

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГРУНТАХ ПО ГЛУБИНЕ ПРОМЕРЗАНИЯ

**Р. Ш. АБЖАЛИМОВ** – канд. техн. наук, заслуженный строитель России, советник генерального директора ТПИ «Омскгражданпроект» по техническим вопросам, член РОМГГиФ.

Рассмотрено использование многолетних натуральных наблюдений за распределением в грунте (по данным Омского управления гидрометеослужбы) для очищенных и неочищенных от снега поверхностей с целью определения расчетной глубины проникания нулевой температуры в грунт с требуемой доверительной вероятностью для застроенных территорий городов (с учетом их фактической влажности и толщины снежного покрова). Полученные данные использовались при проектировании малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтовых основаниях, подземных сооружений и коммуникаций, дорог и аэродромов.

При проектировании фундаментов зданий и сооружений, в том числе на пучинистых грунтах сезонного промерзания, а также подземных инженерных коммуникаций, автомобильных дорог и аэродромов необходимо с достаточной надежностью определить распределение отрицательных температур, максимальную глубину и скорость промерзания грунта и образования твердомерзлого грунта.

Для современных экономичных малозаглубленных фундаментов, трубопроводов и других сооружений с утепляющими элементами требуется решение нелинейной двухмерной (плоской) или трехмерной (пространственной) задачи с применением метода конечных элементов [1]. Наиболее удобной для пользователей является программа TEMP/W (версия 5.01 1995 г.) [1]. Однако она не учитывает миграцию влаги к фронту промерзания, в отличие от программы «Termoground», разработанной специалистами ЗАО НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект» [2].

Температурное поле в этих программах при определении глубины промерзания по времени вычисляется при известных средней (нормативной) температуре грунта на дневной

поверхности и времени ее действия, принимаемых по [3]. Это не позволяет определить распределение отрицательной температуры по глубине промерзания при взаимодействии с заглубленными в грунт источниками теплоизлучения необходимой обеспеченностью, например, при  $\alpha = 0,90; 0,95$  и т. д.

Нами разработан стандарт по определению распределения температуры в грунтах по глубине промерзания для застроенных территорий городов и населенных пунктов Омской области. Для этого использованы данные наблюдений за распределением нулевой температуры в грунте под снегом, полученные Омским управлением гидрометеорологической службы по 28 постам, размещенным на территории области, за 1950–1965 гг., а по некоторым постам – за 1950–1975 гг. Кроме этого, использован короткий ряд параллельных наблюдений за распределением нулевой температуры в грунте для очищенной и неочищенной от снега поверхности за зимы 1961–1965 гг. для поста в Омске. Наблюдения проводились круглый год с помощью вытяжных термометров, заключенных в эбонитовые трубки и установленных на площадке с естественным покровом на глубинах 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 и 3,2 м. Наблюдения на глу-

© Р. Ш. Абжалимов, 2007

Internet: [www.georec.spb.ru](http://www.georec.spb.ru)

бинах до 0,6 м проводились четыре раза в сутки с интервалом 7...6 ч, а с глубины 0,8 м – один раз в сутки.

Отметим, что в управлениях гидрометеорологической службы России накоплены материалы подобных наблюдений за период более 50 лет. Их использование позволило бы значительно удешевить стоимость строительства фундаментов, дорог, аэродромов, подземных инженерных коммуникаций и повысить надежность их эксплуатации за счет использования расчетного значения распространения нулевой температуры в грунте для наиболее холодных суток, декады и месяца с требуемой доверительной вероятностью.

Температура почвы незначительно изменяется от года к году, что позволяет при обработке ограничиваться сравнительно короткими рядами. Распределение среднемесячных и декадных значений температуры грунта на глубине 0,2...3,2 м принято считать нормальным [6].

