрешность температуры составила $\Delta T_{\text{правого блока}} = 0,06$ °C.

Корреляция геометрического и временного масштаба при численном моделировании приводит к незначительным погрешностям при дискретизации по времени.

Исходные данные			Расчет в масштабе 1:1				Расчет в масштабе 1:1			
Tbfc	-0,20	°C	Дни	Время, ч	Расчет температуры, °C	Расчет относительного объема талой фазы	Дни	Время, ч	Расчет температуры, °C	Расчет относительного объема талой фазы
λth=	1,59	Вт/м*°C	0,00	0,00	-20,00	-20,00	51,00	1224,00	-20,00	-20,00
Cth=	925,75	Вт*ч/м³*°C			-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
rs=	1	м			25,00	100,00%			14,42	100,00%
sk=	1	м²			25,00	100,00%			14,42	100,00%
vs=	1	м³			25,00	100,00%			14,42	100,00%
ts	145,556	ч	1,00	24,00	-20,00	-20,00	52,00	1248,00	-20,00	-20,00
te	24	ч			-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
Cf=	779,33	Вт*ч/м³*°C			25,00	100,00%			14,18	100,00%
λf=	1,8	Вт/м*°C			25,00	100,00%			14,18	100,00%
Lv=	23563,9	Вт*ч/м³	2,00	48,00	-20,00	-20,00	53,00	1272,00	-20,00	-20,00
					-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
					25,00	100,00%			13,94	100,00%
					25,00	100,00%			13,94	100,00%
1/h ₁ =	1	м	3,00	72,00	-20,00	-20,00	54,00	1296,00	-20,00	-20,00
1/h ₂ =	1	м			-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
1/h ₃ =	2	м			-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
h ₂ =	0,5	м			-20,00	100,00%			-20,00	100,00%
α=	0,00172				-20,00	100,00%			-20,00	100,00%

Рисунок 10. Изменение температуры грунта крестовидной фигуры в течение 60 сут. при M^B 1:1 (составлено авторами)

С целью реализации и возможности применения программного комплекса QFrost для последующего математического моделирования уменьшенных моделей в лабораторных условиях было проведено сопоставление результатов изменения температуры во времени в слоях грунта основания при эксперименте в лабораторных условиях и численном моделировании в программе QFrost (см. рисунки 11, 12, 13). Результаты и методика проведения лабораторного эксперимента описаны в [6]. Интерпретация результатов численной модели QFrost к уменьшенной модели в лабораторных условиях осуществлялась геометрическим и

временным подобием. Продолжительность лабораторного моделирования теплофизических процессов уменьшенной модели по времени в M^B 1:900 составила 24 ч, что соответствует 900 суткам в M^B 1:1.

Рисунок 11. График изменения температуры во времени на глубине 5 мм грунта основания при численном моделировании в программе QFrost и эксперименте в лабораторных условиях (составлено авторами)

Рисунок 12. График изменения температуры во времени на глубине 57 мм грунта основания при численном моделировании в программе QFrost и эксперименте в лабораторных условиях (составлено авторами)

Рисунок 13. График изменения температуры во времени на глубине 195 мм грунта основания при численном моделировании в программе QFrost и эксперименте в лабораторных условиях (составлено авторами)

Сопоставляя результаты экспериментальных данных и численного моделирования в программе QFrost в момент времени, равный значению времени продолжительности моделирования теплофизических процессов грунта основания $t = 900$ сут., сделаны следующие выводы:

1. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 5 мм в момент времени $t = 900$ сут. при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.5мм}} = -1,05$ °C, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.5мм}} = -0,92$ °C. Абсолютная погрешность температур составляет $\Delta T_{\text{гл.5мм}} = 0,13$ °C.
2. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 57 мм в момент времени $t = 900$ сут. при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.57мм}} = -0,02$ °C, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.57мм}} = 0,16$ °C. Абсолютная погрешность температур составляет $\Delta T_{\text{гл.57мм}} = 0,18$ °C.
3. Значение температуры моделируемого грунта основания на глубине 195 мм в момент времени $t = 900$ сут. при лабораторном эксперименте равно $T_{\text{лаб.гл.195мм}} = 1,14$ °C, при численном эксперименте равно $T_{\text{числ.гл.195мм}} = 1,35$ °C. Абсолютная погрешность температур составляет $\Delta T_{\text{гл.195мм}} = 0,21$ °C.
4. Вероятными причинами разницы значений температур грунта в слоях основания при сопоставлении результатов лабораторного и численного эксперимента в момент времени $t = 900$ сут. могут быть следующие факторы:
 - погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями;
 - в экспериментальном стенде не обеспечено идеальное плоскопараллельное промораживание грунта;
 - колебания температуры в морозильной камере при проведении эксперимента в лабораторных условиях;

- дискретизация времени при численном моделировании объекта в программе QFrost.

