

РАСЧЁТ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ МОСКВЫ

Расчитана глубина промерзания грунтов в Москве для ряда песков, супесей, и суглинков. Расчёт выполнялся численным методом конечных разностей (метод балансов). Количество незамерзшей влаги учитывалось согласно СП 25.1333.2012. В качестве климатических граничных условий использовался «типовой» год. Для сравнения приведены глубины промерзания грунтов, рассчитанные по инженерной методике. Выявлено, что плотность, влажность, а также засоленность грунтов сильно влияют на глубину промерзания, и это не учтено в инженерной методике. При температуре замерзания грунта, влага замерзает только в наиболее насыщенных влагой грунтах. Полученные глубины промерзания, рассчитанные с учетом плотности, влажности и засоленности грунта имеют значения как меньшие, так и большие значений, полученных без учета перечисленных факторов.

***Ключевые слова** промерзание грунтов, метод балансов, незамерзшая влага, климатический «типовой» год, песок, супесь, суглинок, засоленность грунтов.*

Введение. Глубина сезонного промерзания грунта используется во многих случаях, в том числе для определения глубины заложения фундаментов здания, глубины прокладки канализационных трубопроводов, глубины утепления наружных стен зданий в грунте. Этой задаче посвящены работы [1–3], и другие. В работах [1, 2] описана программа, решающая задачу осадки здания, и связанную с ней задачу промерзания грунтов при помощи трёхмерных численных конечноэлементных расчётов, Программный комплекс учитывает постепенное замерзание влаги в толще грунта, миграцию влаги к фронту промерзания, но основан на более ранней версии СП 25.13330 [4], где не учитывается засоленность грунта. В работе [3] выполнены расчёты промерзания грунта для трёхмерной области методом конечных элементов, и выполнен аналитический расчёт для одного направления, но не учтено постепенное замерзание грунта.

Согласно СП 22.13330.2011 [5] глубина промерзания, если она ниже 2,5 метров, определяется по сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур, принимаемых по СП 131.13330.2012 [6], и при помощи коэффициента, значения которого различны для разных типов грунтов. Влияние плотности, суммарной влажности, влажности на границе раскатывания, засоленности грунта в формуле не учитывается. Помимо вышеперечисленных параметров на характеристики грунта влияют и другие параметры, такие как содержание кварца [7]. Для того чтобы иметь представление, как изменяется глубина промерзания грунта, в зависимости от перечисленных выше факторов был выполнен численный расчёт в одном направлении (по глубине) численным методом балансов.

Рядом метеорологических станций предоставлена информация о температуре на глубинах 0,8, 1,6 и 3,2 м [8], однако для Московской станции (ВДНХ) данных нет. Измерение глубины промерзания грунтов затруднено неизвестностью, в какое именно время года следует проводить измерение: тепловая инерция грунтов сильно варьируется, и величина, измеренная, например, в середине марта может не быть минимальной для некоторых типов грунтов. В тоже время известно, что по результатам предпроектных изысканий в проектах для московского региона принимается глубина промерзания 1,8 м и даже более 2,0 м.

Методика численного расчета. Одномерный расчёт промерзания грунтов в Москве выполнен конечноразностным методом балансов [9]. Схема неявная, консервативная, и поэтому подходит для случая изменяющихся коэффициентов температуропроводности. Замерзание и оттаивание грунта учитывалось при помощи метода сглаживания его теплофизических характеристик [10]. Температура замерзания грунта находилась в конце интервала сглаживания. Получившуюся кривую зависимости температуропроводности от температуры представляли в виде

гетерогенного сплайна: данные для температуры ниже предполагаемой точки замерзания представлены в виде монотонного сплайна [11], выше точки замерзания, в виде прямых линий. При процедуре сглаживания характеристик возможны два варианта событий.

1) *Количество незамёрзшей жидкости в точке замерзания больше суммарной влажности талого грунта.* В таком случае замерзание поровой влаги в грунте начнётся при более низких температурах чем нормативная температура замерзания. При помощи метода золотых сечений [8] и формулы Б.4 СП 25.13330 [4] находится реальная температура начала замерзания грунта. Зависимость количества незамёрзшей влаги от температуры аппроксимируется монотонным кубическим сплайном [10]. Величина объёмной теплоёмкости, C'_v , Дж/(°С·м³), находится как:

$$C'_v = C_v + \partial W_w / \partial T \cdot \rho_f \cdot L_0 \cdot 1000.0,$$

где C_v — объёмная теплоёмкость грунта без учёта незамёрзшей влаги, Дж/(°С·м³); $\partial W_w / \partial T$ — доля количества влаги, замерзающей при температуре рассматриваемой точки, д.е. от плотности грунта — берётся из сплайна;

$L_0 = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг — значение удельной теплоты фазовых превращений вода-лед;

ρ_f — плотность мёрзлого грунта, г/см³.