Ввиду короткого ряда параллельных наблюдений за распределением температуры в грунтах и максимальной глубины распространения нулевой температуры в грунте для очищенной и не очищенной от снега поверхности ( $n = 5$  лет) автором использованы известные приемы продления ряда методом отношений и методом разности температур по глубине промерзания [6].

Для очищенной от снега поверхности использован метод отношений [6]:

$$\bar{Y}_N = \frac{\bar{Y}_n}{\bar{X}_n} \bar{X}_N, \quad (1)$$

где  $Y_N, Y_n$  – средние арифметические значения глубины распространения нулевой температуры в грунте соответственно для длинного ряда ( $N$  лет наблюдений) и короткого ряда ( $n$  лет) для очищенной от снега поверхности;  $X_N, X_n$  – то же для неочищенной от снега поверхности.

Распределение температуры грунтов по глубине промерзания для очищенной и неочищенной поверхностей для наиболее холодного месяца и декады определяли с использованием средних значений разниц температур по глубине промерзания для короткого ряда наблюдений (5 лет) с трансформацией их в длинный ряд с учетом средней многолетней толщины снежного покрова [6].

Обрабатывались результаты многолетних наблюдений температуры грунтов для глубин 0,8; 1,2 и 1,6 м, а также максимального промерзания для очищенной и не очищенной от снега поверхностей с вероятностью  $\alpha = 0,5; 0,90; 0,95$  и  $0,98$ . В летнее время максимальные температуры определялись для глубин 0,8 и 1,2 с вероятностью  $\alpha = 0,90; 0,95$  и  $0,98$  для расчета перегрева электрокабелей.

Анализ полученных результатов показал следующее:

Разброс среднедекадных ( $\alpha=0,50$ ) температур грунтов по районам Омской области на глубине 0,8 м под снежным покровом составил от  $-1$  до  $-6,3^\circ\text{C}$ ; на глубине 1,2 м – от  $+0,1$  до  $-4,3^\circ\text{C}$ ; на глубине 1,6 м – от  $+0,7$  до  $2,5^\circ\text{C}$ .

Разброс среднедекадных ( $\alpha = 0,50$ ) температур грунтов на глубине 0,8 м для очищенной от снега поверхности составил от  $-5,1$  до  $-8,3^\circ\text{C}$ , на глубине 1,2 м – от  $-3,1$  до  $-6,3^\circ\text{C}$ ; на глубине 1,6 м – от  $-0,8$  до  $-3,7^\circ\text{C}$ .

Средняя глубина распространения нулевой температуры в грунте по районам Омской области под снежным покровом составила от 1,11 м (пос. Тевриз) на севере области до 2,72 м (пос. Полтавка) на юге, разброс – 2,45 раза.

Средняя глубина распространения нулевой температуры в грунте очищенной от снега поверхности составила от 1,6 м (г. Тара) до 2,95 м (пос. Русская Поляна) на юге области, разброс – 1,84 раза.

Такой большой разброс температур грунтов по районам области для очищенной и не очищенной от снега поверхностей объясняется влиянием на промерзание грунтов влажности и уровня грунтовых вод, толщины снежного покрова, вида и плотности грунтов, рельефа и микрорельефа местности, растительности и других факторов. При этом такой определяющий фактор, как индекс промерзания, равный сумме произведений абсолютных значений отрицательной температуры на время

$$F = \sum (|T_i| \Delta t_i) \quad (2)$$

изменялся незначительно по постам наблюдений. Так, для Омска он составил 2079 град.-сут, для Тары – 2304 град.-сут, для Черлака – 2100 град.-сут, для Исиль-Куля – 2140 град.-сут. Отношение  $F_{\max}/F_{\min} = 2304/2079 = 1/11$ . Так, для очищенной от снега поверхности при

