

УДК 624.131.436.6

## КОЛИЧЕСТВО НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ЗАСОЛЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

Таппырова Н.И., Тимофеев А.М., Степанов А.В.,  
Кравцова О.Н., Протожьяконова Н.А.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова  
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,  
Якутск, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru*

В настоящее время в связи с интенсивным освоением арктического побережья становится актуальным прогнозирование температурного режима мерзлых засоленных грунтов, которые используются в качестве оснований для строительства и эксплуатации сложных инженерных сооружений. Из-за большого содержания в них незамерзшей воды засоленные мерзлые грунты являются менее прочными, чем незасоленные. Засоленность грунтов оказывает большое влияние на тепломассообменные и физико-механические свойства таких грунтов. Основной вклад в изменение этих свойств вносит количество незамерзшей воды. Как известно, незамерзшая вода зависит от температуры заморозания, концентрации порового раствора и начальной влажности. В данной работе приведены результаты экспериментального определения количества незамерзшей воды в зависимости от температуры для засоленного песчаного грунта. Экспериментальные исследования были проведены на образцах речного песка, взятого на берегу р. Лены. Образцы песка увлажнялись раствором хлористого натрия, концентрация которого изменялась в пределах от 0 до 20%, начальная влажность варьировалась от 4,2 до 20%. Количество незамерзшей воды при различных температурах определено методом непрерывного ввода тепла, разработанным в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. Используя полученные экспериментальные данные, выведена формула, позволяющая рассчитать количество незамерзшей воды при любом изменении начальной влажности, температуры и концентрации порового раствора. Сравнение полученных расчетных данных показало хорошее совпадение с экспериментальными данными. Полученная формула применима только для засоленных песчаных грунтов.

**Ключевые слова:** мерзлые грунты, засоленные грунты, песчаный грунт, количество незамерзшей воды, температура заморозания, температурная зависимость, концентрация соли, начальная влажность

## THE AMOUNT OF UNFROZEN WATER IN SALINE SANDY SOILS

Таппырова Н.И., Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н., Протожьяконова Н.А.

*V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North  
FGBUN FRC "Yakutsk Science Center" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru*

Currently, due to the intensive development of the Arctic coast, the assessment of the temperature regime of frozen saline soils, which are used as foundation for the construction and operation of complex engineering structures, is becoming a topical issue. Due to the higher content of unfrozen water in them, saline frozen soils are less durable than unsalted ones. The salinity of soils has a great influence on the heat and mass transfer and physical-mechanical properties of such soils. The main contribution to the change in these properties is made by the unfrozen water content. As you know, amount of unfrozen water depends on the freezing temperature, the concentration of the pore solution and the initial moisture content. This paper presents the results of experimental determination of the amount of unfrozen water in saline sandy soil as a function of temperature. Experimental studies were carried out on samples of river sand from the banks of the Lena River. The sand samples were salted with a solution of sodium chloride, the concentration of which varied from 0 to 20%, the initial moisture content varied from 4.2 to 20%. The amount of unfrozen water at different temperatures is determined by the method of continuous heat input developed at the V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS. Using the experimental data obtained, a formula is derived that allows calculating the amount of unfrozen water at any change in the initial moisture content, temperature and concentration of the pore solution. A comparison of the calculated data with the experimental data obtained showed a good agreement. The resulting formula is applicable only for saline sandy soils, because the influence of soil dispersion is not taken into account.

**Keywords:** frozen soils, saline soils, sandy soil, amount of unfrozen water, freezing temperature, temperature dependence, salt concentration, initial water content

Арктическая зона составляет около 30% от всей территории России, а большую часть этих территорий занимают засоленные мерзлые грунты. Распространение на территории арктической зоны засоленных мерзлых грунтов является одной из основных проблем, возникающих при проектировании, строительстве

и эксплуатации инженерных сооружений и зданий. Мерзлые засоленные грунты отличаются меньшей прочностью, преобладанием пластично-мерзлого состояния вместо твердо-мерзлого. Происходящие при этом деформации, разрушения инженерных сооружений, построенных в зоне засоленных мерзлых грунтов, показали упущения

в проведении инженерно-геологических исследований грунтов. Поэтому в настоящее время появилась настоятельная необходимость в долговременном прогнозировании поведения мерзлых засоленных грунтов, используемых в качестве оснований инженерных сооружений.

