

Теплофизические свойства грунтов

Теплофизические характеристики:

- Теплопроводность в талом и мерзлом состояний
- Теплоемкость в талом и мерзлом состоянии.
- Температуропроводность
- Теплота фазовых переходов.
- Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры
- Температура начала замерзания и оттаивания

$$C \frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dx^2} \quad \left(C + L \cdot \frac{dW}{dT} \right) \frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dx^2}$$

Теплопроводность

Рассмотрим стационарный процесс распространения теплоты через однородный слой грунта.

Из закона распространения теплоты путем теплопроводности (закон Фурье) следует:

$$q = \lambda \cdot \Delta T / \Delta h, \quad (1)$$

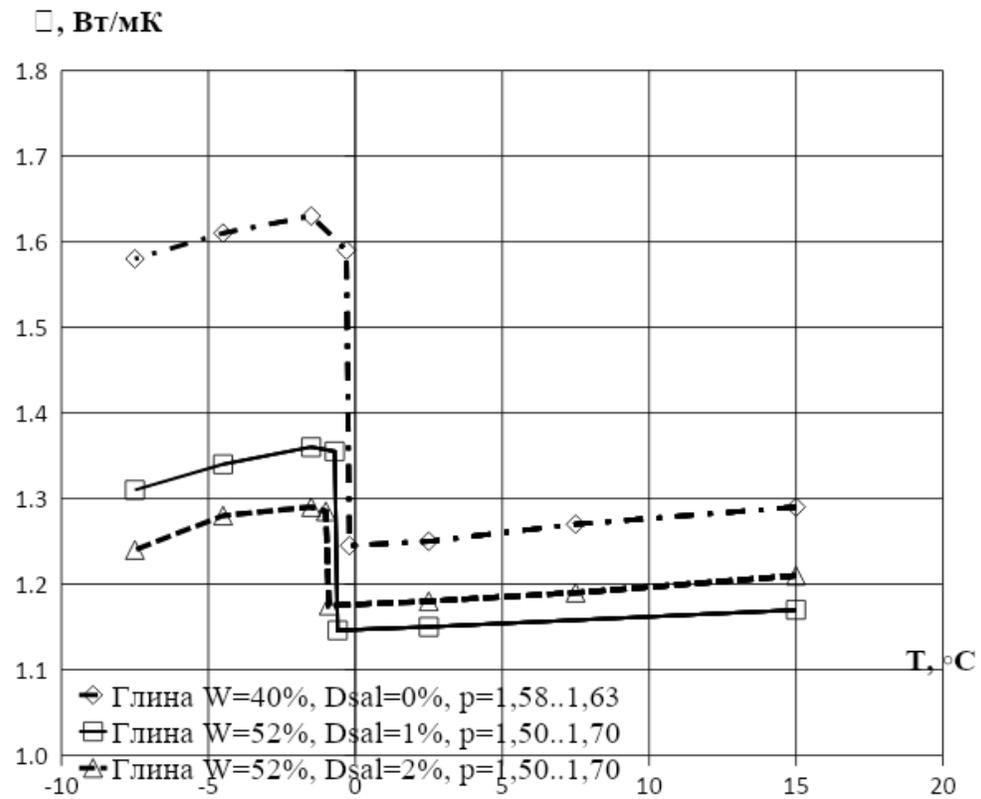
где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

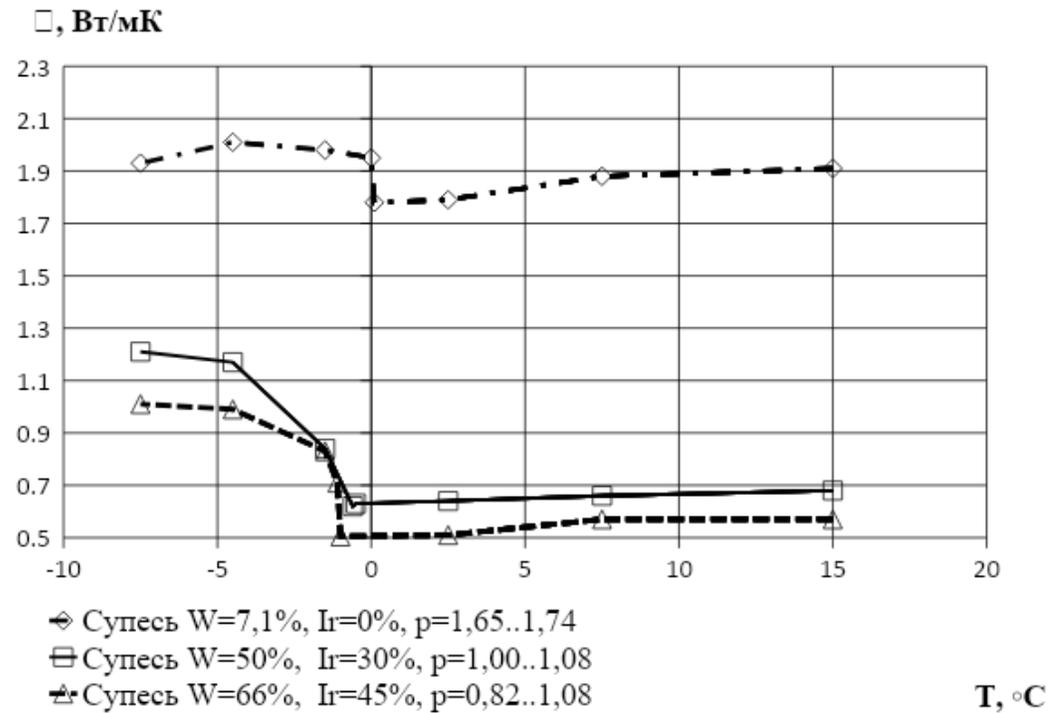
$\Delta T / \Delta h$ – градиент температуры слоя грунта (gradT, К/м);

К – градус по Кельвину;

м – метр.



Зависимость теплопроводности от температуры для каолиновой глины разной степени засоления



Зависимость теплопроводности от температуры супеси с разной степени затофованности

СП 25.13330-2012

Таблица Б.8 – Расчетные значения коэффициента теплопроводности грунта в талом λ_{th} , мерзлом λ_{fm} ($T \leq -15^\circ\text{C}$) состоянии

Плотность сухого грунта ρ_{dth} , ρ_{df} , кН/м^3	Суммарная влажность грунта, W_{tot} , Д. е.	Коэффициент теплопроводности грунтов λ , Вт/(м·°С)															Загорфованные грунты	
		Пески разной плотности					Супеси пылеватые					Суглинки и глины						
		Степень засоленности					Степень засоленности					Степень засоленности						
		Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные	Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные	Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные		
λ_{th}	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_{th}	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_m	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_{th}	λ_f	
1,0	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	1,34
1,0	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,70
1,0	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23	0,41
1,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,12	0,23
2,0	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	1,33
2,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23	0,52
3,0	3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,93	1,39
3,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,41	0,70
4,0	2,0	-	-	-	-	-	-	2,16	-	-	-	-	2,10	-	-	-	0,93	1,39
7,0	1,0	-	-	-	-	-	-	2,14	-	-	-	-	2,00	-	-	-	-	-
10,0	0,60	-	-	-	-	-	-	2,10	-	-	-	-	1,90	-	-	-	-	-
12,0	0,40	-	-	-	-	-	-	2,02	-	-	-	1,57	1,80	-	-	-	-	-
14,0	0,35	-	-	-	-	-	1,80	2,00	-	-	-	1,57	1,76	1,68	1,65	1,59	-	-
14,0	0,30	-	-	-	-	-	1,74	1,98	1,95	1,91	1,88	1,45	1,65	1,59	1,56	1,50	-	-
14,0	0,25	1,91	2,48	2,37	2,21	2,08	1,57	1,84	1,81	1,78	1,73	1,33	1,58	1,50	1,46	1,36	-	-
14,0	0,20	1,57	2,09	2,00	1,90	1,82	1,33	1,63	1,58	1,53	1,48	1,10	1,31	1,23	1,20	1,10	-	-