Результаты сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования в программе QFrost указывают на высокую сходимость значений изменения температуры исследуемого объекта во времени, что позволяет сделать вывод о возможности математического моделирования теплофизических процессов на лабораторной модели с заданным геометрическим и временным масштабом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карлов В.Д. Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1998.
2. Краев Ал.Н., Пермитина Т.В. Методика проведения лабораторного исследования автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ – В 2-х т. – Т. I. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2015. – С. 64-72.
3. Кудрявцев, С.А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С.А. Кудрявцев, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов. – СПб: Группа компаний «Геореконструкция», 2014. – 248 с.
4. Макаров А.С., Краев Ал.Н. Использование некондиционных грунтов в теле насыпи автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ – В 2-х т. – Т. I. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2015. – С. 79-85.
5. Макаров А.С., Шанхоев З.Ш., Земеров И.В., Скворцов Д.С. Анализ масштабного фактора при моделировании автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 4. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 256-259.
6. Макаров А.С., Краев А.Н., Твердохлеб С.А., Шанхоев З.Ш. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2014) – Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
7. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: МГУ, 1999. – 526 с.
8. Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2015.
9. Хрусталева Л.Н., Черкасова Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания-оттаивания грунта // Изв. Сибирского отд. А.Н. СССР, серия техн. наук. – 1966. – Т. 6, № 2. – С. 12-24.
10. URL: http://qfrost.net/index_ru.html. (Дата обращения: 12.06.2018).

Makarov Aleksei Sergeevich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: Mak351218@mail.ru

Kraev Alexey Nikolaevich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: kraev_aln@mail.ru

Justification of the geometric and time scale of the motor road model on permafrost soils under laboratory conditions

Abstract. In the article, the authors proposed small-scale experiments with the aim of repeating the temperature and humidity operating conditions of the objects under study, taking into account temporal and geometric scale factors. In order to verify the correctness of the chosen time to geometric scale correlation, numerical simulations of simple objects with identical thermophysical characteristics were performed. Numerical simulations were carried out using a bilayered explicit difference scheme, including the balance method with the enthalpy formulation of the problem. Objects in the geometric scale M^G 1:1 and a time scale M^T 1:1 were simulated in the QFrost program complex. Objects in the geometric scale M^G 1:30 and time scale M^T 1:900 were simulated using the Microsoft Office Excel program. Comparison of the numerical simulation data in the QFrost and Microsoft Office Excel software is presented. The possible estimation of applying a time scale depending on the geometric scale is given. A mathematical simulation of plane-parallel freezing of the highway footing in the geometric scale M^G 1:1 and a time scale M^T 1:1 in the QFrost software complex is performed. Taking into account the chosen dependence of the time scale on the geometric scale, a comparison of the results of mathematical modeling and a small-scale laboratory experiment, that was performed at the geometric scale of M^G 1:30 to dimensions of the modeled object, is made. The most probable causes of the discrepancy between the results of experimental and numerical modeling are revealed. The main conclusions on the conducted researches are formulated.

Keywords: highway; permafrost; experimental studies; numerical simulation; temperature; soil freezing; scale factor

REFERENCES

1. Karlov V.D. (1998). Sezonnopromerzaiushchie grunty kak osnovaniia sooruzhenii. [*Seasonally frozen soils as base of structures.*] Saint Petersburg.
2. Kraev A.I., Permitina T.V. (2015). Metodika provedeniia laboratornogo issledovaniia avtomobilnoi dorogi na mnogoletnemerzlykh gruntakh. [*Technique of carrying out laboratory research of a motor road on permafrost soils.*] Tyumen: RIO TyumSASU, pp. 64-72.
3. Kudriavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. (2014). Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety). [*Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations).*] Saint Petersburg: Group of companies "Georeconstruction", p. 248.
4. Makarov A.S., Kraev A.I. (2015). Ispolzovanie nekonditsionnykh gruntov v tele nasypi avtomobilnykh dorog v usloviakh vечноi merzloty. [*Use of substandard soils in the body of the embankment of highways in permafrost conditions.*] Tyumen: RIO TyumSASU, pp. 79-85.
5. Makarov A.S., Shankhoyev Z.Sh., Zemerov I.V., Skvortsov D.S. (2017). Analiz masshtabnogo faktora pri modelirovanii avtomobilnoi dorogi na mnogoletnemerzlykh gruntakh. [*Analysis of the scale factor in the modeling of the motor road on permafrost soils.*] Tyumen: Tyumen Industrial University, pp. 256-259.
6. Makarov A.S., Kraev A.I., Tverdokhlebov S.A., Shankhoyev Z.Sh. (2014). Results of experimental research and numerical modeling of plane-parallel freezing of a soil sample in an experimental test-bed. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/09TS417.
7. (1999). Osnovy geokriologii. Chast 5. Inzhenernaia geokriologiya. Ed. by E.D. Ershov. [*Fundamentals of Geocryology. Part 5. Engineering geocryology.*] Moscow, p. 256.
8. Spasennikova K.A. (2015). Kompiuternoe modelirovanie teplomassoperenosa v gruntakh pod sooruzheniyami, postroennymi na vечноi merzlotte s ispolzovaniem sezonnykh okhlazhdaiushchikh ustroystv. [*Computer modeling of heat and mass transfer in soils under structures built on permafrost using seasonal cooling devices.*] Tyumen.
9. Khrustalev L.N., Cherkasova L.N. (1966). Numerical method for solving the problem of freezing-thawing of soil. *Izvestiya Sibirskogo Otd. A.N. the USSR*, [online] 2(6), pp. 12-24. (in Russian).
10. qfrost.net. (n.d.). [online] Available at: http://qfrost.net/index_ru.html (in Russian). [Accessed 12.06.2018].