Засоленность мерзлых грунтов существенно влияет на все основные свойства этих грунтов – теплофизические, массообменные и т.д., которые сильно зависят от количества незамерзшей воды. Количество незамерзшей воды, в свою очередь, определяется концентрацией порового раствора, влажностью и температурой.

В литературе хорошо освещен вопрос определения количества незамерзшей воды в незасоленных грунтах при различных отрицательных температурах. Изучением влияния количества незамерзшей воды на температурный режим засоленных грунтов занимаются многие исследователи. Большой вклад в изучение этого влияния внесли А.В. Степанов [1], А.М. Тимофеев [2], Р.И. Гаврильев [3], П.П. Пермяков [4], И.Л. Комаров [5] и т.д. В работе [1] предложен метод непрерывного ввода тепла, который наряду с определением теплофизических характеристик позволяет определить количество незамерзшей воды для различных видов грунтов.

Численные методы расчета процессов теплообмена в мерзлых засоленных грунтах рассматриваются в работах

[4–7]. Имеется достаточное количество работ, в которых приводятся формулы, позволяющие рассчитать температурную зависимость количества незамерзшей воды в незасоленных песчаных грунтах [4, 8], а для засоленных песчаных грунтов такие формулы почти не встречаются. Поэтому целью данной работы является снижение трудоемких экспериментальных исследований температурного режима засоленных грунтов путем разработки расчетной методики определения количества незамерзшей воды в образцах при отрицательных температурах с учетом начальной влажности и засоленности грунта.

### Материалы и методы исследования

В данной работе приводятся результаты расчета количества незамерзшей воды в песчаном грунте в зависимости от начальной влажности и концентрации порового раствора.

Для исследования был взят речной песок из карьера на берегу р. Лены (Республика Саха (Якутия)). По ГОСТ 12536–2014 был определен гранулометрический состав исследуемого грунта [9] (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что 60% грунта – это частицы диаметром 0,31 мм и меньше, а 10% – это частицы диаметром < 0,14 мм. Исходя из этого, определен коэффициент однородности, который равен 2,2, т.е. исследуемый песчаный грунт является однородным.

Таблица 1

#### Гранулометрический состав песка

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах						
	1	0,4	0,315	0,2	0,14	0,1	< 0,063
Частный	7,8	27,1	49,4	5,6	4,6	1,6	3,9
Полный	100	92,2	65,1	15,7	10,1	5,5	3,9

Таблица 2

#### Температура замерзания растворов хлористого натрия (NaCl)

Содержание NaCl в 100 г воды, г	Температура замерзания, °С	Содержание NaCl в 100 г воды, г	Температура замерзания, °С	Содержание NaCl в 100 г воды, г	Температура замерзания, °С
1,5	–0,9	10,6	–6,4	21,2	–13,6
3,0	–1,8	12,3	–7,9	23,1	–15,1
4,5	–2,6	14,0	–8,6	25,0	–16,0
5,9	–3,5	15,7	–9,8	26,9	–18,2
7,5	–4,4	17,5	–11,0	29,0	–20,0
9,0	–5,4	19,3	–12,2	30,1	–21,2

Таблица 3

Экспериментальные значения количества незамерзшей воды в песчаном грунте при начальной влажности  $W_0 = 4,2\%$