Окончание таблицы Б.8

Плотность сухого грунта $\rho_{d,th}$ ρ_{df} кН/м ³	Суммарная влажность грунта, W_{tot} д. е.	Коэффициент теплопроводности грунтов λ , Вт/(м·°С)																
		Пески разной плотности					Супеси пылеватые					Суглинки и глины					Заторфованные грунты	
		Степень засоленности					Степень засоленности					Степень засоленности						
		Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные	Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные	Незасоленные		Слабозасоленные	Среднезасоленные	Сильнозасоленные		
		λ_{th}	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_{th}	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f	λ_{th}	λ_f	λ_f	λ_f	λ_f		
14,0	0,15	1,39	1,83	1,75	1,65	1,58	1,10	1,35	1,30	1,25	1,20	0,87	0,99	0,94	0,92	0,87		
14,0	0,10	1,10	1,35	1,30	1,25	1,21	0,93	1,09	1,06	1,03	0,99	0,70	0,77	0,75	0,73	0,71	—	—
14,0	0,05	0,75	0,84	0,82	0,80	0,77	0,64	0,73	0,71	0,69	0,67	0,46	0,48	0,43*	0,41*	0,40*	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,68	1,94	1,80	1,74	1,65	—	—
16,0	0,25	2,50	2,92	2,86	2,78	2,70	1,80	2,00	1,96	1,92	1,88	1,51	1,75	1,68	1,62	1,49	—	—
16,0	0,20	2,15	2,50	2,43	2,36	2,30	1,62	1,78	1,75	1,71	1,67	1,33	1,56	1,46	1,41	1,30	—	—
16,0	0,15	1,80	2,10	2,03	1,96	1,90	1,45	1,60	1,56	1,52	1,49	1,10	1,23	1,17	1,15	1,08	—	—
16,0	0,10	1,45	1,68	1,62	1,56	1,50	1,16	1,29	1,26	1,22	1,19	0,87	0,97	0,92	0,90	0,86	—	—
16,0	0,05	1,05	1,16	1,10	1,08	1,05	0,81	0,87	0,85	0,84	0,82	0,58	0,60	0,56*	0,55*	0,53*	—	—
18,0	0,20	2,67	3,05	2,92	2,80	2,69	1,86	2,05	2,00	1,94	1,88	1,57	1,86	1,70	1,61	1,48	—	—
18,0	0,15	2,26	2,75	2,63	2,52	2,44	1,68	1,83	1,79	1,74	1,70	1,39	1,60	1,47	1,40	1,36	—	—
18,0	0,10	1,97	2,30	2,23	2,17	2,10	1,45	1,59	1,55	1,51	1,47	1,06	1,26	1,14	1,09	1,02	—	—
18,0	0,05	1,45	1,56	1,52	1,48	1,45	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	0,70	0,75	0,69*	0,68*	0,65*	—	—
20,0	0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,28	1,46	1,35	1,30	1,25	—	—

Теплоемкость

- Собственная теплоемкость C_x
- Эффективная теплоемкость C_{eff}
- Теплота фазовых переходов

$$C_g^{of} = 0,7 - 1,1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$C_w = 4,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$C_i = 2,1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$C_i = 2120 + 7,8 \cdot T$$

