

# 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:

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

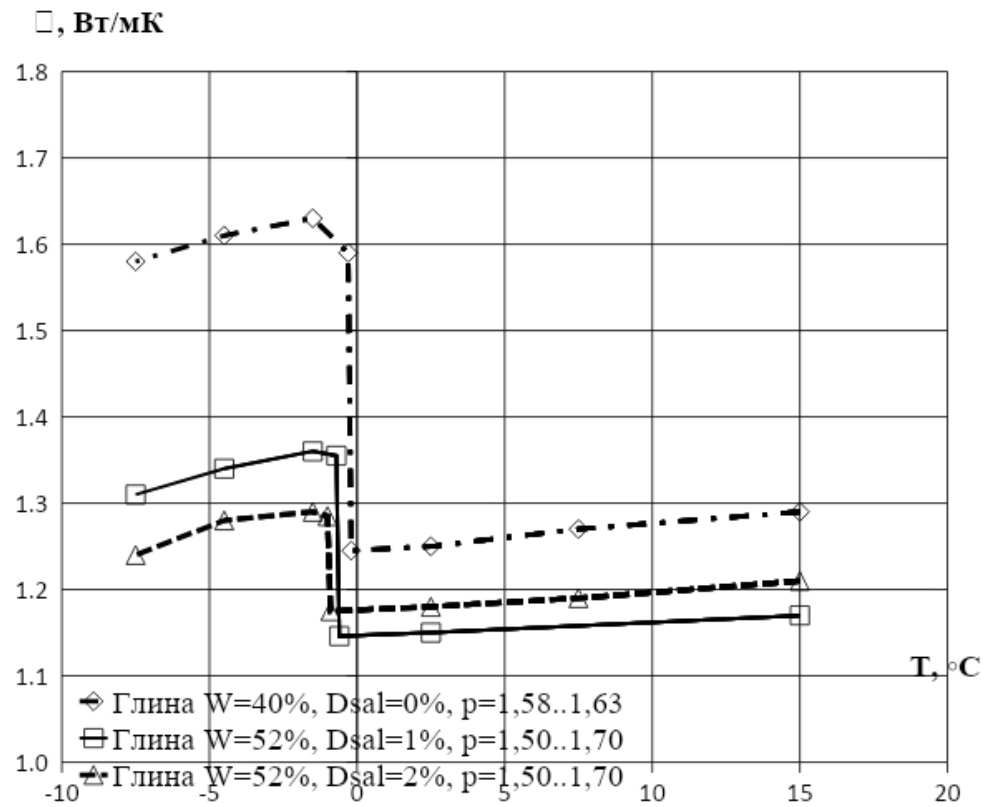
где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

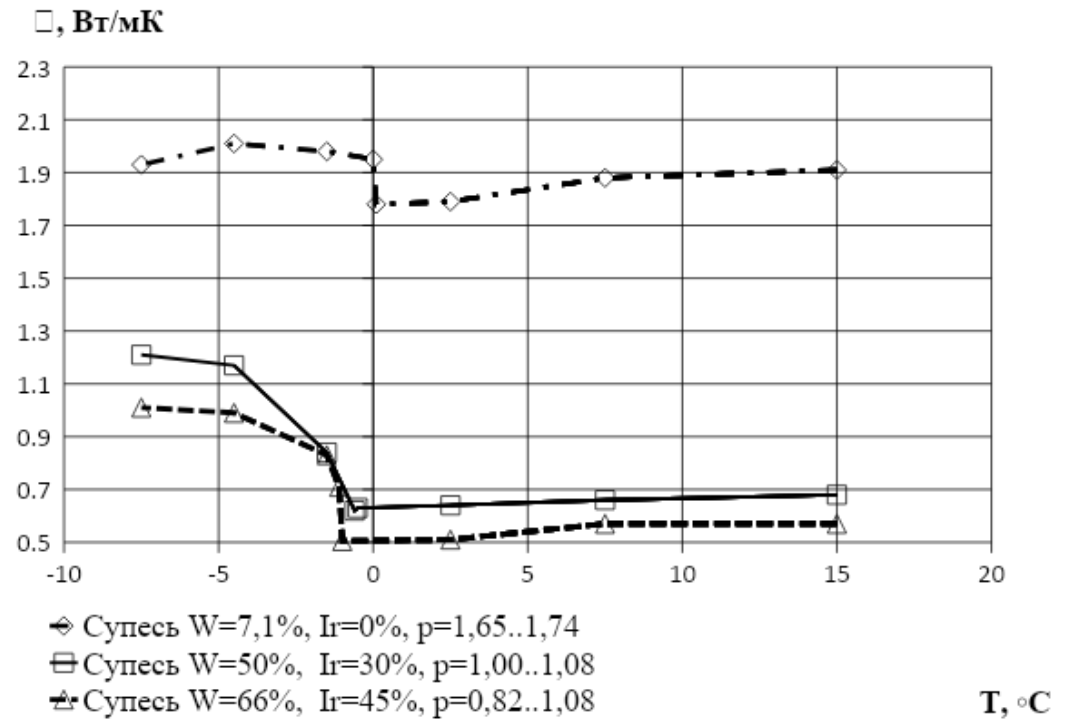
$\Delta T / \Delta h$  – градиент температуры слоя грунта (gradT, К/м);

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  $\lambda_{th}$ , мерзлом  $\lambda_{fm}$  ( $T \leq -15^\circ\text{C}$ ) состоянии

Плотность сухого грунта $\rho_{dth}$ , $\rho_{df}$ , $\text{кН/м}^3$	Суммарная влажность грунта, $W_{\text{сум}}$ , Д. е.	Коэффициент теплопроводности грунтов $\lambda$ , 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		
$\lambda_{th}$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_{th}$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_m$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_f$	$\lambda_{th}$	$\lambda_f$	
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 $\rho_{д,тв}$ $\rho_{дф}$ $\text{кН/м}^3$	Суммарная влажность грунта, $W_{\text{ср}}$ д. е.	Коэффициент теплопроводности грунтов $\lambda$ , Вт/(м·°С)																Заторфованные 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			
		$\lambda_{дт}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{дт}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{дт}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{дт}$		
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