C = 0%		C = 5%		C = 10%		C = 20%	
T, °C	W <sub>нв</sub> , %	T, °C	W <sub>нв</sub> , %	T, °C	W <sub>нв</sub> , %	T, °C	W <sub>нв</sub> , %
-0,2	5,0	-2,9	4,2	-6,5	4,2	-14,1	4,2
-0,4	3,0	-4,0	3,25	-8,2	3,25	-14,9	3,8
-1,0	1,4	-6,4	1,8	-10,1	2,8	-16,2	3,6
-2,0	0,8	-8,0	1,6	-12,4	2,4	-17,2	3,4
-4,0	0,6	-10,2	1,32	-14,6	2,2	-18,9	3,35
		-13,0	1,0	-17,9	1,9	-20,2	3,3
		-16,0	0,76	-21,5	1,78		
		-20,0	0,65				

Образцы готовились из данного песчаного грунта с определенной влажностью 4,2% и концентрацией 5, 10, 20%. Для искусственного засоления образцы увлажнялись раствором NaCl. Температура замерзания объемного раствора NaCl в зависимости от концентрации приведена в табл. 2.

Концентрация раствора определялась по формуле

$$C = (m_c / m_g) \cdot 100, \quad (1)$$

где C – концентрация соли в талом песке, %;  $m_c$  – масса растворенной соли,  $m_g$  – масса воды.

Для сравнения также исследовались образцы, увлажненные дистиллированной водой.

Определение количества незамерзшей воды проводилось методом непрерывного ввода тепла. Преимущество метода состоит в том, что он позволяет определить не только количество незамерзшей воды, но и другие теплофизические характеристики, такие как теплопроводность, температуропроводность [1]. Используя этот метод, были получены экспериментальные данные определения количества незамерзшей воды для песчаного грунта с начальной влажностью  $W = 4,2\%$  и при варьировании концентрации соли от 0 до 20%. Результаты экспериментального определения количества незамерзшей воды приведены в табл. 3.

Используя данные табл. 3, можно рассчитать количество незамерзшей воды при различных отрицательных температурах для песчаного грунта при других значениях начальной влажности и концентрации порового раствора.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для расчета концентрации порового раствора в случае засоленного песчаного грунта в талом состоянии используется отношение (1), а в мерзлом состоянии

$$C(T) = (m_c / m_{нв}) \cdot 100, \quad (2)$$

где  $C(T)$  – концентрация соли при отрицательной температуре T, %;  $m_{нв}$  – масса незамерзшей воды, кг;  $m_c$  – масса соли, кг.

Начальная влажность  $W_0$  и количество незамерзшей воды  $W_{нв}(T)$  рассчитываются по формулам

$$W = (m_g / m_{ск}) \cdot 100, \quad (3)$$

$$W_{нв}(T) = (m_{нв} / m_{ск}) \cdot 100, \quad (4)$$

где  $m_{ск}$  – масса сухой навески, кг.

В песчаном грунте, при определенной температуре замерзания, концентрация соли остается одинаковой при любых значениях  $W_0$ , т.е.

$$C = m_{c1} / m_{e1} = m_{c2} / m_{e2} \text{ и т.д.}, \quad (5)$$

где  $m_{c1}$  и  $m_{e1}$  – масса соли и воды в первом образце с влажностью  $W_1$ ,  $m_{c2}$  и  $m_{e2}$  – масса соли и воды во втором образце с влажностью  $W_2$ .

Используя формулы (3) и (5), получаем  $m_{c1} / m_{c2} = (m_{e1} \cdot m_{ск}) / (m_{e2} \cdot m_{ск}) = (W_1 / W_2)$ , (6)

При любой влажности до температуры замерзания порового раствора грунта количество соли  $m_{ci}$  будет постоянным. Из этого следует, что для двух разных начальных влажностей до температуры замерзания отношение  $m_{c1} / m_{c2}$  остается постоянным. Поэтому из соотношения (6) следует, что

отношение жидкой фазы раствора будет постоянным.

Зная экспериментально определенные значения  $W_0$  (в нашем случае  $W_0 = 4,2\%$ ) и  $W_{не}$ , можно рассчитать  $W_{не}$  для другой начальной влажности, но при этой же температуре:

$$W_{не2} = W_{не1} \cdot (W_2 / W_1), \quad (7)$$

Если построить графики количества незамерзшей воды от температуры для одной концентрации, то получается семейство кривых в зависимости от различных значений начальной влажности. На рис. 1 показаны значения количества незамерзшей воды, рассчитанные по формуле (7) при постоянной  $C = 10\%$ .