СП 25.13330-2012

$$C_x = (W_w C_w + W_i C_i + C_g) \cdot \rho_d$$

$$C_{eff} = C_x + Q_f$$

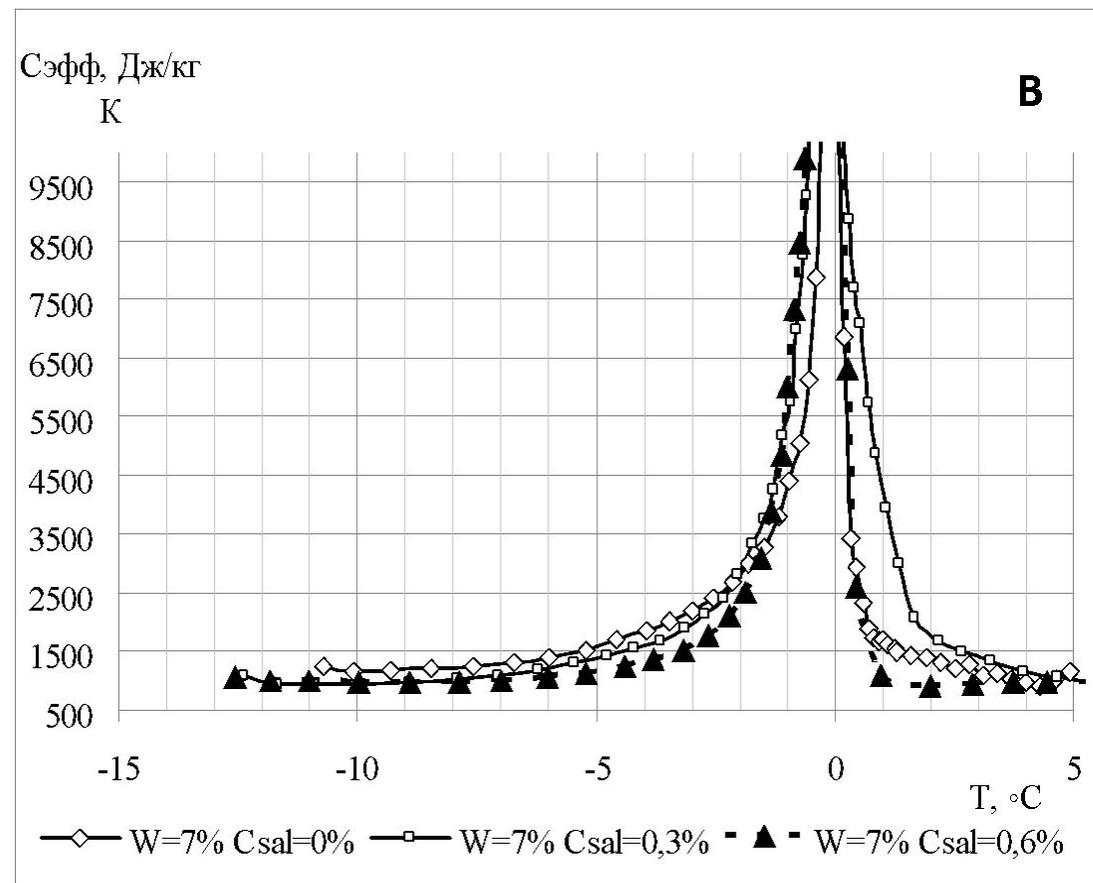
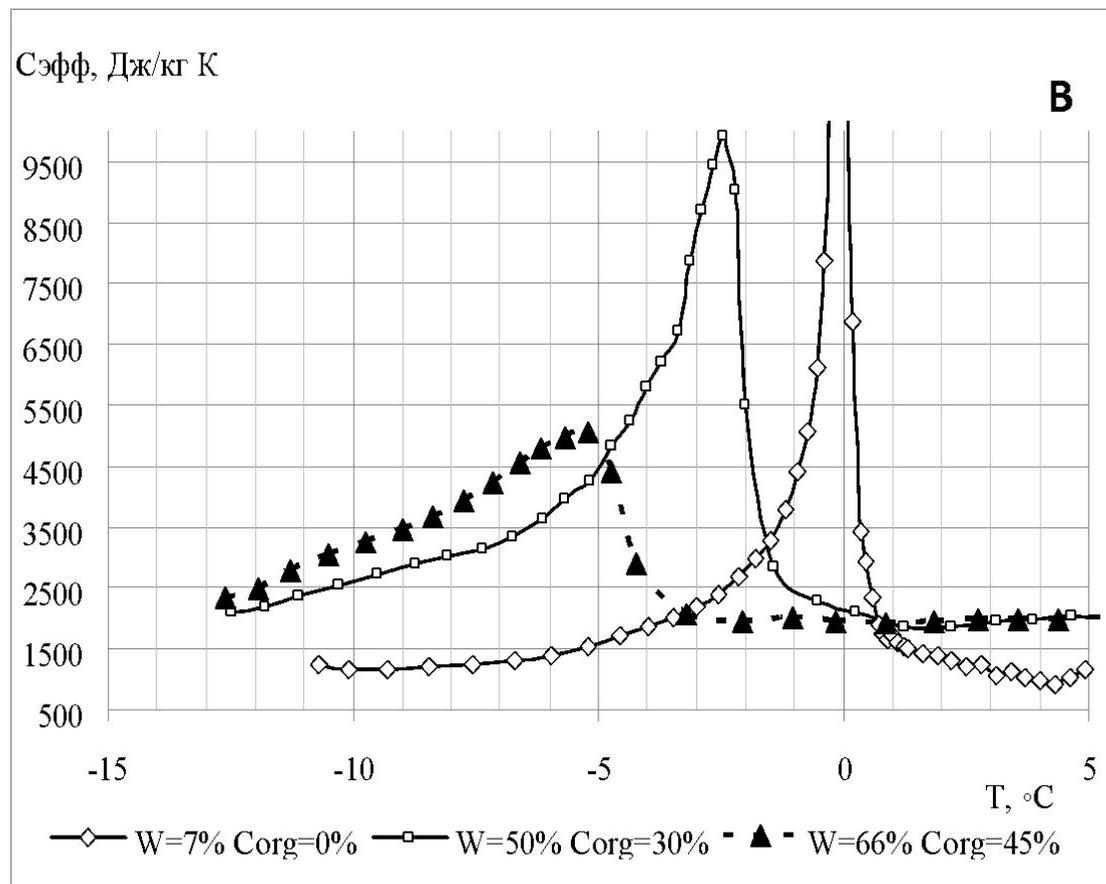
$$Q_f = L \frac{dW}{dT} (1 + W_{tot})$$

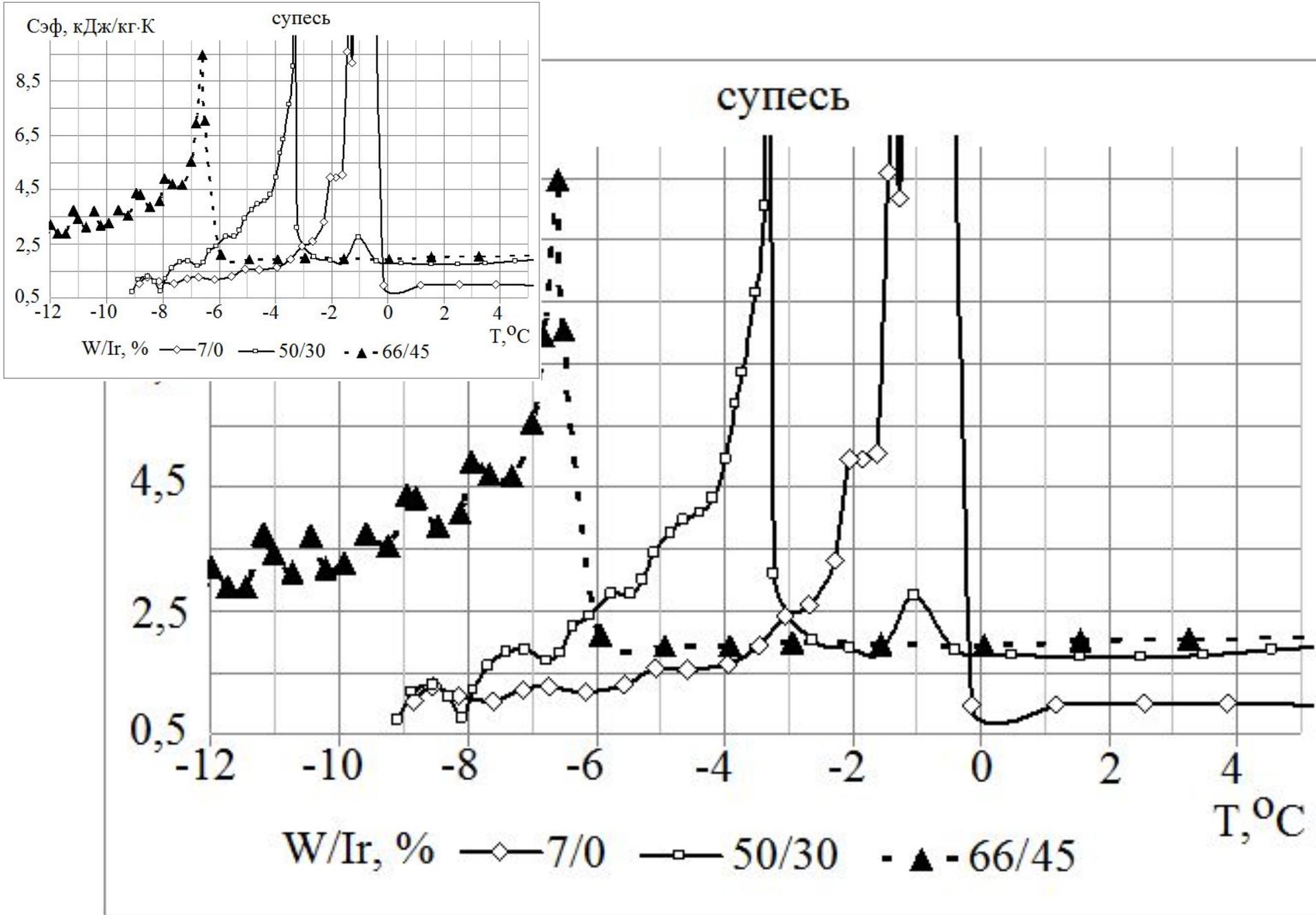
Т а б л и ц а Б.6 – Расчетные значения удельной теплоемкости скелета грунтов C_p