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

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

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

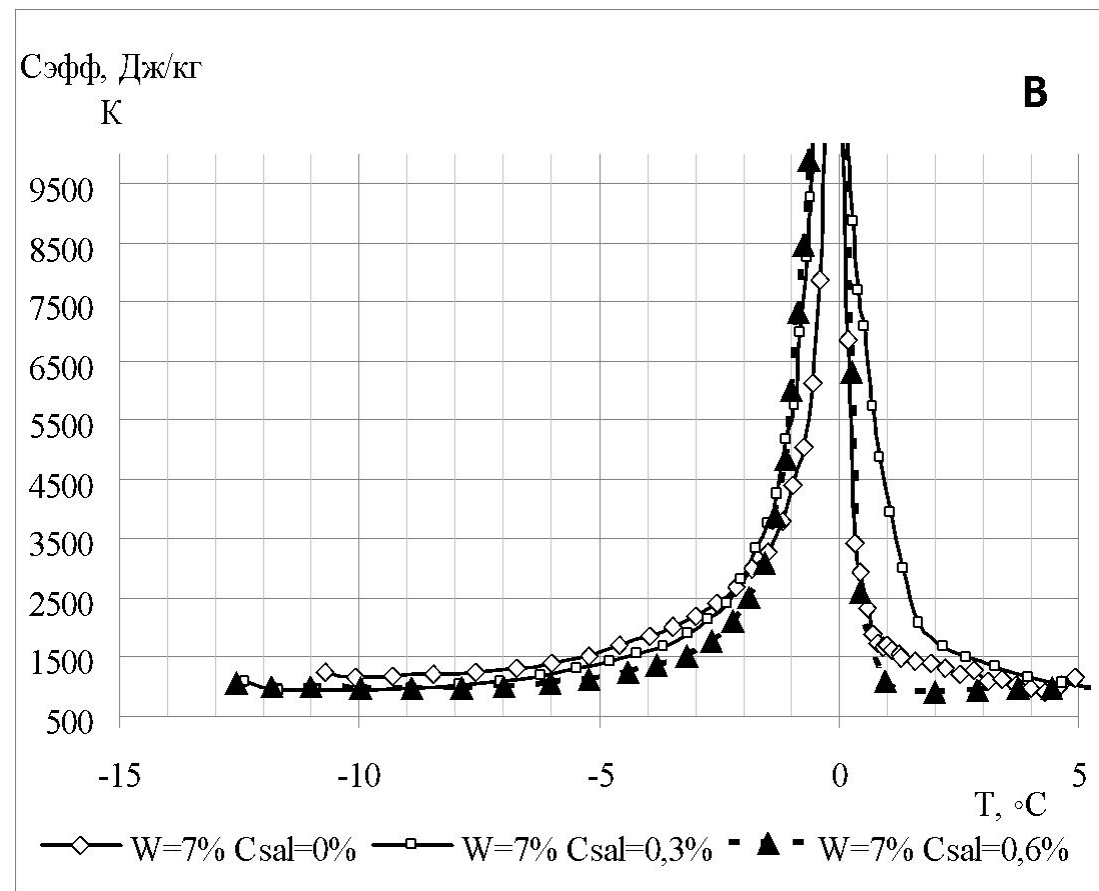
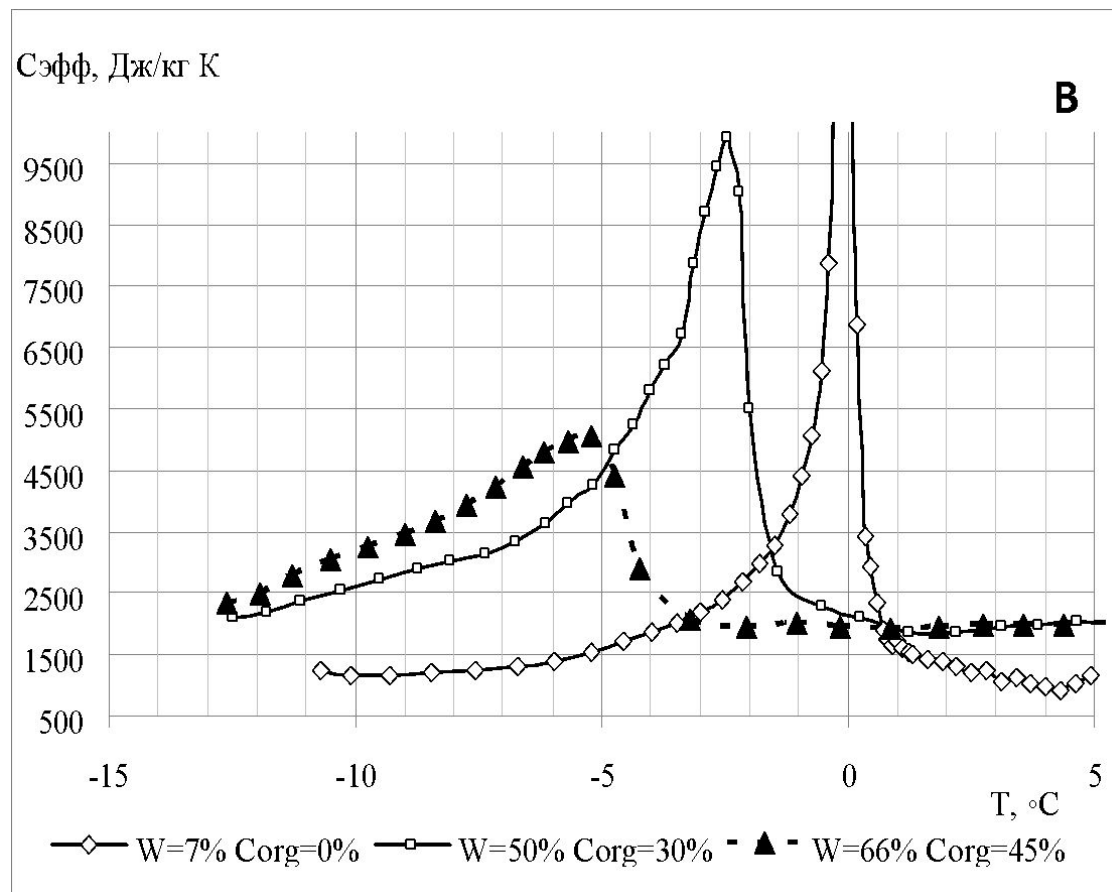
Т а б л и ц а Б.6 – Расчетные значения удельной теплоемкости скелета грунтов  $C_p$

