

казателей физических свойств. В диапазоне влажности от 0 до полной влагоемкости происходят изменения по линейному закону в определенных пределах плотности грунта, коэффициента водонасыщения и относительного содержания газов. Остальные показатели в этом диапазоне влажности остаются постоянными.

При повышении влажности мерзлых грунтов за пределами полной влагоемкости показатели их плотности уменьшаются, стремясь к определенному пределу, а показатели пористости увеличиваются.

Полученные закономерности распространяются на все типы грунтов и могут быть применены для прогнозирования поведения этих

грунтов при использовании в качестве основания, среды и материала для сооружений.

Литература

1. *Вотьяков И.Н.* Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 176 с.
2. *Кузьмин Г.П.* Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума (3–7 сентября 2011 г., г. Мирный). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – С 59–63.
3. *Пчелинцев А.М.* Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. – М.: Наука, 1964. – 260 с.

Поступила в редакцию 12.02.2016

УДК 550.42:546.17(571.56)

Температура начала замерзания засоленных грунтов деятельного слоя в городской среде Якутска

Н.В. Торговкин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

Приводится оценка важнейшего инженерно-геологического показателя – температуры начала замерзания грунтового раствора засоленного грунта – T_{bf} . Сравниваются два расчетных метода этого показателя, которые применяются при отсутствии экспериментальных данных. Фактическим материалом послужили засоленные грунты деятельного слоя г. Якутска. Первый метод основан на химическом законе Рауля–Вант-Гоффа, который обусловлен влиянием комплекса солей и вычисляется как сумма температур, второй – на основе действующего СП 25.13330.2012 (Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах) и зависит от вида грунта и концентрации порового раствора. Результаты вычислений показали, что температура начала замерзания, рассчитанная по уравнению Рауля–Вант-Гоффа, во всех случаях оказалась ниже, чем по СП. Разница между этими показателями составляла: в песках в среднем 0,2°C, в супесях 0,6°C, а в суглинках около 1°C. Наибольшее различие характерно для поровых растворов грунтов, в химическом составе которых преобладают NaCl и Na₂SO₄, и присутствуют MgCl₂ и CaCl₂. При расчете температуры начала замерзания засоленных песков применимы оба расчетных метода. Для засоленных супесей и суглинков в химическом составе которых преобладают хлориды и сульфаты натрия, и, особенно, когда встречаются хлориды магния и кальция, предпочтительнее использовать уравнение Рауля–Вант-Гоффа.

Ключевые слова: засоленность, температура начала замерзания грунта, закон Рауля и Вант-Гоффа, грунтовый раствор.

Freezing Point of Saline Soils of Active Layer in Urban Environment of Yakutsk

N.V. Torgovkin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

The article provides the results of estimation of important geotechnical parameter which is the freezing point of a saline soil solution – T_{bf} . Comparison of two calculation methods for the indicator that are applied

ТОРГОВКИН Николай Владимирович – м.н.с., nicktorg@yandex.ru.

at absence of experimental data are presented. In this work we considered the saline soils of the active layer of Yakutsk city. The first method is established on the Raoult's law and Van't Hoff factor. It takes into account the salt complex and the temperatures sum is calculated. The second method is based on Code of Practice SP 25.13330.2012 (Bases and Foundations on Permafrost), and T_{bf} depends on a type of soil pore solution concentration. Our calculations results showed that freezing point being calculated according to the Raoult's law & Van't Hoff factor, in all cases was lower than being determined using the SP. The difference between the calculations results was about 0,2 degrees Celsius for sands, 0,6 degrees Celsius for loamy sands, and about 1,0 degrees Celsius for clay loams. The largest difference is typical for soil pore solutions in chemical composition of which NaCl and Na_2SO_4 predominate and $MgCl_2$ and $CaCl_2$ are present. For saline sands freezing point calculation both calculation methods are applicable. For saline loamy sands and clay loam in the chemical composition of which sodium chloride and sodium sulphate predominate, and especially when there are magnesium and calcium chlorides, more preferable is to use the Raoult's - Van't Hoff equation.