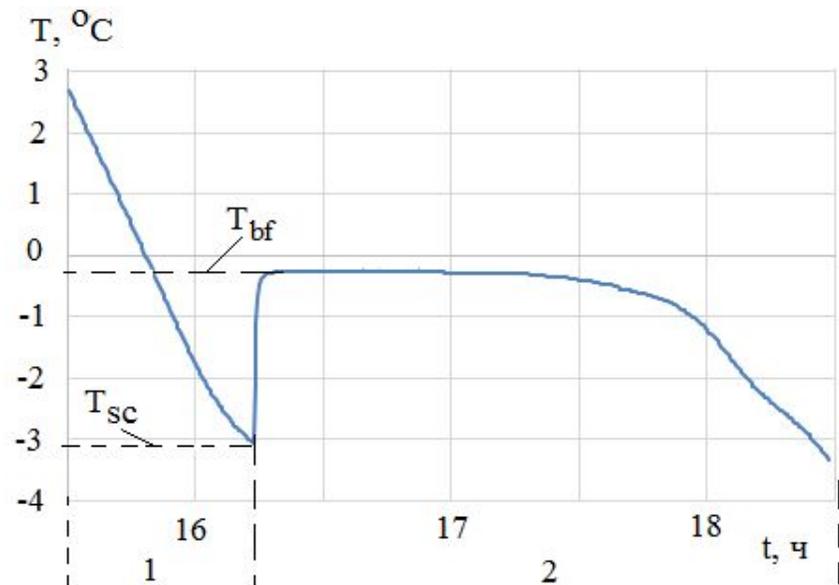
Грунты	Песок	Супесь	Глина и суглинок	Торф	
				низинный	верховой
$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	750	850	950	1920	1680

Таблица Б.7 – Расчетные значения температурной зависимости удельной теплоемкости порового раствора C_{wp}

$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)
0,0	4210	-2,8	3890	-13,0	3510
-0,2	4150	-3,2	3860	-14,0	3490
-0,4	4110	-3,6	3840	-15,0	3470
-0,6	4060	-4,0	3820	-16,0	3450
-0,8	4030	-5,2	3800	-17,0	3440
-1,0	4010	-6,0	3700	-18,0	3430
-1,2	3990	-6,8	3670	-19,0	3410
$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	C_{wp} Дж/(кг · °С)
-1,4	3970	-8,0	3630	-20,0	3400
-1,6	3950	-8,8	3600	-21,0	3390
-1,8	3930	-10,0	3570	-22,0	3380
-2,0	3920	-11,0	3550		
-2,4	3900	-12,0	3520		

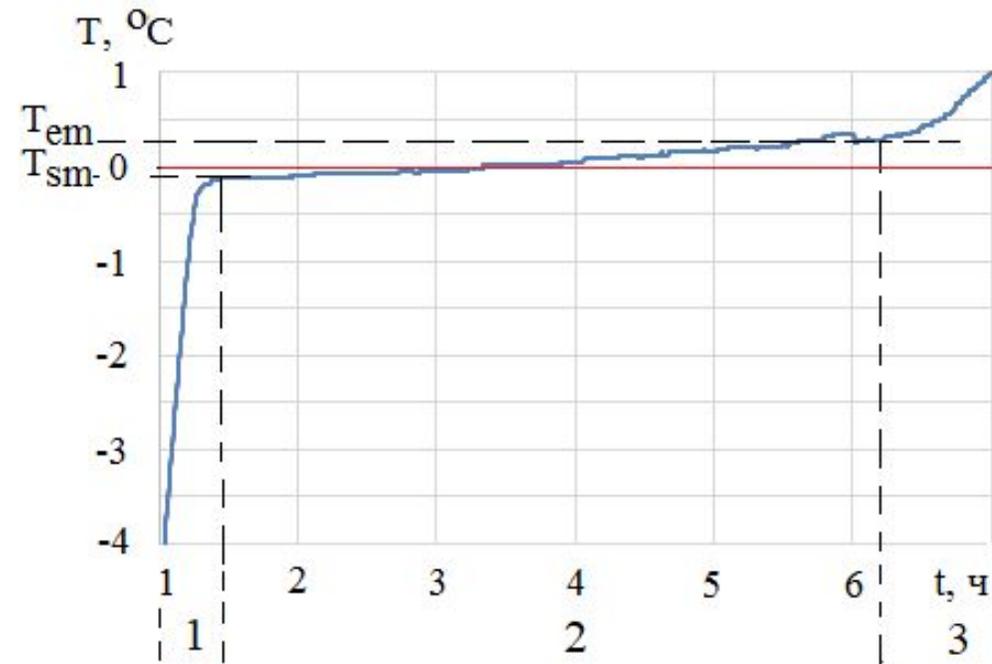






T_{bf} – температура начала замерзания
грунта, T_{sc} – температура переохлаждения
грунта