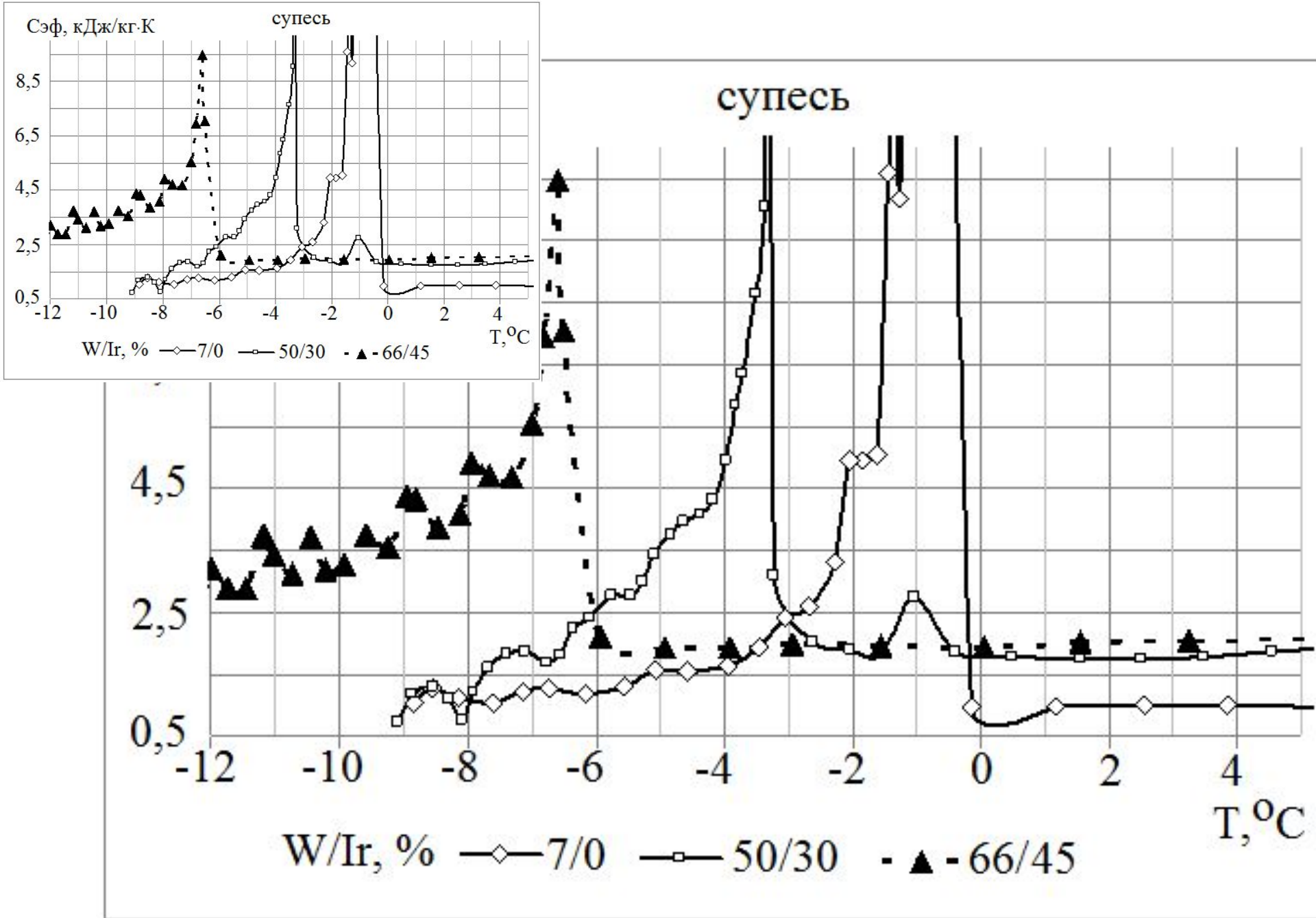
Грунты	Песок	Супесь	Глина и суглинок	Торф	
				низинный	верховой
$C_p, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$	750	850	950	1920	1680

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

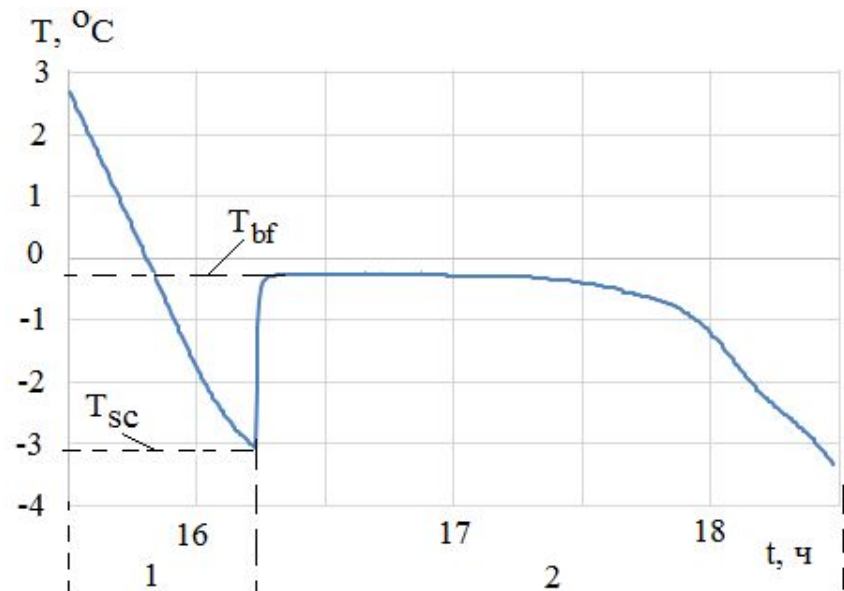
$T, ^\circ\text{C}$	$C_{wp}$ Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	$C_{wp}$ Дж/(кг · °С)	$T, ^\circ\text{C}$	$C_{wp}$ Дж/(кг · °С)
0,0	4210	-2,8	3890	-13,0	3510
-0,2	4150	-3,2	3860	-14,0	3490
-0,4	4110	-3,6	3840	-15,0	3470
-0,6	4060	-4,0	3820	-16,0	3450
-0,8	4030	-5,2	3800	-17,0	3440
-1,0	4010	-6,0	3700	-18,0	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		