Key words: salinity, ground, freezing point, Raoult's law & Van't Hoff factor, ground solution.

Введение

Якутск – крупнейший по численности населения город мира, расположенный в криолитозоне. Население активно растет: с 195,4 тыс. человек в 2000 г. до 315,9 тыс. человек в 2014 г., т.е. почти на 50% за 15 лет. Растет и жилищный фонд: с 3,9 (2000 г.) до 5,4 (2012 г.) млн. m^2 , или на 40 %.

Территория Якутска представляет собой сложный в инженерно-геологическом отношении объект, для которого характерно развитие опасных криогенных явлений: термокарстовые и термосуффозионные просадки, морозобойное растрескивание, солифлюкция, локальное и площадное морозное пучение, термоэрозия, термоденудация, заболачивание и подтопление, техногенное наледообразование, развитие криопегов [2–4, 8].

Важное инженерно-геологическое значение имеет распространение на территории Якутска засоленных грунтов, обладающих агрессивными свойствами по отношению к материалам фундаментов (бетону и металлическим конструкциям) [7].

По данным Департамента жилищно-коммунального хозяйства администрации города, число каменных строений в аварийном состоянии оценивается в 7%. Начиная с 1970 г., в городе произошло более 25 случаев крупных обрушений каменных зданий постройки 50-х–60-х годов [8].

Известно, что засоленные мерзлые грунты различного химического состава при сезонных температурных колебаниях могут переходить из твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое и талое состояния. Такие грунты обычно имеют низкие значения прочности. Залегание таких грунтов в основании фундаментов может привести к деформациям и обрушениям зданий.

Методика

В отсутствии опытных экспериментальных данных для получения температур начала за-

мерзания засоленных грунтов было принято решение воспользоваться двумя расчетными методами: уравнением Рауля–Вант-Гоффа [1] и уравнением, принятым в официальном издании СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах [6].

Фактическим материалом послужили образцы, отобранные из скважин, пробуренных в рамках геокриологического мониторинга на территории Якутска, в которых были определены засоленность, химический состав, влажность и гранулометрический (зерновой) состав грунтов.

Установление температуры начала замерзания грунтовых растворов имеет важную практическую значимость, которая подчиняется химическим законам Рауля и Вант-Гоффа. Эти законы устанавливают закономерность понижения давления насыщенного пара воды в зависимости от концентрации соли [1]. Уравнение, выражающее связь между температурой замерзания (плавления) водных растворов солей и их содержанием в соответствии с указанными законами, имеет вид:

$$T_{bf} = 1,86 \sum i_i m_i + T_{bf}', \quad (1)$$

где 1,86 – криоскопическая постоянная воды, которая показывает снижение температуры замерзания раствора полностью неассоциированного вещества в результате диссоциации; i – изотонический коэффициент, показывающий во сколько раз увеличивается число частиц в растворе в результате диссоциации; T_{bf}' – температура начала замерзания незасоленной супеси – ($-0,2$ °C).

По Вант-Гоффу [1] для слабонасыщенных растворов параметр i представляет целые числа. Для солей, представленных одновалентными и одноосновными кислотами, при малых концентрациях i приближается к 2, для солей, образованных двухвалентными металлами и одноосновными кислотами, величина этого коэффициента равна 3. Значения i для характерных солей,

Таблица 1

Основные характеристики солей, встречающихся в грунтовых растворах

Соль	Молекулярный вес, М	Коэффициент i	Соль	Молекулярный вес, М	Коэффициент i
CaCl ₂	111	3	CaSO ₄	138	2
MgCl ₂	95,2	3	MgSO ₄	120,4	2
NaCl	58	2	Na ₂ SO ₄	142	3
NaHCO ₃	142	3	Mg(HCO ₃) ₂	146,3	3
Ca(HCO ₃) ₂	162	3			

содержащихся в грунтовом растворе, приведены в табл. 1.