Таблица 1

Годы наблюдений	Минимальная месячная температура, °С			Минимальная декадная температура, °С		
	Глубина, м			Глубина, м		
	0,8	1,2	1,6	0,8	1,2	1,6
	<i>Под снегом</i>					
1961	-2,5	-1,1	-0,1	-2,9	-1,2	-0,2
1962	-2,6	-0,9	-0,1	-3,2	-1,1	-0,2
1963	-2,6	-1,2	-0,2	-2,9	-1,2	-0,2
1964	-3,3	-1,6	-0,4	-3,6	-1,8	-0,5
1965	-2,9	-1,0	0,00	-3,2	-1,3	-0,1
<i>n</i> = 5	$\bar{X} = -2,8$	$\bar{X} = -1,16$	$\bar{X} = -0,16$	$\bar{X} = -3,2$	$\bar{X} = -1,32$	$\bar{X} = -0,24$
	<i>Без снега</i>					
1961	-5,4	-3,3	-1,3	-6,2	-3,9	-1,6
1962	-5,3	-3,2	-1,3	-6,2	-3,9	-1,6
1963	-2,7	-2,6	-1,7	-3,4	-3,3	-2,8
1964	-6,2	-4,1	-1,7	-7,5	-5,0	-1,9
1965	-6,3	-3,6	-0,7	-6,7	-3,7	-1,0
<i>n</i> =5	$\bar{X} = -5,2$	$\bar{X} = -3,4$	$\bar{X} = -1,3$	$\bar{X} = -6,0$	$\bar{X} = -4,0$	$\bar{X} = -1,8$

Таблица 2

Годы наблюдений	Максимальная глубина проникания							
	под снегом				без снега			
	$\alpha = 0,50$	$\alpha = 0,90$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,98$	$\alpha = 0,50$	$\alpha = 0,90$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,98$
1961	1,67	–	–	–	2,02	–	–	–
1962	1,78	–	–	–	2,0	–	–	–
1963	1,73	–	–	–	2,65	–	–	–
1964	1,83	–	–	–	2,04	–	–	–
1965	1,87	–	–	–	2,07	–	–	–
<i>n</i> = 5 лет	$\bar{X} = 1,78$	–	–	–	$\bar{X} = 2,16$	–	–	–
<i>n</i> = 34 лет	1,76	2,08	2,18	2,29	2,13	2,52	2,64	2,77

соотношении индекса промерзания для севера области (г. Тара) и юга (пос. Русская Поляна – Черлак), равном 1,1, разброс глубины распространения нулевой температуры в грунте составил 1,84 раза.

Влажность грунтов на постах наблюдений изменялась от 0,12 в пос. Русская Поляна и пос. Полтавка до 0,18 в г. Тара, а плотность сухого грунта  $P_d = 1500 \dots 1600$  кг/м<sup>3</sup>. Грунт – в основном тяжелый суглинок, за исключением поста в Омске, где сверху до глубины 0,8 м залегает легкий суглинок, а ниже – супесь  $W = 0,15$ ;  $P_d = 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

В табл. 1 приведены минимальные месячная и декадная температуры грунтов для поста в Омске.

В табл. 2 приведены максимальные глубины распределения нулевой температуры в грунте для поста в Омске, а также их расчет-

ные значения при доверительной вероятности  $\alpha = 0,5 \dots 0,98$ .

В табл. 3 приведены среднесуточные скорости промерзания грунтов ( $U_f$ ) по месяцам с температурой 0, –0,6 и –1,0°С за зимы 1961–1965 гг.

Таблица 3

Месяц	$U_f$ , см/сут					
	под снегом			без снега		
	0°С	–0,6°С	–1,0°С	0°С	–0,6°С	–1,0°С
Ноябрь	2,7	2,22	1,9	2,8	2,32	2,0
Декабрь	1,4	1,31	1,25	2,0	1,58	1,3
Январь	1,2	0,96	0,8	1,5	1,14	0,9
Февраль	1,0	0,82	0,7	1,3	1,00	0,8
Март	0,55	0,38	0,27	0,4	0,28	0,16

На рис. 1 и 2 приведены графики скорости промерзания грунта под снегом и без него при

температуре грунтов не ниже 0, -0,6 и -1,0°C. Как видно из графиков, с глубиной скорость промерзания уменьшается как для очищенной от снега поверхности, так и под снегом. Скорость промерзания грунта под снегом в марте несколько больше, чем для очищенной поверхности.