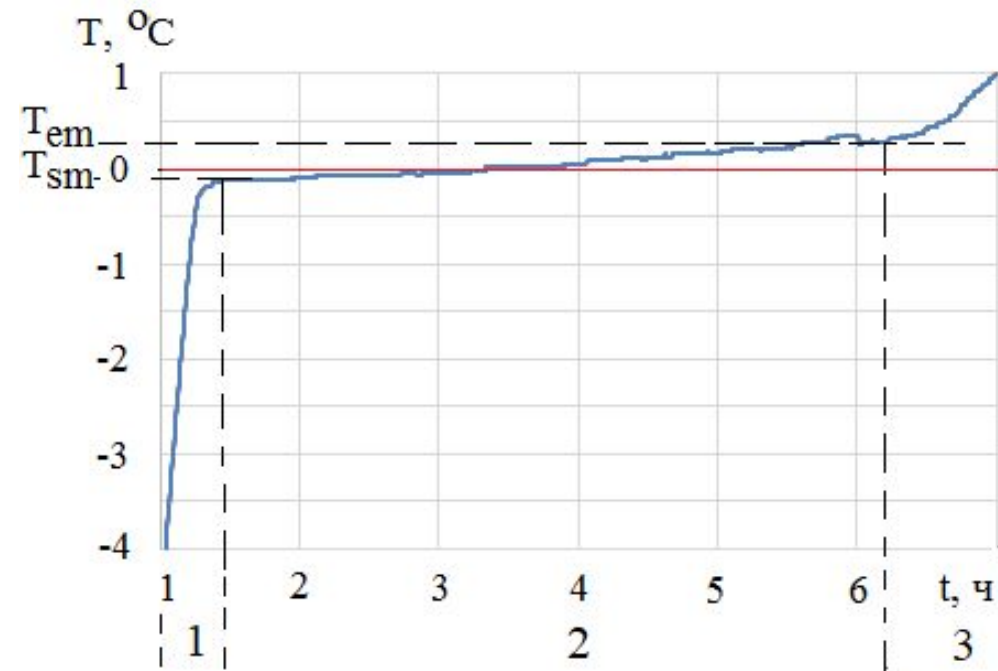






$T_{bf}$  – температура начала замерзания  
грунта,  $T_{sc}$  – температура переохлаждения  
грунта

Термограмма замерзания засоленного  
песка

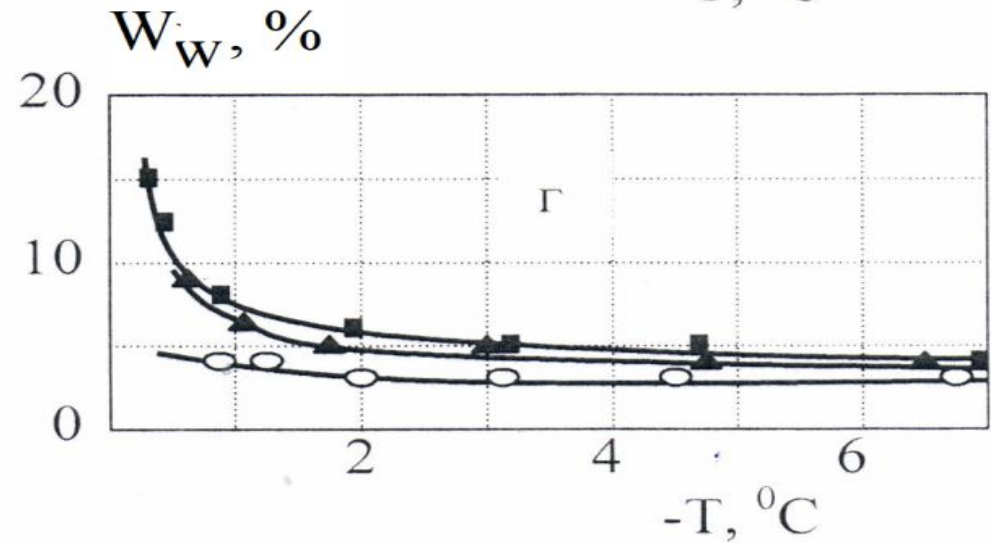
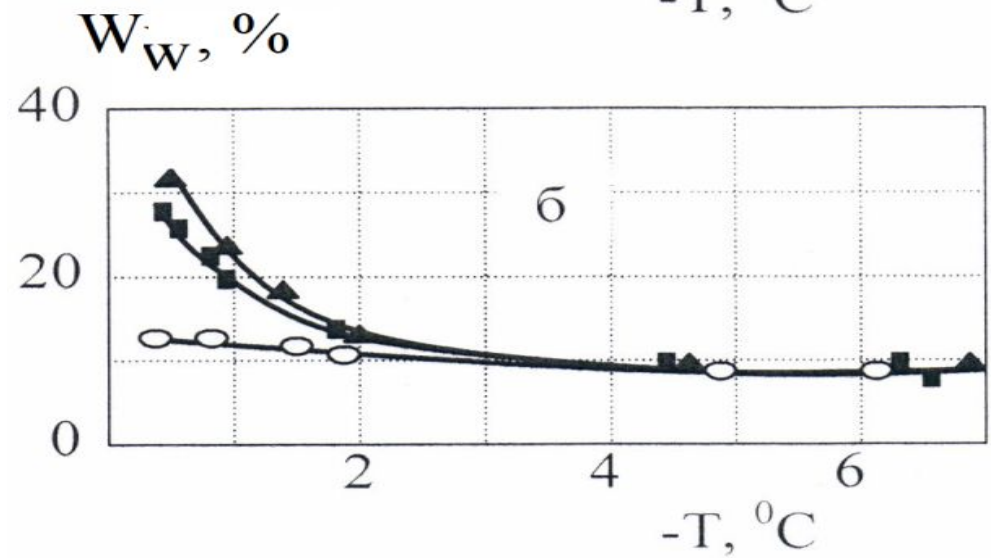
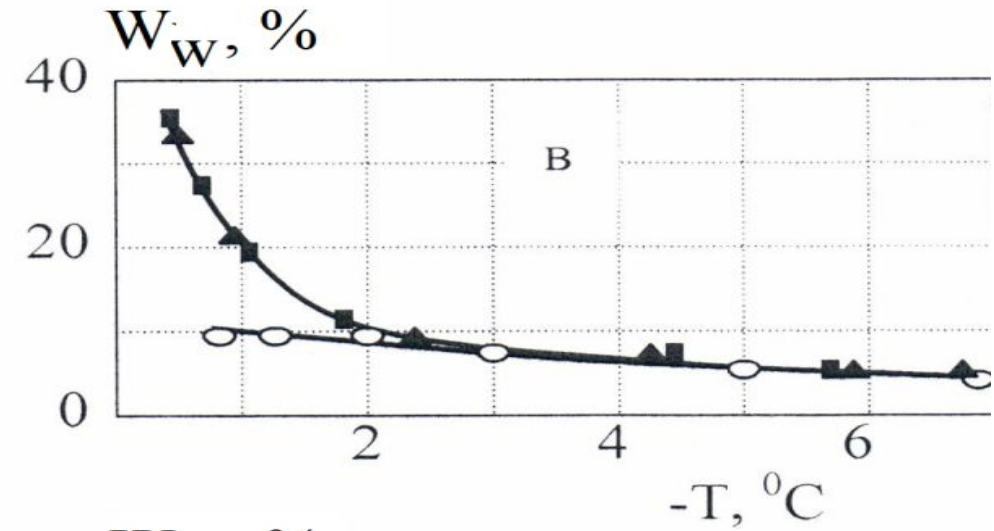
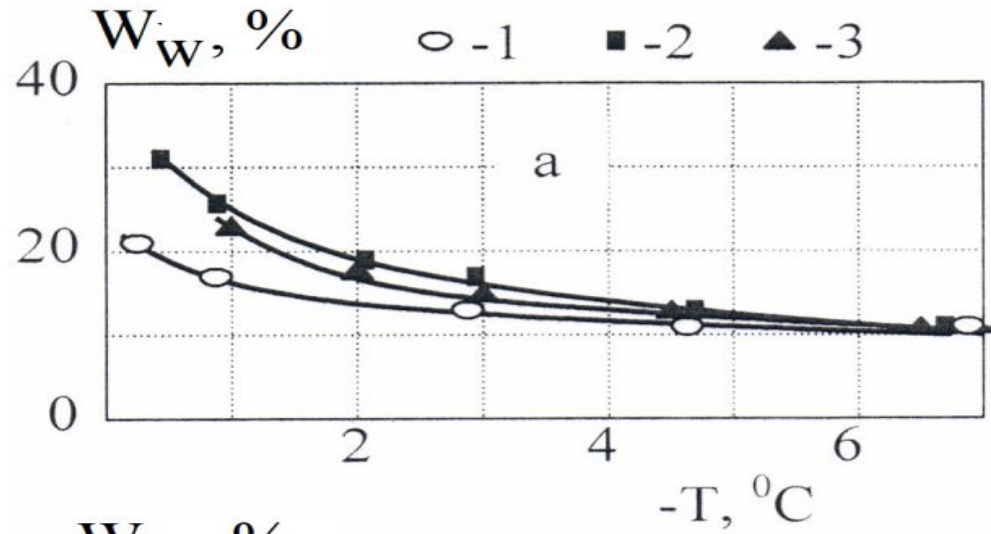