Л.Т. Роман и соавторы считают, что температура начала замерзания грунтовой влаги засоленного грунта, определенная по уравнению Рауля–Вант-Гоффа, хорошо согласуется с экспериментальными данными (в пределах засоленности 0,1–1,5 %)[5].

Согласно [6], температуру начала замерзания незасоленных, засоленных и заторфованных грунтов следует определять опытным путем, а в случае отсутствия экспериментальных данных допускается расчет по формуле (2) в зависимости от состава грунтов и концентрации порового раствора:

$$T_{bf} = A - B(53C_{ps} + 40C_{ps}^2), \quad (2)$$

где A – коэффициент, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта;

Таблица 2

Значения коэффициента A, характеризующего температуру начала замерзания незасоленного грунта

Грунт	A
Песок	–0,1
Супесь	–0,15
Суглинок	–0,2
Глина	–0,25

B – коэффициент, зависящий от типа засоления грунта: для незасоленных грунтов B=0, для грунтов морского типа засоления B=1, для грунтов с континентальным типом засоления B=0,85; C_{ps} – концентрация порового раствора. Значения коэффициента A приведены в табл. 2.

Результаты

Результаты расчета по формулам (1) и (2) приведены в табл. 3. Значения, рассчитанные по уравнению Рауля–Вант-Гоффа, показывают более низкие значения температуры начала замерзания грунтового (порового) раствора.

Для засоленных (S) песков (S=0,13–0,49%) температура начала замерзания порового раствора (T_{bf}) составляет от –0,24°C до –0,77°C, для супесей (S=0,19–1,35%), T_{bf} (–0,29°C) до (–2,43°C) и для суглинков (S=0,16–1,11%), T_{bf} (–0,25°C) до (–2,42°C). В среднем разница между обоими способами не превышает 0,2°C, но в отдельных образцах она может достигать более 1°C. В таких образцах отмечается, как правило, су-

Таблица 3

Результаты расчета температуры начала замерзания засоленных грунтов по формулам (1) и (2). Концентрации солей приведены в %

№ п/п	№ скв,	H, м	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂	MgSO ₄	CaSO ₄	NaHCO ₃	Mg(HCO ₃) ₂	Ca(HCO ₃) ₂	S, %	W, %	T _{bf} (1)	T _{bf} (2)	Разница
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Суглинки (n – 15)																
1	28	3	0,21	0,16					0,01	0,02	0,05	0,46	85	–0,47	–0,35	0,11
2	29	2	0,02	0,07					0,06	0,00	0,02	0,18	53	–0,34	–0,29	0,05
3	32	2	0,21	0,12					0,03	0,02	0,05	0,43	72	–0,51	–0,40	0,10
4	60	3	0,60	0,17			0,12	0,04				0,93	50	–1,19	–0,79	0,41
5		4	0,91				0,15	0,05				1,11	29	–2,42	–1,41	1,01
6	11	3	0,04	0,11			0,01	0,03				0,19	35	–0,43	–0,37	0,06
7	12	2	0,08	0,12					0,04	0,01	0,04	0,29	23	–0,79	–0,33	0,45
8		3	0,67		0,09	0,11						0,87	35	–1,74	–1,20	0,54
9	15	2	0,08	0,20					0,07	0,02	0,03	0,40	30	–0,78	–0,59	0,19
10	61	4	0,05	0,07					0,02	0,01	0,02	0,16	92	–0,28	–0,25	0,03
11	36	2	0,01	0,12					0,27	0,00	0,04	0,44	26	–0,87	–0,60	0,27
12		4	0,10	0,16					0,10	0,01	0,02	0,38	39	–0,65	–0,49	0,16
13		5	0,15	0,03					0,06	0,01	0,02	0,28	44	–0,53	–0,39	0,15