Толщина твердомерзлого слоя (ТСГ) грунта из суглинка ( $T \leq -1^\circ\text{C}$ ) составила под снегом 1,29 м, без снега 1,35 м, соотношение толщины ТСГ к общей глубине распределения нулевой температуры в грунте под снегом  $K_1 = 1,29/1,78 = 0,725$ , без снега  $K_2 = 1,35/2,11 = 0,64$ ; для супеси ( $T \leq -0,6^\circ\text{C}$ ) под снегом  $K_3 = 1,48/1,78 = 0,83$ , без снега  $K_4 = 1,65/2,11 = 0,78$ .

При расчете зданий на пучинистых грунтовых основаниях с учетом появления в зданиях и сооружениях дополнительных усилий при совместной деформации основа-

ния и здания глубину распространения нулевой температуры в грунте предлагается определять при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  (по аналогии с [7]). Тогда расчетные значения толщины ТСГ для суглинка при  $\alpha = 0,95$  составят с использованием данных табл. 2 под снегом  $d_{T1} = 0,725 \cdot 2,18 = 1,58$  м; без снега  $d_{T2} = 0,64 \cdot 2,64 = 1,69$  м. То же для супеси под снегом  $d_{T3} = 0,83 \cdot 2,18 = 1,81$  м и без снега  $d_{T4} = 0,78 \cdot 2,64 = 2,06$  м.

Очевидно, что в реальных условиях строительства на застроенных территориях городов и населенных пунктов влажность грунтов, толщина снежного покрова и уровень грунтовых вод по отношению к глубине промерзания будут существенно отличаться от данных результатов, полученных для наблюдаемых постов.

Глубину распространения нулевой температуры в грунте при фактической влажности,



Рис. 1. Нормативные скорости промерзания грунта под снегом: 1 – при температуре 0°C; 2 – при  $T \leq -0,6^\circ\text{C}$ ; 3 – при  $T \leq -1,0^\circ\text{C}$

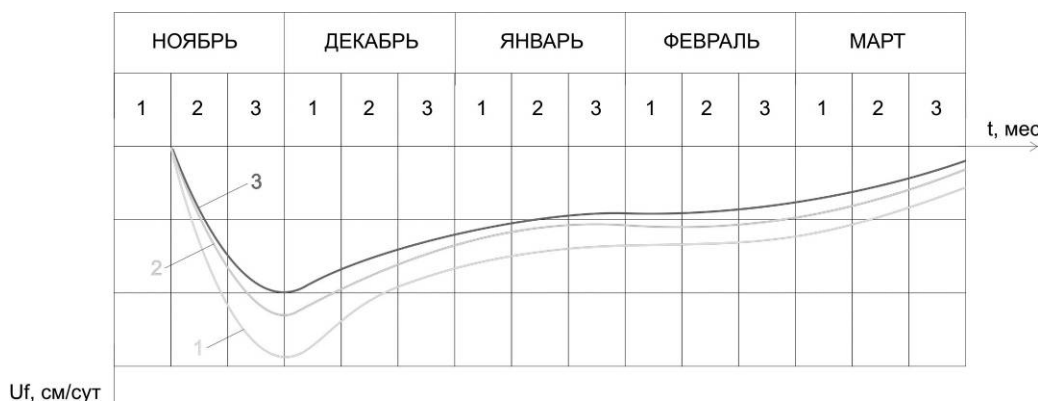


Рис. 2. Нормативные скорости промерзания грунта без снега: 1 – при температуре 0°C; 2 – при  $T \leq -0,6^\circ\text{C}$ ; 3 – при  $T \leq -1,0^\circ\text{C}$

отличающейся от влажности грунта поста наблюдения, вычислим по формуле

$$d_{f,w} = k_{df} \cdot \bar{d}_{f,c}; \quad (3)$$

$$k_{df} = \frac{d_{f,w}}{\bar{d}_{f,n}}, \quad (4)$$

где  $\bar{d}_{f,n}$  – нормативная глубина распространения нулевой температуры в грунте для поста;  $k_{df}$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности на глубину промерзания грунта.