$T_{sm}$  – температура начала таяния  
грунта,  $T_{em}$  – температура конца таяния  
грунта

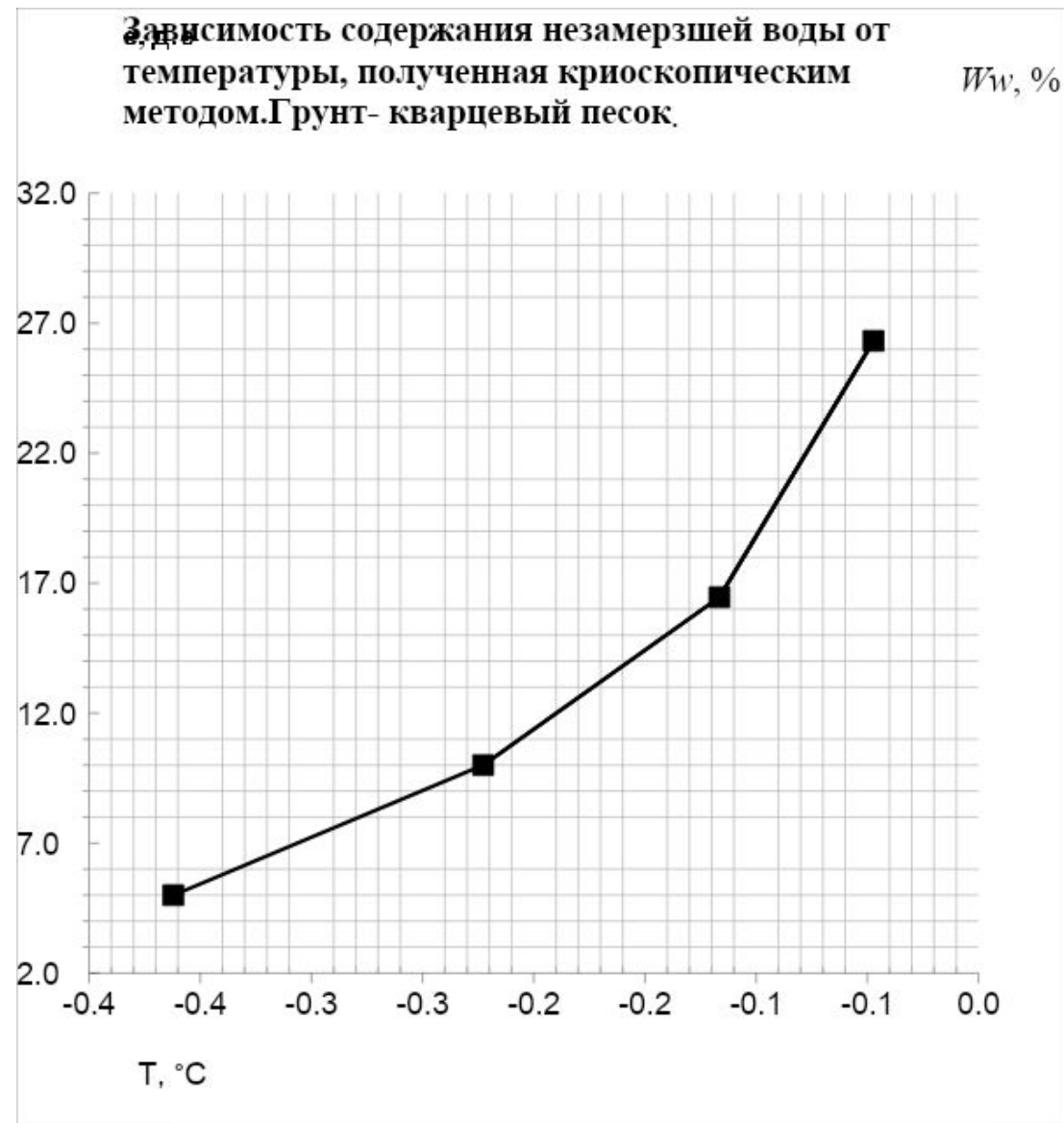
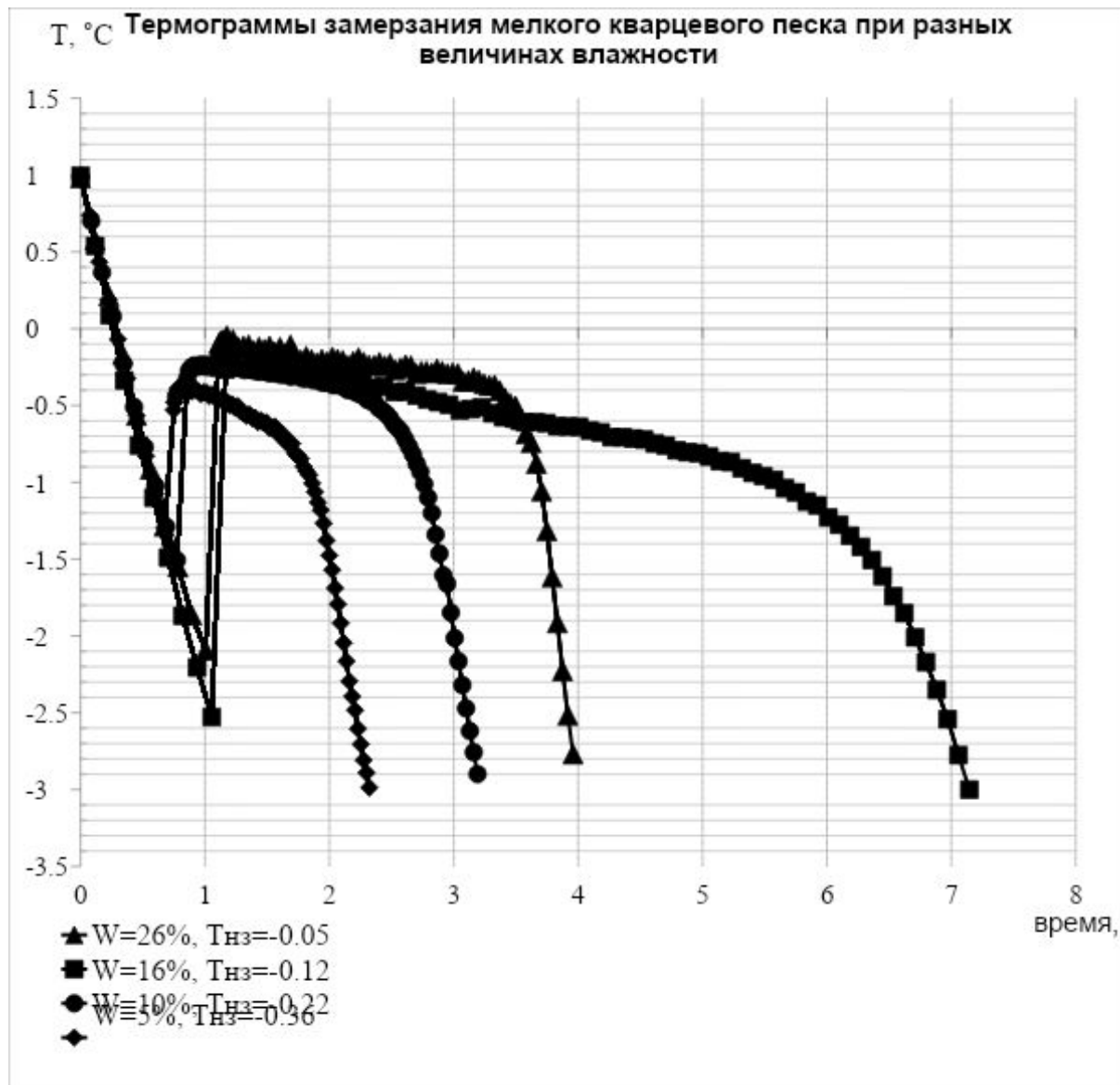
Термограмма оттаивания  
дистиллированной воды