ТЕМПЕРАТУРА НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
14	39	2	0,03	0,05					0,10	0,00	0,02	0,20	51	−0,36	−0,31	0,06
15	23	1	0,11	0,07					0,04	0,01	0,01	0,24	53	−0,43	−0,33	0,10
Супеси (n –20)																
16	7	1	0,00	0,14			0,01	0,01			0,03	0,20	18	−0,62	−0,51	0,11
17		2	0,06	0,05					0,02	0,01	0,01	0,14	35	−0,40	−0,29	0,11
18	13	1	0,01	0,12						0,01	0,04	0,18	27	−0,46	−0,34	0,12
19	26	2	0,13	0,04					0,13	0,00	0,02	0,32	32	−0,72	−0,50	0,22
20	28	4	0,81		0,06	0,05						0,92	26	−2,43	−2,08	0,35
21		5	0,49	0,67			0,08	0,11				1,35	49	−1,49	−1,02	0,47
22		6	0,46	0,11			0,05	0,05				0,66	40	−1,11	−0,70	0,41
23	32	3	0,21	0,04					0,01	0,01	0,02	0,29	32	−0,71	−0,44	0,27
24	60	2	0,09	0,08					0,15	0,00	0,02	0,34	34	−0,68	−0,42	0,26
25	11	4	0,36	0,04			0,04	0,04				0,48	32	−1,04	−0,64	0,40
26	12	4	0,48		0,10	0,14						0,73	32	−1,58	−1,09	0,50
27	15	3	0,03	0,08					0,03	0,00	0,01	0,16	26	−0,47	−0,33	0,14
28	57	2	0,12	0,14			0,02	0,00		0,02		0,31	26	−0,77	−0,54	0,24
29	38	3	0,17	0,20			0,03	0,06				0,46	42	−0,71	−0,57	0,14
30		4	0,61	0,18			0,05	0,04				0,88	42	−1,37	−0,86	0,51
31	39	3	0,05	0,05					0,05	0,00	0,01	0,16	34	−0,41	−0,33	0,08
32	21	2	0,14	0,37			0,05	0,08				0,64	31	−1,09	−0,80	0,29
33		3	0,11	0,04					0,01	0,01	0,02	0,19	41	−0,45	−0,29	0,16
34	43	4	0,19	0,09			0,04	0,03				0,36	42	−0,63	−0,40	0,23
35	58	2	0,11	0,08					0,01	0,01	0,01	0,21	26	−0,63	−0,41	0,21
Пески (n –11)																
36	7	3	0,15				0,01	0,06			0,01	0,23	27	−0,64	−0,45	0,19
37	8	2	0,19	0,20					0,02	0,03	0,05	0,49	42	−0,77	−0,58	0,19
38	13	5	0,19	0,03					0,02	0,01	0,01	0,26	26	−0,74	−0,48	0,26
39	26	3	0,05	0,12					0,04	0,00	0,01	0,21	21	−0,66	−0,44	0,22
40	14	4	0,08	0,02			0,00			0,01	0,01	0,13	31	−0,43	−0,24	0,19
41	56	2	0,14	0,08					0,03	0,02	0,01	0,28	33	−0,64	−0,37	0,27
42	57	3	0,11	0,08					0,00	0,01	0,01	0,22	30	−0,58	−0,35	0,23
43		4	0,08	0,33					0,02	0,02	0,02	0,46	50	−0,60	−0,38	0,22
44	36	3	0,04	0,08					0,11	0,01	0,01	0,25	30	−0,55	−0,32	0,24
45	37	2	0,06	0,07					0,01	0,00	0,01	0,15	23	−0,51	−0,30	0,21
46		3	0,10	0,02					0,02	0,00	0,01	0,15	25	−0,53	−0,30	0,24

Жирным шрифтом выделены разницы температур, превышающие 0,4°C.

щественное преобладание в солевом составе NaCl (60–85%), либо Na₂SO₄ (40–50%) от суммы всех солей, а иногда незначительное присутствие MgCl₂ (0,02–0,32%) и CaCl₂ (5–19%). Наличие солей хлоридов магния и кальция говорит о криогенной метаморфизации, связанной с отжатием солей при протаивании–промерзании.