Отметим, что глубина промерзания будет несколько меньше глубины распространения нулевой температуры в грунте.

Подставляем в (4) выражение для определения глубины промерзания при фактической влажности грунта [7, прил. 3]:

$$d_{f,n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot f(T_{bf} - T_{f,m}) \cdot t_{f,m}}{q_2}}, \quad (5)$$

где  $q_2 = L_v - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf})$  (6) – количество холода, необходимое для промораживания свободной воды в  $1 \text{ м}^3$  грунта, Дж/м<sup>3</sup>;  $L_v$  – теплота замерзания грунта, Дж/м<sup>3</sup>, определяемая по прил. 1 [7] при температуре грунта  $T = 0,5(T_{f,m} - T_{bf})$ , °С;  $T_{f,m}, t_{f,m}$  – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур, °С и продолжительность этого периода [3];  $T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, °С, определяемая по прил. 1 [7];  $C_f$  – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/м<sup>3</sup>, принимаемая по прил. 1 [7];  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С), определяемый по прил. 1 [7].

Поскольку величина  $2(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}$  – практически постоянна в пределах Омской области,

$$k_{df} = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}_f \cdot q_f}{\lambda_f \cdot \bar{q}_f}}, \quad (7)$$

где  $\bar{\lambda}_f$  и  $\lambda_f$  – соответственно коэффициенты теплопроводности мерзлого грунта поста наблюдения и грунта застроенной территории;  $\bar{q}_f, q_f$  – соответственно количество холода, необходимое для промораживания свободной воды в  $1 \text{ м}^3$  грунта поста наблюдения и для грунта застроенной территории.

Таким образом, используя формулы (7) и (3), определяем фактическую глубину промерзания в любом из 28 районов Омской области в зависимости от влажности грунтов.

Многолетние наблюдения указывают на значительные (1,2...1,7 раза) различия между толщиной снежного покрова на открытой и защищенной местности. При этом коэффициент 1,2 относится к более низким участкам, а 1,7 – к возвышенным.

Застроенные населенные пункты относятся к защищенным территориям, толщина снежного покрова здесь больше, чем в открытом поле. Нами толщина снежного покрова для застроенных территорий принята с минимальным коэффициентом 1,2 по отношению к нормативной толщине снежного покрова для открытого поля [5].

Нормативную глубину промерзания грунта на застроенной территории с учетом фактической влажности и толщины снежного покрова для защищенной территории определяем по формуле [8]:

$$d_{f,w,c} = \sqrt{(k_{df} \cdot \bar{d}_{f,c})^2 + S^2} - S, \quad (8)$$

где  $S$  – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно сопротивлению снега и определяется по формуле [8]

$$S = \frac{\lambda_f \cdot \Delta h_c}{\lambda_c}, \quad (9)$$

где  $\lambda_c$  – приведенный коэффициент теплопроводности снега, принимаемый по [5] с учетом изменения толщины снежного покрова и его плотности в течение зимнего периода, например, для поста в Омске  $\lambda_c = 0,315 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ ;  $\Delta h_c$  – дополнительная толщина снежного покрова для защищенной территории, м;  $\bar{d}_{f,c}$  – нормативная глубина промерзания грунта под снегом для поста наблюдения, м.