Термограмма замерзания засоленного
песка

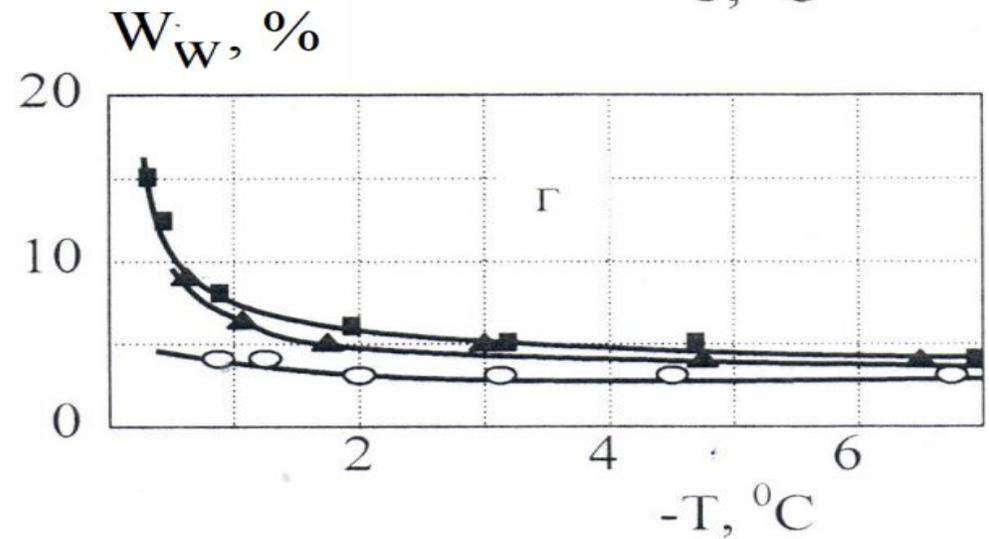
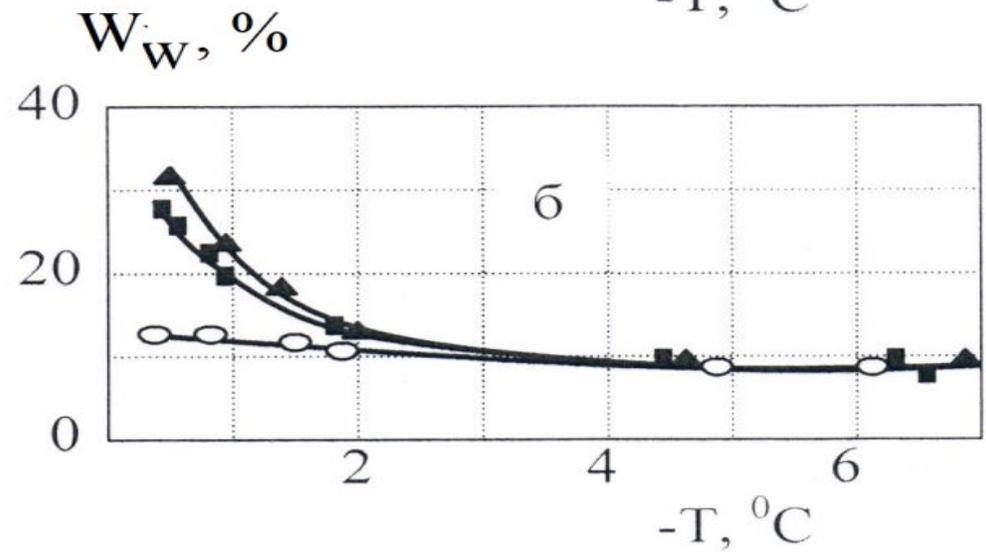
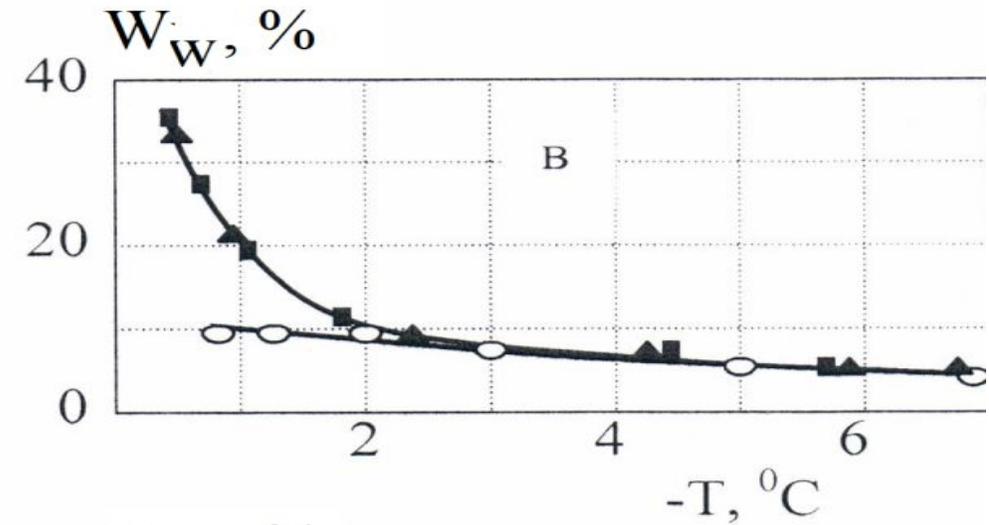
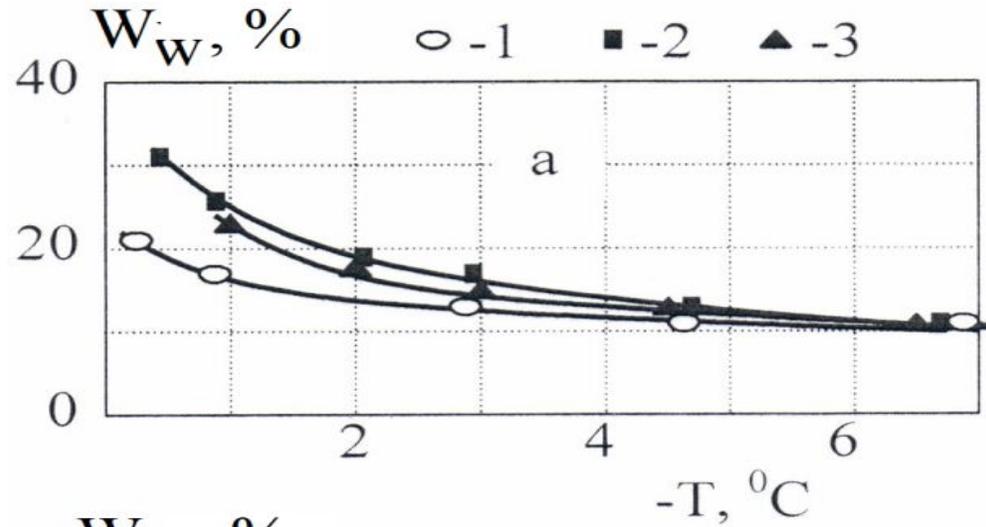


T_{sm} – температура начала таяния
грунта, T_{em} – температура конца таяния
грунта