# 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

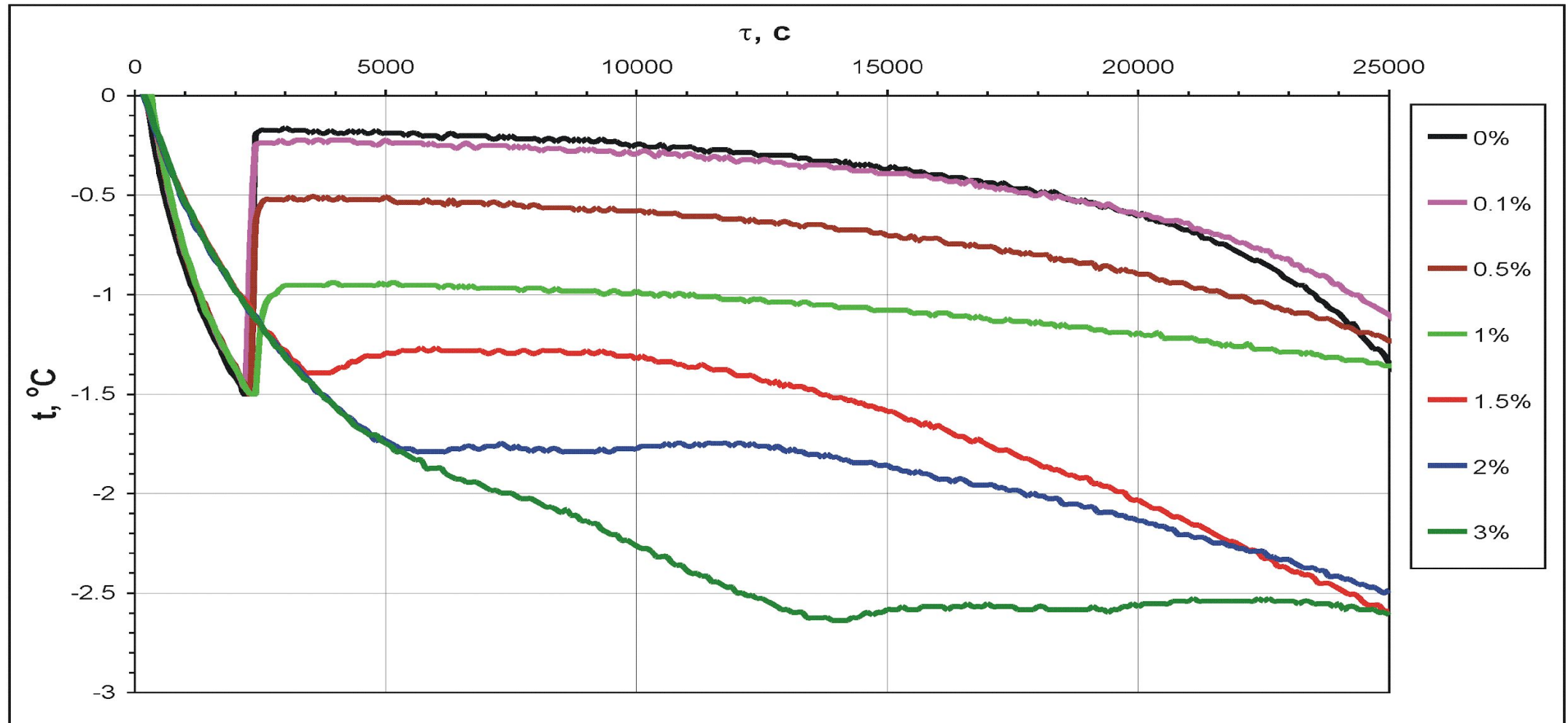


Рисунок – Сводная зависимость влажности за счет незамерзшей воды глины