Сотрудниками ОмскТИСИЗа под руководством автора на застроенных территориях двух микрорайонов в Омске измерялась глубина промерзания грунтов, согласно [9], в течение зим 1986–1988 гг. Измерения проводились с помощью гирлянд электрических термосопротивлений в виде катушек сопротивлением 225...100 Ом (электрические датчики температуры), установленных в полиэтиленовых трубах Ø80 мм на глубине

0,4...3,2 м с шагом 0,4 м и залитых парафином. Измерения проводились мостом Р-333 с частотой один раз в декаду. С учетом технических характеристик термостата и измерительной арматуры (мост Р-333) точность определения температуры грунта можно не выше  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Скважина №1 расположена в микрорайоне поселка «Восточный» вблизи экспериментального водопровода  $\varnothing 100$  мм к жилому дому №2 по ул. 3-я Железнодорожная, а скважины №2, 3 – у жилого дома №2 по ул. Омская. Скважина №2 находится в непосредственной близости от поверхности водопроводного колодца, а скважина №3 – на расстоянии 6 м от наружной стены дома и 2,5 м от края проезда к жилому дому шириной 3,5 м. Поскольку проезд к дому регулярно очищался от снега, его толщина у скважины №3 составила около 0,6 м, у скважины №2 за зимы 1987 и 1988 гг. – около 0,15...0,2 м, а у скважины №1 в 1986 г. – около 0,22 м и в 1987 г. – 0,2 м.

Физические характеристики грунтов на исследуемых площадках приведены в табл. 4. За три года наблюдений уровень грунтовых вод у жилого дома №2 по ул. Омской составил 1,3...1,5 м от поверхности земли, а у жилых домов по ул. 3-я Железнодорожная – 0,8...1,3 м.

Графики максимального проникания нулевой температуры в грунт приведены на рис. 3.

Максимальная глубина распространения нулевой температуры в грунте у скважины №1 составила 1,6 м за зиму 1986 г., 1,5 м – за 1987 г., у скважины №2 – 1,32 м за 1987 и 1988 гг., а у скважины 3 – 1,11 м за 1987 г., 1,07 м – за 1988 г.

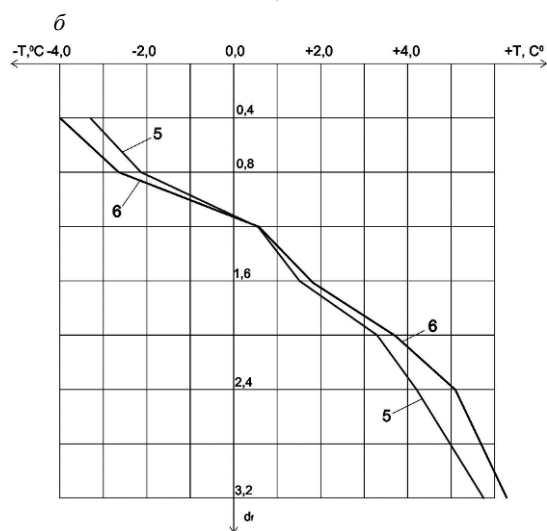
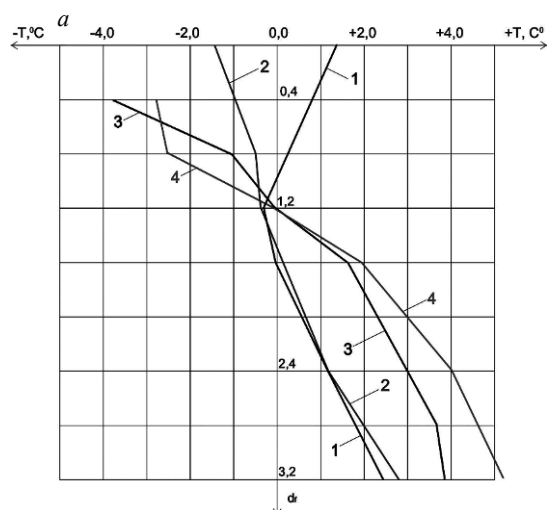


Рис. 3. Графики распределения температуры грунтов по глубине промерзания: а – у скважины №1: 1 – за 28.04.1986 г. и 2 – за 27.03.1987 г.; у скважины №2: 3 – за 20.02.1987 г. и 4 – за 03.03.1988 г.; б – у скважины №3: 5 – за 20.02.1987 г. и 6 – за 04.02.1988 г.