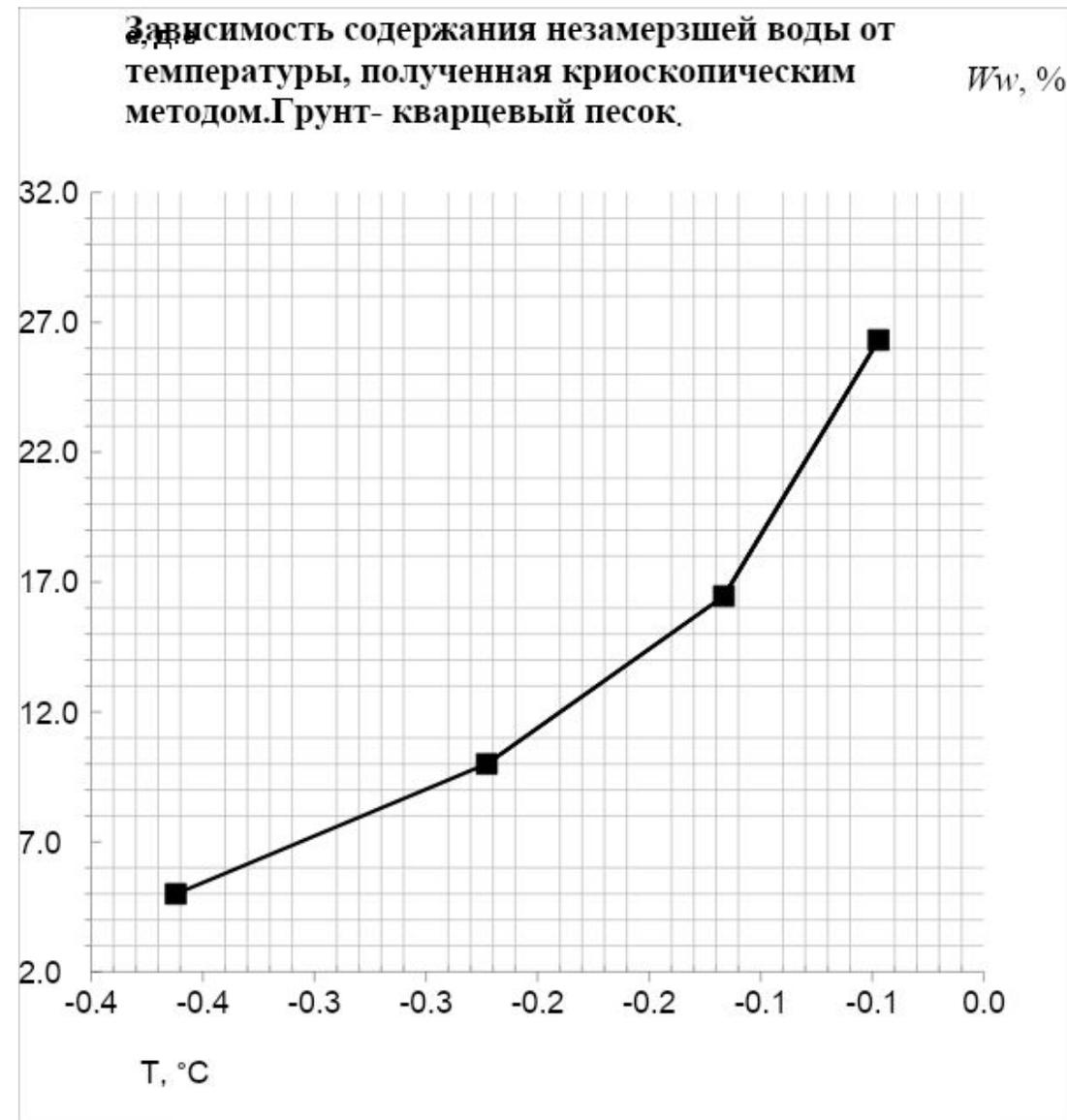
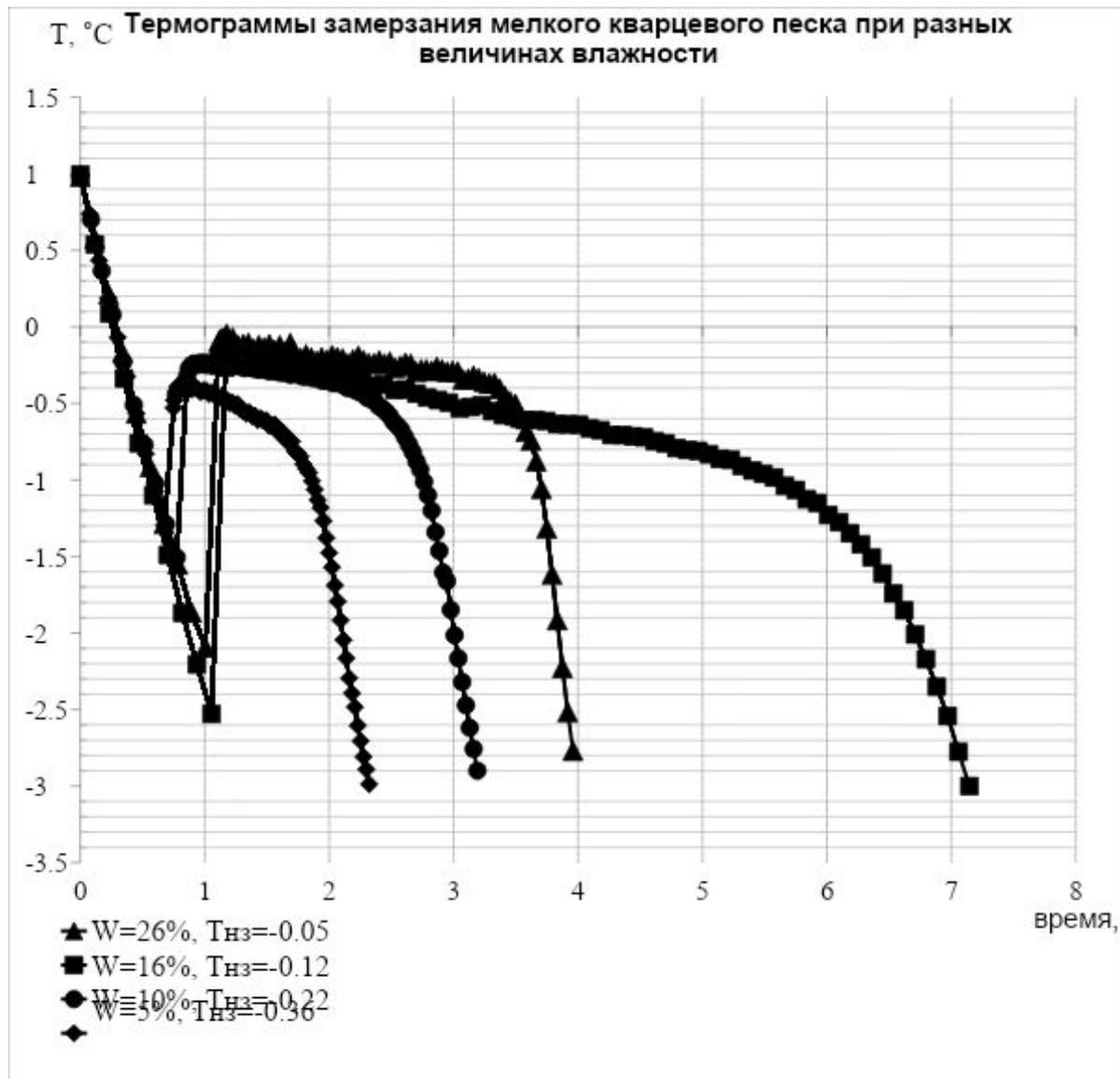
Термограмма оттаивания
дистиллированной воды

Рисунок – Политермы незамерзшей воды

1-сорбционный, 2 – десорбционный, 3 - контактный



а – суглинок, б – гидрослюдистая, в - глина каолинитовая, г - керамика



Криоскопический метод по термограммам замерзания

Рисунок - Термограммы замерзания суспензии глины монтмориллонитовой при различной концентрации хлористого кальция в ней