Ранее была выведена формула, позволяющая определить температуру начала заморозки порового раствора грунта в зависимости от концентрации [10]:

$$t_{зам} = -0,7 \cdot C. \quad (8)$$

Исходя из этой формулы, можно сделать вывод о том, что температура начала заморозки при одной и той же концентрации независима от начальной влажности. Так, например, из рис. 1 видно, что для образца с концентрацией  $C = 10\%$  для влажностей 5, 10, 15 и 20% температура начала заморозки равна  $-7^\circ\text{C}$ .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных дает хорошее совпадение, и чем ниже температура, тем меньше расхождение между расчетными и экспериментальными данными.

Для концентраций порового раствора, равных 5, 15, 20%, используя экспериментально найденные зависимости количества незамерзшей воды от температуры (табл. 2) и формулу (7), можно рассчитать  $W_{не}$ , температуры начала заморозки при этом определяются по формуле (8) (рис. 2).

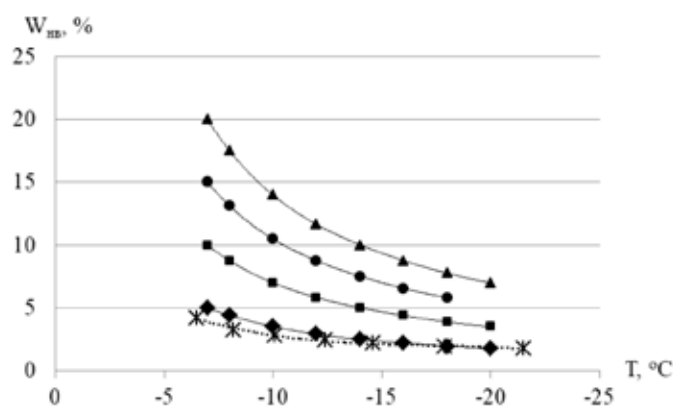


Рис. 1. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры в засоленном песчаном грунте:  $C = 10\%$ : \*-\*-\*-\* эксперимент; — — расчет по формуле (7) при  $\diamond - W_0 = 5\%$ ,  $\blacksquare - W_0 = 10\%$ ,  $\bullet - W_0 = 15\%$ ,  $\blacktriangle - W_0 = 20\%$

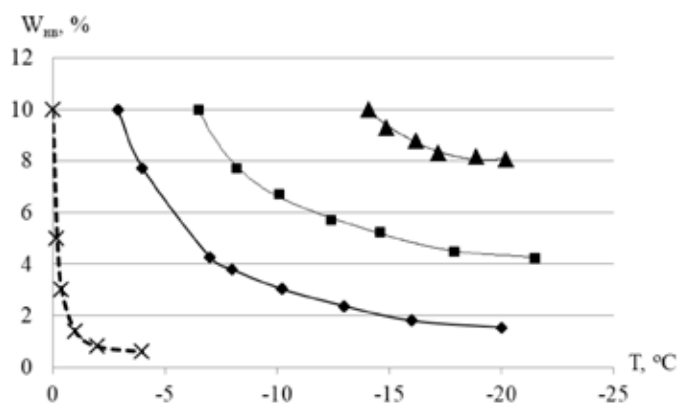


Рис. 2. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры в засоленном песчаном грунте  $W_0 = 10\%$ ,  $\times - C = 0\%$ ,  $\diamond - C = 5\%$ ,  $\blacksquare - C = 10\%$ ,  $\blacktriangle - C = 20\%$