Разрыв второго рода между кривыми ниже и выше точки замерзания сглаживается прямой. Величина температуропроводности a , м²/с, в каждой точке построения аппроксимирующего сплайна находится по формуле

$$a = \lambda / C'_v,$$

где λ — теплопроводность грунта в рассматриваемой точке, Вт/(м·°С).

2) *Количество незамёрзшей жидкости в точке замерзания больше суммарной влажности грунта.* В таком случае кривая коэффициентов температуропроводности ниже точки замерзания находится аналогично предыдущему случаю, а влага, замёрзшая в точке замерзания, учитывается местным увеличением теплоемкости грунта на интервале выше точки замерзания.

В описании граничных условий на поверхности земли были приняты климатические данные «типового» года [11]. За начальную была принята температура 4 °С. Шаги по координате до 30 метров глубины приняты равными 0,2 метра, от 30 до 100 — 0,5 метров. Расчёт проводился на временном отрезке в течение 8 лет с шагом в 30 минут.

Определение характеристик грунта. При понижении температуры грунта ниже температуры замерзания, часть поровой влаги в нём остаётся незамёрзшей. Для песков, супесей, суглинков и глин эта часть не зависит от суммарной влажности грунта [13, 14]. При дальнейшем понижении температуры она постепенно кристаллизуется. В приложении Б СП 25.13330 [4] приведена методика определения теплофизических характеристик грунтов с учётом этого явления. Исходными данными методики служат следующие величины: плотность сухого талого и замёрзшего грунтов, ρ , г/см³; суммарная влажность грунта w_{tot} , д.е; влажность на границе раскатывания w_p , д.е, степень засоленности грунта: D_{sal} , %, число пластичности грунта, I_p . В расчёте исходные значения плотности ρ и суммарной влажности w_{tot} принимались из значений таблицы Б.8 СП 25.13330 [4]. Степень засоленности и тип грунта также брались из шапки таблицы Б.8, и с учетом данных ГОСТ 25100 [15] вычислялись значения I_p и D_{sal} , w_p , как средние из классификационных диапазонов.

Результаты расчёта. Результаты расчёта приведены в таблицах 1 – 3. В таблицах размерность плотности грунта, кН/м³, соответствует принятой в [5]. Для сравнения с результатами расчета, учитывающего плотность, влажность и засоленность грунта, приведена глубина промерзания, рассчитанная по инженерной методике [5]. Из таблиц видно, что засоленность и влажность играют большую роль в величине глубины промерзания, а плотность грунта незначительную. Фазовый переход жидкости при температуре замерзания грунта происходит только в случаях с самым большим из рассмотренных содержанием влаги в грунтах. Торможение промерзания грунта при фазовом переходе проявляется незначительно по сравнению с влиянием возрастания коэффициента теплопроводности более увлажнённых грунтов. Поэтому при увеличении влажности глубина промерзания грунта возрастает. Для песков значение глубины промерзания, полученное по инженерной методике, соответствует сильнозасоленным грунтам с влажностью (0,1 — 0,15). Для супесей и глин рассчитанное по инженерной методике значение соот-

ветствует среднесоленным грунтам с высоким содержанием влаги (0,3 — 0,25), или слабосоленным с низким содержанием (0,05 — 0,1).

Таблица 1 – Промерзание песков с разной плотностью, влажностью, и засоленностью

Плотность сухого грунта, кН/м ³	Суммарная влажность грунта, д.е.	Глубина промерзания грунта, м,				
		по методике [5]	незасоленного	слабозасоленного	среднесоленного	сильнозасоленного
14	0,25	1,436	2,7	2,1	1,5	1,3
14	0,2	1,436	2,5	1,9	1,3	1,1
14	0,15	1,436	2,5	1,9	1,3	1,1
14	0,1	1,436	2,1	1,5	1,1	0,7
14	0,05	1,436	1,5	1,1	0,7	0,5
16	0,25	1,436	2,7	2,1	1,7	1,3
16	0,2	1,436	2,5	1,9	1,5	1,1
16	0,15	1,436	2,5	1,7	1,3	1,1
16	0,1	1,436	2,1	1,5	1,1	0,9
16	0,05	1,436	1,7	1,1	0,7	0,5
18	0,2	1,436	2,7	2,1	1,5	1,3
18	0,15	1,436	2,7	1,9	1,3	1,1
18	0,1	1,436	2,3	1,7	1,3	0,9
18	0,05	1,436	1,9	1,3	0,7	0,5