монтмориллонитовой по результатам испытания криоскопическим, десорбционным и гигроскопическим методами

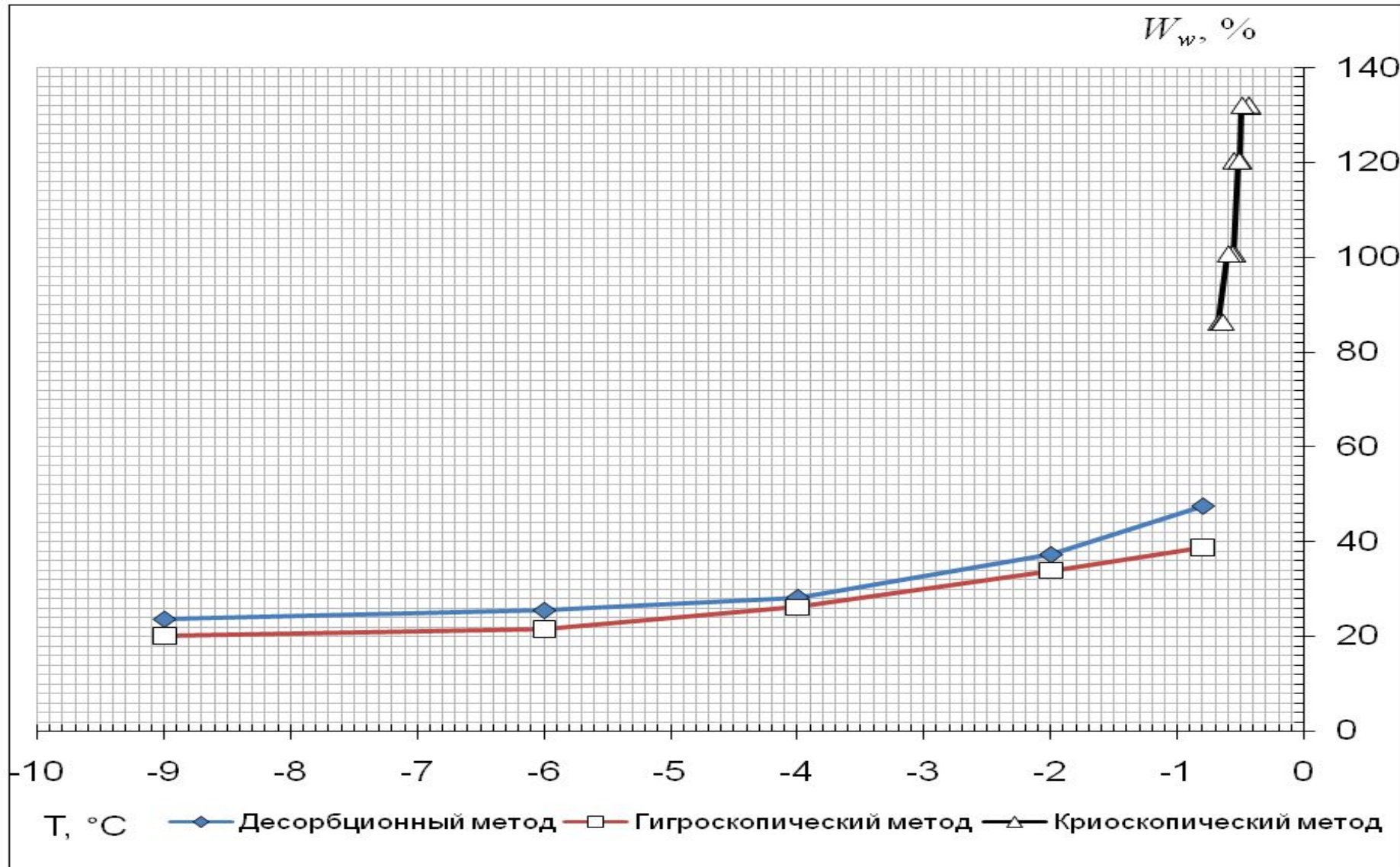
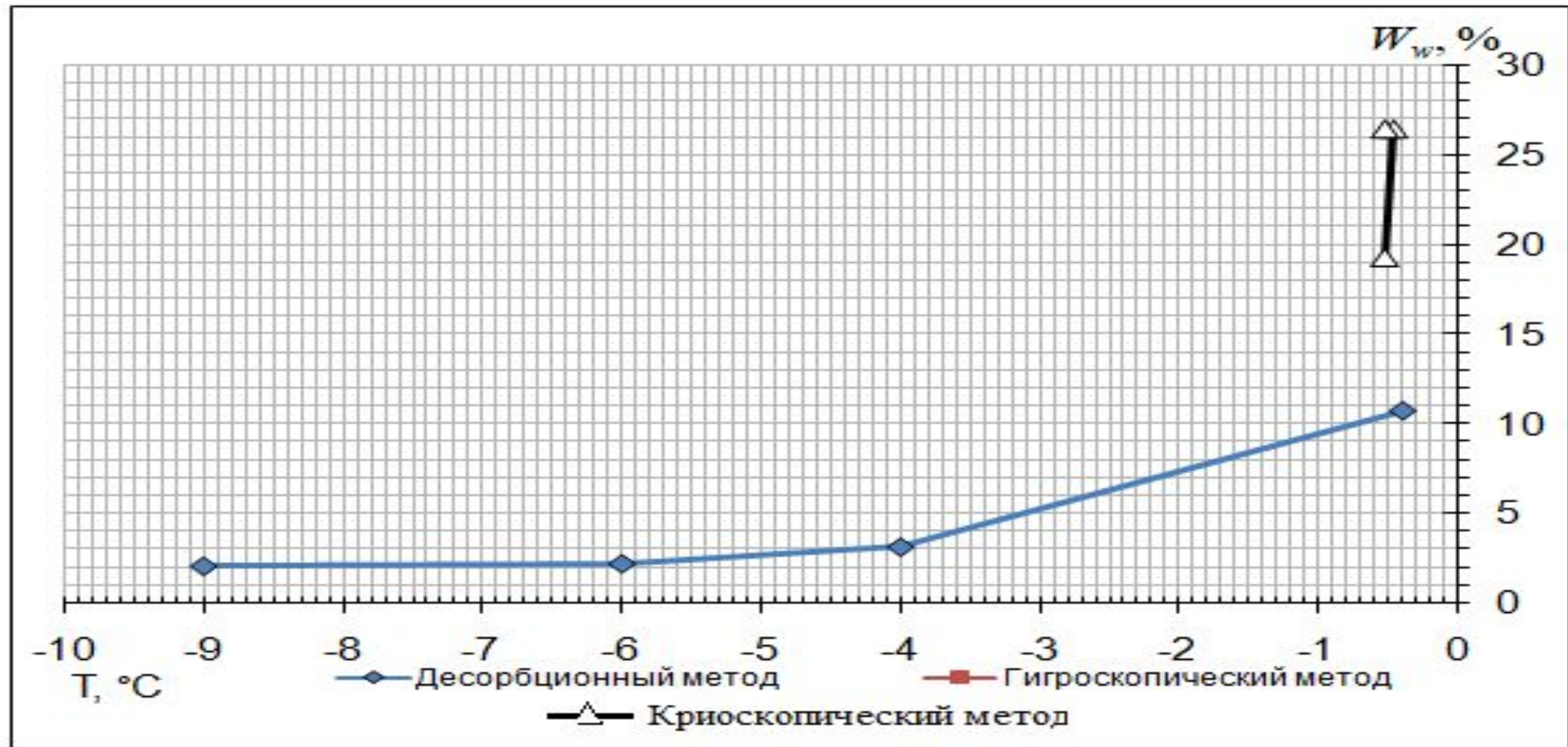