Выводы

На территории Якутска распространены засоленные грунты, поровый раствор которых начинает замерзать при температуре −0,2°C и ниже. Так средняя температура начала замерзания засоленных песков составляет −0,6°C, супесей – −0,8°C, суглинков – −0,7°C. Грунты, обладаю-

щие такими температурными характеристиками (особенно в деятельном слое интервале 1–3 м), могут переходить в пластично-мерзлое и талое состояния.

В дисперсных грунтах, где разница в рассчитанных температурах начала замерзания засоленного грунта выше 0,4°C, в солевом составе, как правило, преобладает NaCl (60–80%) и Na₂SO₄ (40–50%) и иногда присутствуют MgCl₂ и CaCl₂. Это указывает на криогенную метаморфизацию, связанную с отжатием солей при протаивании–промерзании, или на миграцию солей вместе с пленочной влагой.

В целом обе формулы являются приемлемыми для расчетов, но для супесей и суглинков деятельного слоя, в составе которых преобладают хлориды и сульфаты натрия, и, особенно, когда встречаются хлориды магния и кальция, предпочтительней использовать формулу (1), так как она учитывает солевой состав грунтового (порового) раствора.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15–45–05050 «Экспериментальные исследования формирования и эволюции техногенных криопэгов на урбанизированной территории криолитозоны в Центральной Якутии» (2015 г.), а так же при финансовой поддержке Гранта им. академика П.И. Мельникова для молодых ученых, аспирантов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН и студентов СВФУ – 2016.

Литература

1. Глинка Н.Л. Общая химия. – Л.: Наука, 1976. – 712 с.
2. Курчатова А.Н. Влияние техногенных наледей на засоленность литогенной основы городских ландшафтов Якутии // Криолитозона и подземных вод Сибири. – Якутск, 1996. – Ч.2. – С. 95–105.
3. Макаров В.Н. Геохимия мерзлотных почв в сфере влияния городского техногенеза // Геохимия техногенеза. – Новосибирск: Наука, 1986. – С. 118–124.
4. Павлова Н.А., Данзанова М.В., Сериков С.И. Оценка техногенного влияния на обводненность и гидрохимическую обстановку г. Якутска // Геоэкология. – 2014. – № 3. – С.207–214.
5. Роман Л.Т., Артюшина В.И., Иванова Л.Г. Зависимость прочности мерзлых засоленных грунтов от температуры начала замерзания грунтовой влаги // Геоэкология. – 1994. – № 1. – С.49–55.
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. – М., 2012. – 119 с.
7. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Агрессивность сезонно-талых и мерзлых грунтов Якутска // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 85–89.
8. Шац М.М., Сериков С.И. Современное обводнение территории г. Якутска // Наука и образование. – 2009. – № 4. – С.76–80.

Поступила в редакцию 20.06.2016

УДК 551.345:550.837.7

Изменения геокриологического состояния насыпных ГТС в Западной Якутии и оптимизация их мониторинга комплексом электроразведочных методов геофизики

В.Н. Ефремов*, А.В. Дроздов**

**Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

***НИИП Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный*

На основе натурных наблюдений предложены пути для повышения эффективности мониторинга геокриологического состояния насыпных гидротехнических сооружений (ГТС) в криолитозоне с использованием оптимального комплекса геофизических методов. Рассмотрены основные природные факторы, влияющие на температуру грунтов ГТС, и возможности геофизических методов для мониторинга их состояния в условиях Западной Якутии. Из них, как наиболее значимо влияющие на состояние мерзлых грунтов ГТС, выделены средняя годовая и минимальная температуры приземного воздуха наряду с длительностью холодного периода. С учетом данных условий предложены подходы к оптимизации использования комплекса геофизических методов. Для примера их реализации пред-

ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич – д.т.н., в.н.с., vne@mpi.ysn.ru; ДРОЗДОВ Александр Владимирович – гл. специалист-геофизик, DrozdovAIV@alrosa.ru.