Таблица 2 – Промерзание супесей, с разной плотностью, влажностью и засоленностью

Плотность сухого грунта, кН/м ³	Суммарная влажность грунта, д.е.	Глубина промерзания грунта, м,				
		по методике [5]	незасоленного	слабозасоленного	среднесоленного	сильнозасоленного
14	0,30	1,340	2,1	1,9	1,5	1,1
14	0,25	1,340	2,1	1,9	1,3	1,1
14	0,20	1,340	2,1	1,7	1,3	0,9
14	0,15	1,340	1,9	1,5	1,1	0,9
14	0,1	1,340	1,7	1,3	0,9	0,7
14	0,05	1,340	1,3	0,9	0,5	0,5
16	0,25	1,340	2,1	1,7	1,3	1,1
16	0,2	1,340	1,9	1,7	1,1	0,9
16	0,15	1,340	1,9	1,5	1,1	0,9
16	0,1	1,340	1,7	1,3	0,9	0,7
16	0,05	1,340	1,3	0,9	0,7	0,5
18	0,2	1,340	1,9	1,7	1,1	0,9
18	0,15	1,340	1,9	1,5	1,1	0,9
18	0,1	1,340	1,9	1,5	0,9	0,7
18	0,05	1,340	1,3	1,1	0,7	0,5

Таблица 3 – Промерзание суглинков, с разной плотностью, влажностью и засоленностью

Плотность сухого грунта, кН/м ³	Суммарная влажность грунта, д.е.	Глубина промерзания грунта, м,				
		по методике [5]	незасоленного	слабозасоленного	среднесоленного	сильнозасоленного
14	0,35	1,101	1,9	1,7	1,3	0,9
14	0,30	1,101	1,9	1,7	1,1	0,9
14	0,25	1,101	1,9	1,5	1,1	0,9
14	0,20	1,101	1,7	1,5	0,9	0,7
14	0,15	1,101	1,5	1,1	0,7	0,7
14	0,1	1,101	1,3	0,9	0,7	0,5
14	0,05	1,101	0,9	0,7	0,5	0,0
16	0,25	1,101	1,9	1,5	1,1	0,9
16	0,2	1,101	1,9	1,5	1,1	0,7
16	0,15	1,101	1,7	1,1	0,9	0,7
16	0,1	1,101	1,5	1,1	0,7	0,5
16	0,05	1,101	0,9	0,7	0,5	0,0
18	0,2	1,101	1,9	1,5	1,1	0,7
18	0,15	1,101	1,7	1,3	0,9	0,7
18	0,1	1,101	1,5	1,1	0,7	0,5
18	0,05	1,101	1,1	0,7	0,5	0,0

Стоит отметить, что в случае песков, миграция влаги к фронту промерзания может несколько уменьшить глубину промерзания. Для учёта влажности грунта следует построить кривые изменения влажности в зависимости от времени в течение года и глубины грунта в зависимости от количества осадков в регионе.

Выводы. При расчёте глубины промерзания грунта необходимо учитывать его влажность и засоленность в соответствии с рекомендациями СП 25.1333.2012. Можно заметить, что при повышении засоленности грунтов и понижении их влажности, заметно снижается глубина их промерзания. Искусственно изменяя их влажность (например, изолировав грунт под зданием от попадания в них влаги) можно снижать их способность к теплопередаче, тем самым уменьшая глубину промерзания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парамонов, В.Н. Процессы промерзания и оттаивания при устройстве подземных и заглубленных сооружений / В.Н. Парамонов, И.И. Сахаров, М.В. Парамонов // Жилищное строительство. – 2012. – №9. – С.21–25.
2. Кудрявцев, С.А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчёты) / С.А. Кудрявцев. – СПб, 2014. – 247 с.
3. Борисов, В.С. Численное решение задачи о процессах промерзания и протаивания в многолетнемерзлых грунтах / В.С. Борисов // Вестник СВФУ им. Аммосова. – 2015. – Т.12, №2. – С.36–42.
4. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88: Минрегион России. – 2012. – 124 с.
5. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – 2011-05-20.
6. СП 131.13330.2012. Строительная климатология : актуализированная версия СНиП 23-01-99*: Минрегион России. – 2012. – 113 с.
7. Тимофеев, Д.В. Сравнение теплофизических характеристик грунта по СП 25.13330.2012 (РФ) и ASHRAE (США) / Д.В. Тимофеев: Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании. – М., 2015. – С.584–588.
8. Весёлов, В. М. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В.М. Весёлов. – [Режим доступа:] <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii>.
9. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – СПб.: БВХ-Петербург, 2014. – 592 с.
10. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 784 с.
11. Fritsch, F.N. Monotone piecewise cubic interpolation / F.N. Fritsch, R.E. Carlson // SIAM J. Numer. Anal. – 1980. – Vol. 17, №2. – P.238–246.
12. Гагарин, В.Г. Разработка климатической информации в форме специализированного «типового года» / В.Г. Гагарин, Е.Г. Малявина, Д.С. Иванов // Вестник ВолгГАСУ. – 2013. – №вып. 31(50), ч. 1: Города России. – С.343–349.
13. Григорьев, Б.В. Замерзание влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях / Григорьев Б.В. дис. ... канд. тех. наук; Тюменский Государственный Университет. – Тюмень, 2013. – 135 с.
14. Newman, G.P. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing / Newman Greg P. M.Sc. thesis; University of Saskatchewan. – Canada, 1995. – 259 p.
15. ГОСТ 25100-2011. ГРУНТЫ. Классификация: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации. – 2011. – 78 с.