Таблица 4

Объекты	Физические характеристики грунтов							
	$W$ , дол.ед.	$W_p$ , дол.ед.	$W_T$ , дол.ед.	$J_p$ , дол.ед.	$J_L$ , дол.ед.	$S_r$ , дол.ед.	$P$ , ч/см <sup>3</sup>	$P_d$ , ч/см <sup>3</sup>
Жилой дом №2 по ул. Омская в Омске	<i>Суглинок мягкопластичный, h = 2,5...3,0 м (скважины №2, 3)</i>							
	0,25	0,18	0,31	0,13	0,62	0,93	1,97	1,58
Два жилых дома по ул. 3-я Железнодорожная в Омске	<i>Супесь пластичная, h = 2,2...3,5 м (скважина №1)</i>							
	0,17	0,15	0,21	0,06	0,36	0,84	2,02	1,73

Нормативная глубина промерзания для грунта скважины №1 с учетом его фактической влажности, определенная по формулам (3), (7), составила  $d_{f;n} = 0,96 \cdot 1,76 = 1,69$  м; для грунта скважины №3  $d_{f;n2} = 0,79 \cdot 1,76 = 1,39$  м. Несколько меньшее значение фактической глубины промерзания грунтов на застроенных территориях объясняется более теплыми зимами по сравнению нормативным индексом промерзания и неучетом увеличения влажности грунтов за счет миграции влаги в зону промерзания.

Таким образом, использование данных многолетних наблюдений за распределением в грунте нулевой температуры для очищенной и не очищенной от снега поверхностей региональных агрометеостанций позволяет определить:

наиболее точно и с любой вероятностью распределение температуры грунтов по глубине промерзания с учетом фактической влажности грунтов;

скорость образования твердомерзлых слоев для различных грунтов и соотношение их толщины с глубиной промерзания;

скорость промерзания грунтов по месяцам и рассчитать миграционное влагонакопление;

с требуемой доверительной вероятностью (обеспеченностью) расчетные значения температур грунта вокруг малозаглубленных фундаментов отапливаемых и неотапливаемых зданий, подземных сооружений, водопровода, канализации, теплотрассы, газопроводов, электрокабелей и т. д. и обеспечить надежность их эксплуатации.

## Список литературы

*Невзоров А. П.* Фундаменты на сезонно-промерзающих грунтах. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2000.

*Кудрявцев С. А.* Численное моделирование процесса промерзания, морозного пучения и оттаивания грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – №5. – С. 21–26.

*СНиП 23–01–99\**. Строительная климатология. – М.: Госстрой России, 2003.

*Справочник по климату СССР. Вып. 17. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. VIII. Т. 2. Температура почвы.* – Омск.: Изд-во Омского управления гидрометеорологической службы, 1977.

*Справочник по климату СССР. Вып. 17. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров.* – Л.: Гидрометеиздат, 1968.

*Кобышева Н. В., Наровлянский Г. Я.* Климатическая обработка метеорологической информации. – Л.: Гидрометеиздат., 1968.

*СНиП 2.02.04–88.* Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Госстрой России, 2000.

*Порхаев Г. В. и др.* Пособие по теплотехническим расчетам санитарно-технических сетей, прокладываемых в вечномерзлых грунтах. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1971.

*ГОСТ 25358–82.* Грунты. Метод полевого определения температуры. – М.: Изд-во стандартов, 1982.