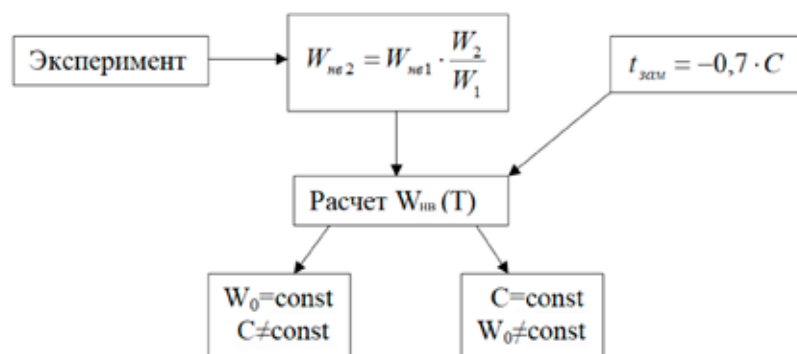


Рис. 3. Схема расчета температурной зависимости количества незамерзшей воды в засоленных песчаных грунтах

Также на этом рисунке для сравнения приведена экспериментально полученная температурная зависимость количества незамерзшей воды в незасоленном грунте.

На рис. 2 показаны значения  $W_{не}$  при различных отрицательных температурах и начальной влажности равной 10%. Таким же образом, пользуясь экспериментальными данными из табл. 2, можно построить зависимость  $W_{не}$  от  $T$  для других значений  $W_0$ , например 5, 15, 20% при различных значениях  $C$ . Из рисунка видно, что имеется определенная связь между количеством незамерзшей воды и засоленностью при фиксированной температуре, причем при повышении концентрации соли количество незамерзшей воды увеличивается.

Исходя из вышеизложенного можно построить схему расчета температурной зависимости количества незамерзшей воды в засоленных песчаных грунтах (рис. 3).

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, используя данные одного эксперимента по определению количества незамерзшей воды при определенном значении влажности и используя приведенную выше формулу, можно рассчитать количество незамерзшей воды для других значений влажности, но при одной концентрации порового раствора грунта. При этом также можно рассчитать значения количества незамерзшей воды при различных значениях концентрации порового раствора, но при постоянной влажности. Полученная формула применима только для засоленных песчаных грунтов. Для засоленных глинистых грунтов эта формула не применяется, так как не учитывается влияние дисперсности грунта и поэтому требуется дальнейшая доработка.

Предложенная методика расчета может использоваться при решении задач по моде-

лированию и диагностике температурных полей мерзлых засоленных песчаных грунтов, служащих основанием для различных инженерных сооружений в Арктической зоне.

*Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИФТПС СО РАН FWRS-2021-0045.*

### Список литературы

1. Степанов А.В. Тепломассообменные свойства техногенных грунтов криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2011. 150 с.
2. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А. Экспериментальное исследование перераспределения соли при промерзании засоленных грунтов и водных растворов // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 7–3 (61). С. 88–90.
3. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Наука, 1998. 208 с.
4. Пермяков П.П., Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б. Численное моделирование термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Наука и образование. 2016. № 2 (82). С. 43–48.
5. Комаров И.А. Методика прогноза теплофизических характеристик засоленных пород и криопэгов в процессе их криогенного метаморфизма (программный продукт, инженерные соотношения, нормативные технические документы) // Материалы докладов Четырнадцатой общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 11–14 декабря 2018 г.). М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 248–252.
6. Xiao Z., Zhu L., Hou Z. The change mechanism and a prediction model of unfrozen water content in sodium chloride soil. Geoderma. 2022. Vol. 419. P. 115881. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115881.
7. Lai Z., Zhao X., Tang R., Yang J. Electrical Conductivity-Based Estimation of Unfrozen Water Content in Saturated Saline Frozen Sand. Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 8881304. DOI: 10.1155/2021/8881304.
8. Мотенко Р.Г., Зубкова А.В., Давлетова Р.Р. Экспериментальная оценка влияния засоления на фазовый состав влаги и температуру начала замерзания (оттаивания) мерзлых песков, содержащих органическое вещество: материалы XVI Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М., 2021. С. 350–356.
9. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.
10. Ефимов С.С. Влага гигроскопических материалов. Новосибирск: Наука, 1986. 160 с.