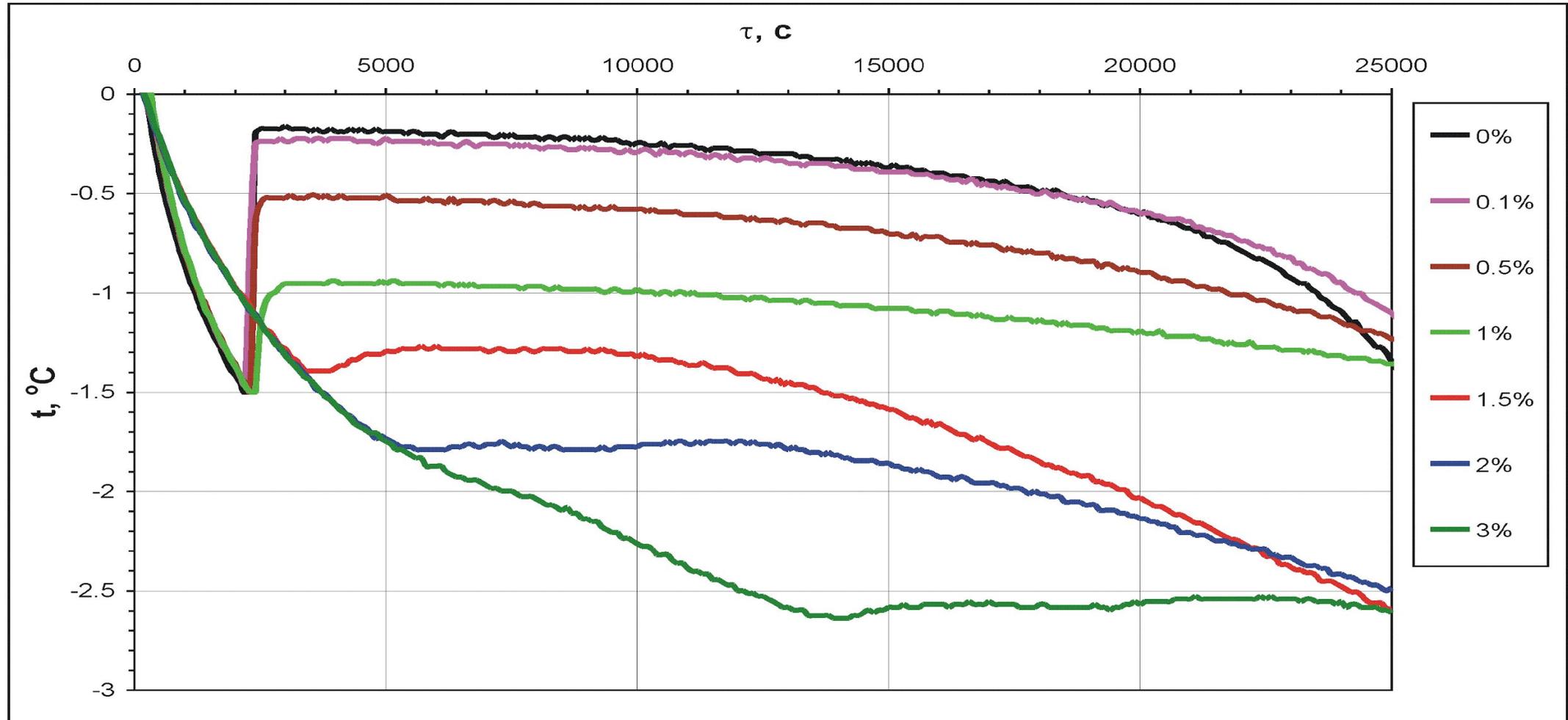


Рисунок – Сводная зависимость влажности за счет незамерзшей воды глины монтмориллонитовой по результатам испытания криоскопическим, десорбционным и гигроскопическим методами

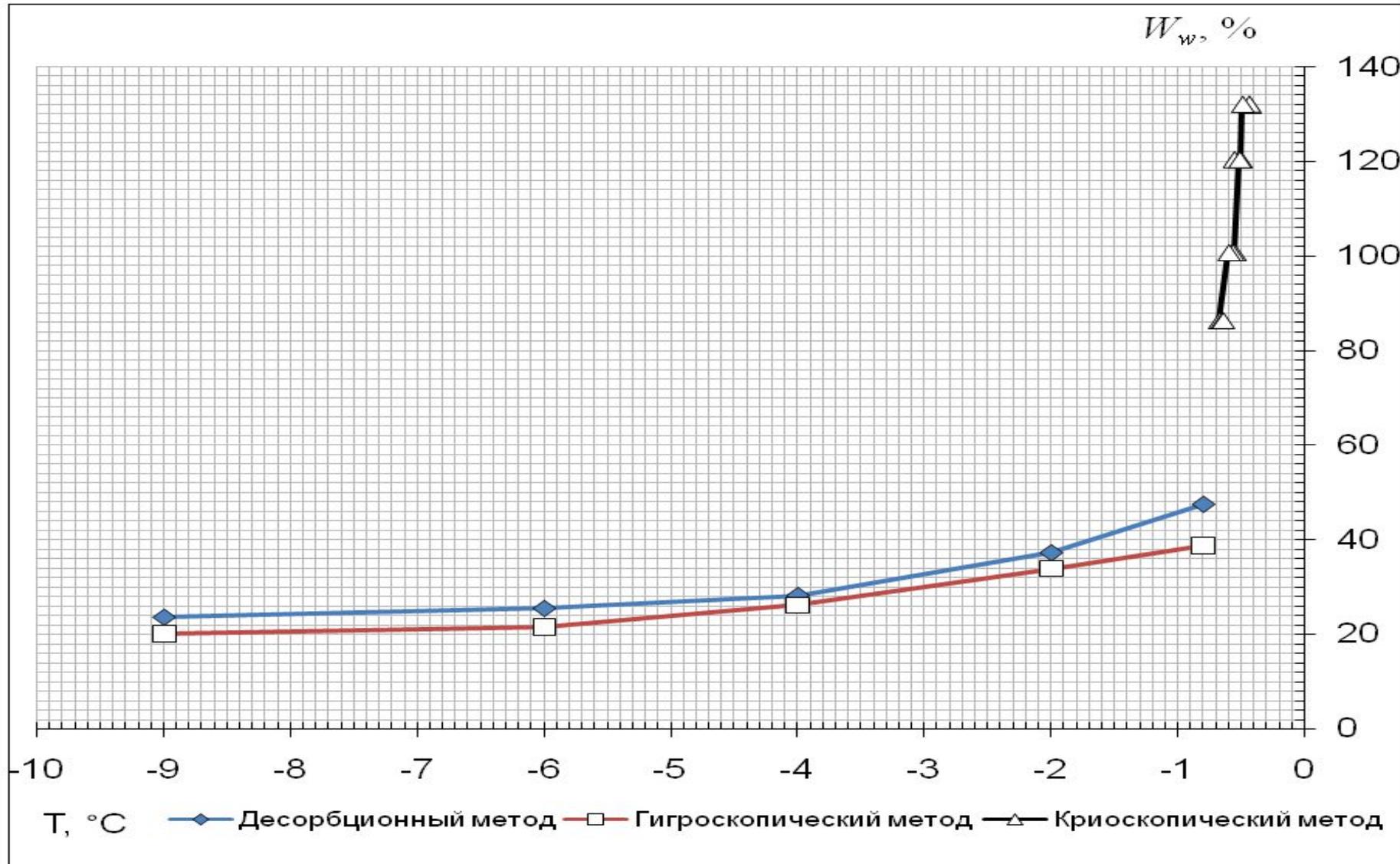
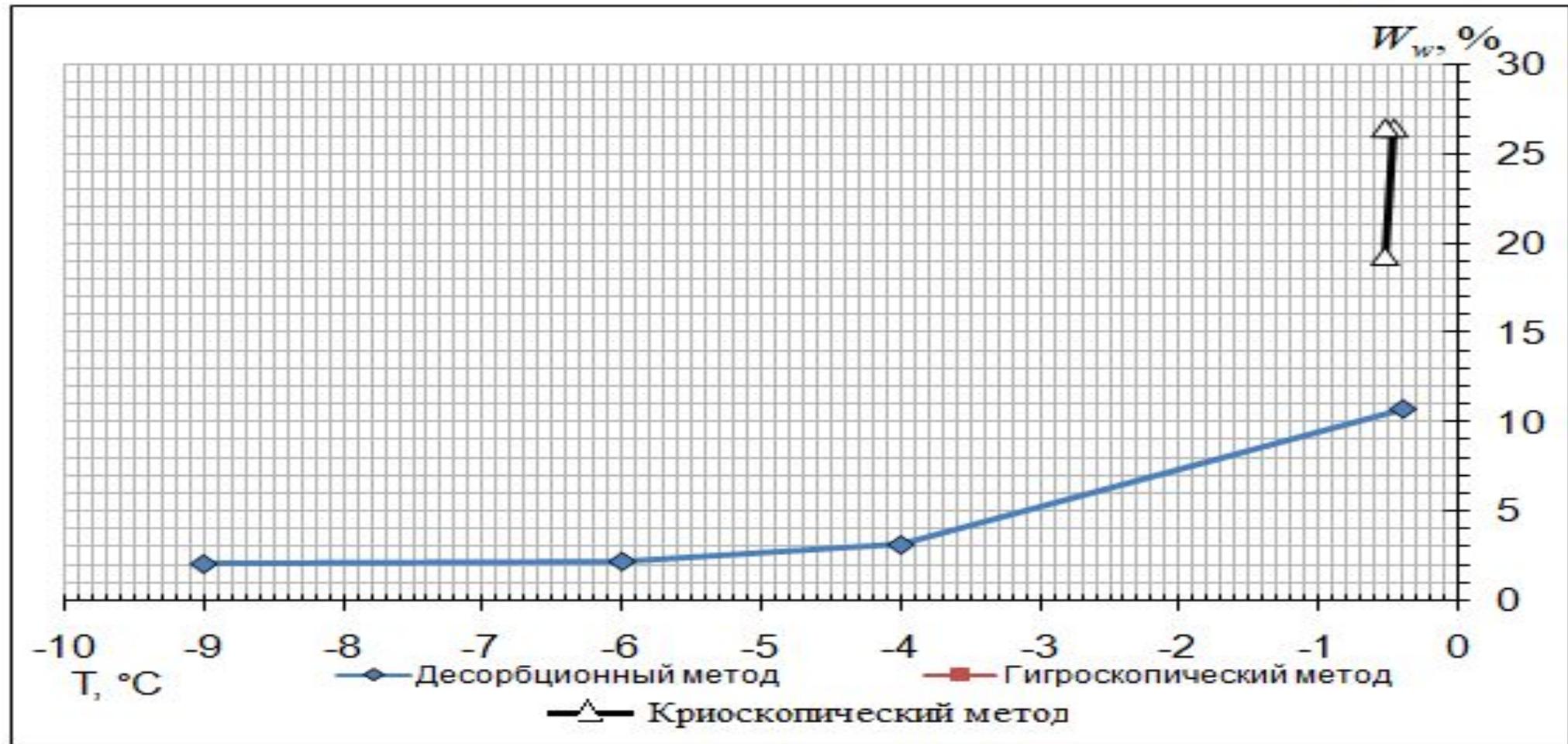