Рисунок – Сводная зависимость влажности за счет незамерзшей воды песка засоленного по результатам испытания криоскопическим, десорбционным и гигроскопическим методами



# Пучинистые свойства грунтов

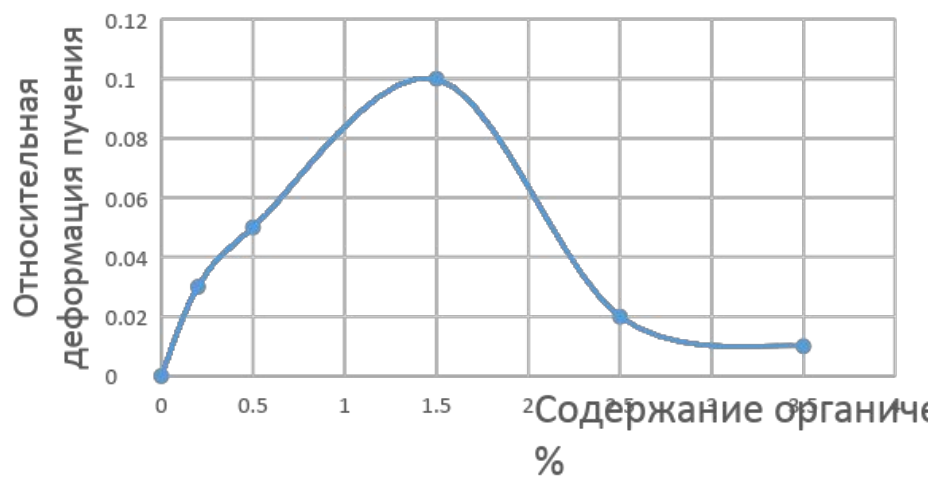
# Пучинистость грунтов

- Относительная деформация морозного пучения  $\varepsilon_{th}$  (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.

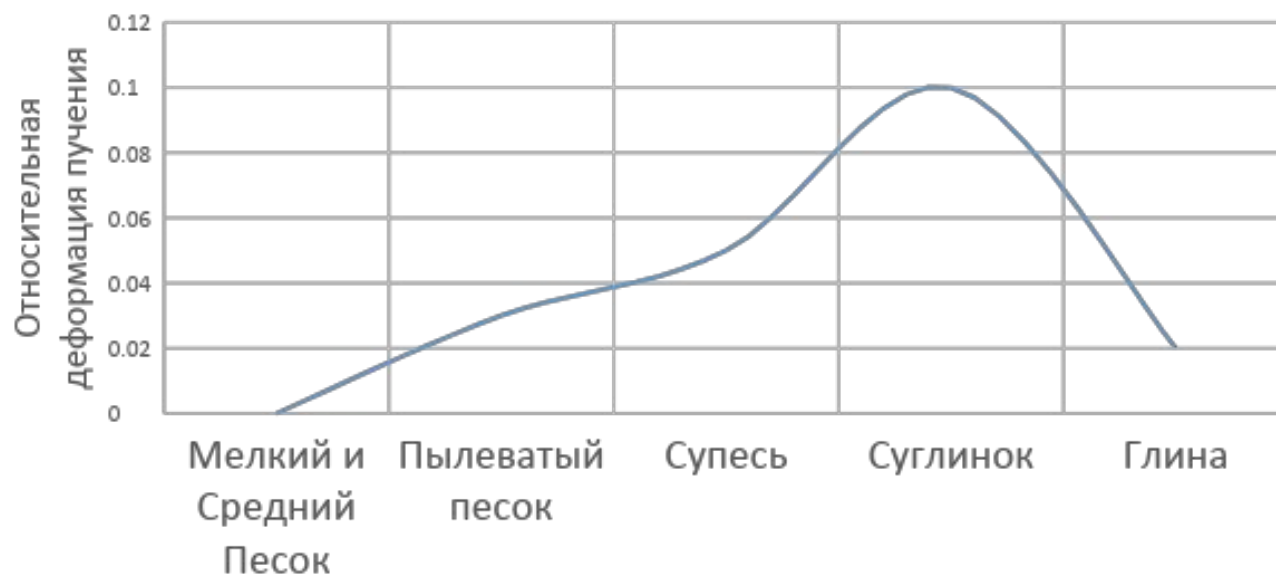
Таблица 1

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