Тимофеев Даниил Викторович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

Аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

E-mail: daniil@fastmail.fm

Малявина Елена Георгиевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

E-mail emal@list.ru

D. TIMOFEEV, E. MALYAVINA

FROSTING DEEP CALCULATIONS FOR SOILS WITH VARIOUS PARAMETERS AT MOSCOW CLIMATE

The depth of soil freezing in Moscow was calculated for a number of sands, sandy loams, and loams. The calculation was performed by a numerical finite difference method (balance method). The amount of unfrozen moisture was accounted for in accordance with SP 25.1333.2012. As a climatic boundary conditions, a "typical" year was used. For comparison, the depths of soil freezing are calculated, calculated by the engineering method. It was found that the density, humidity, and salinity of soils strongly influence the depth of freezing, and this is not taken into account in the engineering method. At the freezing point of the soil, moisture freezes only in the most saturated with moisture soils. The obtained freezing depths, calculated with allowance for density, humidity and salinity of the soil, have values both smaller and larger than those obtained without taking into account the listed factors.

Key words: soil freezing, balance method, unfrozen moisture, climatic "typical" year, sand, sandy loam, loam, salinization of soils.

BIBLIOGRAPHY

1. Paramonov, V.N. Protsessy promerzaniya i ottaivaniya pri ustroystve podzemnykh i za-glublennykh sooruzheniy / V.N. Paramonov, I.I. Sakharov, M.V. Paramonov // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2012. – №9. – S.21–25.
2. Kudryavtsev, S.A. Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechno-elementnye raschety) / S.A. Kudryavtsev. – SPb, 2014. – 247 s.
3. Borisov, V.S. Chislennoe reshenie zadachi o protsessakh promerzaniya i protaivaniya v mnogoletnemerzlykh gruntakh / V.S. Borisov // Vestnik SVFU im. Ammosova. – 2015. – T.12, №2. – S.36–42.
4. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.04-88: Minregion Rossii. – 2012. – 124 s.
5. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83*.
6. SP 131.13330.2012. Stroitel'naya klimatologiya : aktualizirovannaya versiya SNIp 23-01-99*: Minregion Rossii. – 2012. – 113 s.
7. Timofeev, D.V. Sravnenie teplofizicheskikh kharakteristik grunta po SP 25.13330.2012 (RF) i ASHRAE (SShA) / D.V. Timofeev: Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii. – M., 2015. – S.584–588.
8. Veselov, V. M. Nauchno-prikladnoy spravochnik «Klimat Rossii» / V.M. Veselov. – <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik-klimat-rossii>.
9. Kalitkin, N.N. Chislennye metody / N.N. Kalitkin. – SPb.: BVKh-Peterburg, 2014. – 592 s.
10. Samarskiy, A.A. Vychislitel'naya teploperedacha / A.A. Samarskiy. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2009. – 784 s.
11. Fritsch, F.N. Monotone piecewise cubic interpolation / F.N. Fritsch, R.E. Carlson // SIAM J. Numer. Anal. – 1980. – Vol. 17, №2. – P.238–246.
12. Gagarin, V.G. Razrabotka klimaticheskoy informatsii v forme spetsializirovannogo «tipovogo goda» / V.G. Gagarin, E.G. Malyavina, D.S. Ivanov // Vestnik VolgGASU. – 2013. – № 31(50), ch. 1: Goroda Rossii. – S.343–349.
13. Grigor'ev, B.V. Zamerzanie vlazhnykh gruntov v ravnovesnykh i neravnovesnykh usloviyakh / Grigor'ev B V. dis. ... kand. tekhn. nauk; Tyumenskiy Gosudarstvennyy Universitet. – Tyumen', 2013. – 135 s.
14. Newman, G.P. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing / Newman Greg P. M.Sc. thesis; University of Saskatchewan. – Canada, 1995. – 259 p.
15. GOST 25100-2011. GRUNTY. Klassifikatsiya: Mezghosudarstvennaya nauchno-tekhnicheskaya komissiya po standartizatsii. – 2011. – 78 s.

D. Timofeev

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow
Post graduate student at Heating and Ventilation Department
E-mail: daniil@fastmail.fm

E. Malyavina

Moscow State University of Civil Engineerin (MGSU), Moscow
Candidate of Technical Sciences (PhD), Professor of Heating and Ventilation Department
E-mail emal@list.ru