Рисунок – Сводная зависимость влажности за счет незамерзшей воды песка засоленного по результатам испытания криоскопическим, десорбционным и гигроскопическим методами



Пучинистые свойства грунтов

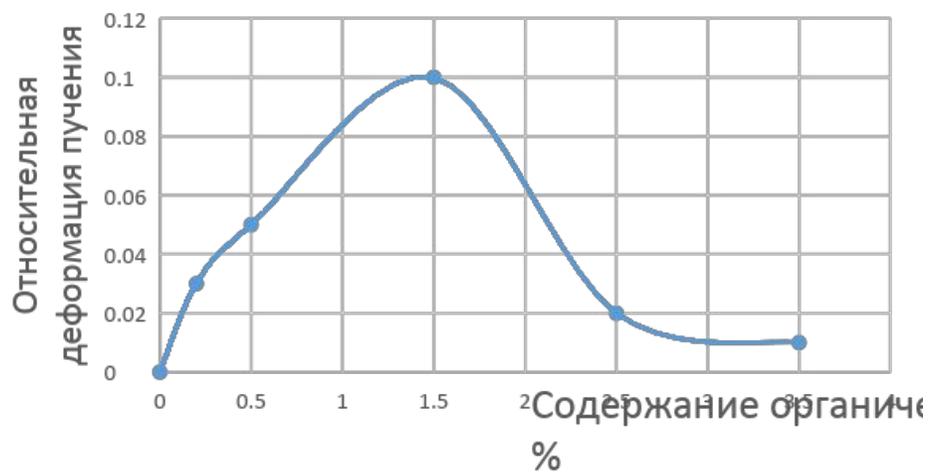
Пучинистость грунтов

- Относительная деформация морозного пучения ε_{th} (д.е.)- увеличение высоты образца при промерзании по отношению к высоте мерзлой части после промерзания.
- Нормальное давление пучения (или нормальные силы пучения)- давление (МПа) с которой образец может давить на опору над ним при промерзании.
- Касательные силы пучения- сила смерзания образца с поверхностью сваи при промерзании. Обычно пересчитываются с на единицу площади сваи и измеряются в МПа.

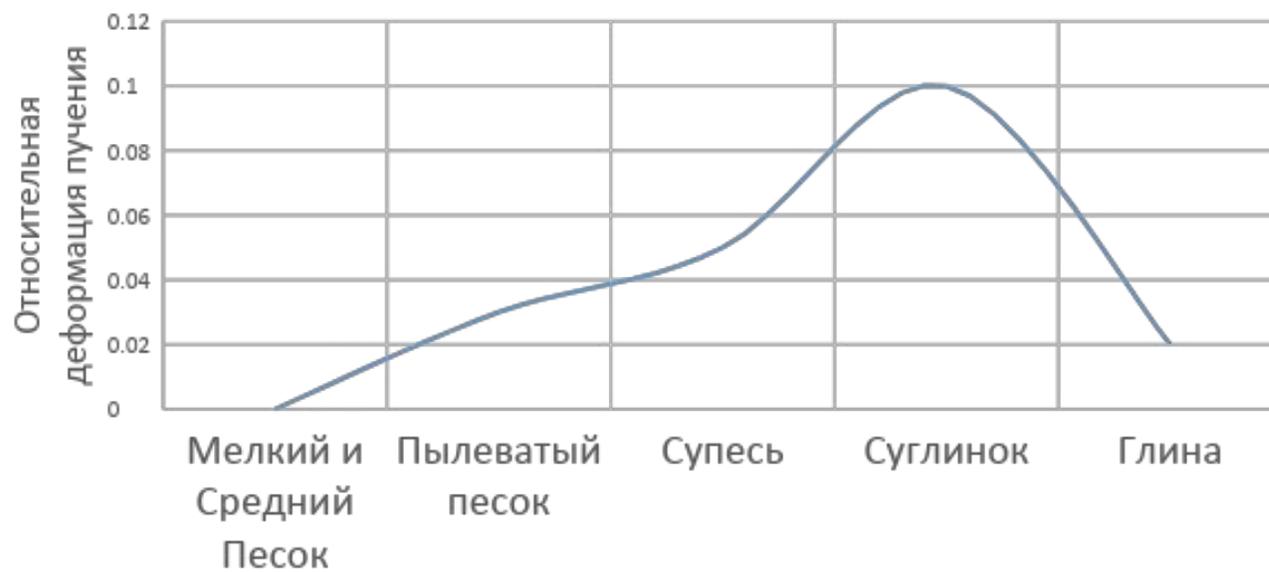
Таблица 1

Степень пучинистости грунта	Относительная деформация морозного пучения образца грунта
Непучинистый	$\varepsilon_{fh} < 0,01$
Слабопучинистый	$0,01 \leq \varepsilon_{fh} < 0,035$
Среднепучинистый	$0,035 \leq \varepsilon_{fh} < 0,07$
Сильнопучинистый	$0,07 \leq \varepsilon_{fh} < 0,10$
Чрезмернопучинистый	$0,10 \leq \varepsilon_{fh}$

Пучинистость песка средней крупности от содержания органики



Пучинистость грунтов в ряду песок-глина



Касательные силы пучения

