

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ
ЗАДАННОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ЗАДАЧАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОГ**

При проектировании дорог, мостов, дамб и других инженерных сооружений часто приходится определять глубину промерзания грунтов. Правильное установление ее дает возможность создавать прочные и наиболее рациональные конструкции сооружений и избегать пагубного влияния на них разрушающих сил, возникающих вследствие замерзания и оттаивания грунтов.

Промерзание грунтов — сложный процесс перемещения и фазового изменения поровой воды, сопровождаемый изменением температуры и физического состояния грунта. Исследованию этого процесса посвящено много работ советских и зарубежных ученых, которые предложили ряд формул [1, 4, 8]. Результаты расчетов у каждого из них неодинаковы и зависят от учета тех или иных факторов, влияющих на промерзание грунтов, — температура воздуха, теплофизические свойства грунтов и др. Кроме того, многие формулы выведены на основании экспериментальных данных — некоторые из них не учитывают главных факторов и могут быть использованы лишь в частных случаях.

К таким относятся формулы:

А. Н. Будникова

$$Z = 2\lambda_T \sqrt{\sum \theta_c}; \quad (1)$$

Н. В. Стаценко

$$Z = K \sqrt{\sum \theta_c} - 2S; \quad (2)$$

П. И. Колоскова

$$Z = K \frac{\sqrt{\sum T_m}}{\sqrt{T_2 \cdot W_y}}; \quad (3)$$

В. Ф. Утенкова

$$Z = 60(4p - p^2); \quad (4)$$

Г. И. Лапкина

$$Z = 4,9(\sum \theta_c); \quad (5)$$

где Z — глубина промерзания, *см*;
 $\sum \theta_c$ — сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха за зиму;

λ_T — теплопроводность грунта, *ккал/(м·ч·град)*;

K — эмпирический коэффициент;

S — средняя мощность снегового покрова;

T_2 — среднегодовая температура воздуха;

W_y — климатический показатель увлажнения, равный отношению годовой суммы осадков к сумме среднемесячных дефицитов влажности.

Применение этих формул связано с необходимостью иметь метеорологические данные того района, в котором проектируется объект.

Определение глубины промерзания грунтов можно производить также по формуле Н. А. Пузакова

$$Z = \frac{p_1 - p_0 - h_{од}(\delta_{од} - \delta_{гр})}{\delta_{гр}}, \quad (6)$$

где p_0 — внутреннее сцепление грунта, *г/см²*;

p_1 — общее давление в грунте, прекращающее дальнейшее пучение, *г/см²*;

$\delta_{од}$, $\delta_{гр}$ — объемные веса одежды и грунта, *г/см³*;

$h_{од}$ — толщина одежды, *см*.

В этом случае исходными являются характеристики грунтов и дорожной одежды.

Для дорог большой длины, по трассе которых имеются грунты различного состава и влажности, объем данных наблюдений будет громоздким. Исследованием тепловых процессов земляного полотна занимались многие ученые (Г. М. Шахунянц, Н. А. Пузаков и др.). Им удалось добиться хороших результатов. Разработанные Г. М. Шахунянцом [8] теоретические предпосылки и практические методы определения глубины промерзания грунтов применяются при проектировании железных дорог. В основу их положен косинусоидальный закон распределения температуры на дневной поверхности грунта. Работы Н. А. Пузакова содержат данные о влагонаполнении и промерзании земляного полотна применительно к автомобильным дорогам [4]. Он предлагает использовать в расчетах данные наблюдений метеорологических станций (продолжительность зимы, глубину промерзания грунтов) и другие гидрологические факторы. При обработке данных полевых наблюдений им было установлено, что приращение глубины промерзания $dh_{пр}$ за время действия отрицательных температур dt_z и глубины от поверхности $h_{пр}$ может быть выражено уравнением

$$dh_{\text{np}} = \frac{\alpha dt_3}{h_{\text{np}}}, \quad (7)$$

где α — коэффициент, учитывающий суммарно тепловые свойства промерзающего грунта и характер метеорологических особенностей зимы в данном районе (градиенты температур).

Скорость промерзания грунта можно определить по формуле

$$V_{\text{np}} = \frac{dh_{\text{np}}}{dt}, \quad (8)$$

но так как

$$dh_{\text{np}} = \frac{\alpha dt_3}{h_{\text{np}}},$$

получим

$$V_{\text{np}} = \frac{dh_{\text{np}}}{dt} = \frac{\alpha}{h_{\text{np}}}.$$

Время промерзания можно определить из уравнения (7):

$$dt_3 = \frac{1}{\alpha} h_{\text{np}} dh_{\text{np}}.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$t_3 = \frac{1}{\alpha} \int h_{\text{np}} dh_{\text{np}}$$

или

$$t_3 = \frac{h_{\text{np}}^2}{2\alpha} + C.$$

Для определения постоянной интегрирования C примем граничные условия — при $t_3 = 0$ значение $h_{\text{np}} = 0$, следовательно, и $C = 0$. В результате глубина промерзания будет равна

$$h_{\text{np}} = \sqrt{2\alpha t_3}, \quad (9)$$

а скорость промерзания как функцию от продолжительности действия отрицательных температур находим по формуле

$$V_{\text{np}} = \sqrt{\frac{\alpha}{2t_3}}. \quad (10)$$

Используя формулы (9) и (10), можно решить практические задачи, связанные с проектированием дорог. В то же

время значение α , входящее в расчетные формулы Н. А. Пузакова, является величиной неизвестной, а определение ее — довольно сложным. С нашей точки зрения наиболее удобным и достаточно точным будет статистический метод определения глубины промерзания грунтов, так как она является величиной варьирующей.

Порядок определения глубины промерзания этим методом будет зависеть от наличия или отсутствия данных фактических наблюдений.

В первом случае расчеты выполняются в следующем порядке.

1. На основании имеющихся данных наблюдений метеостанций составляется таблица (ряд) максимальных глубин промерзания грунтов в каждом году.

2. Вычисляется среднеарифметическая величина глубины промерзания

$$H_{\text{ср}} = \frac{\Sigma H}{n}, \quad (11)$$

где ΣH — сумма промерзания за n лет;
 n — число лет наблюдений.

3. Определяются модульные коэффициенты

$$K = \frac{H_i}{H_{\text{ср}}}, \quad (12)$$

где H_i — глубина промерзания i -го года.

4. Определяется коэффициент вариации

$$C_v = \sqrt{\frac{\frac{\Sigma (K-1)^2}{n-1}}{n-1}}. \quad (13)$$

5. Вычисляется коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{\Sigma (K-1)^3}{(n-1) \cdot C_v^3}. \quad (14)$$

6. По C_s , C_v и имеющимся таблицам В. В. Лебедева [3] можно построить кривую обеспеченности (по Рыбкину, рис. 1) или вычислить расчетную глубину промерзания H_p данной обеспеченности.

7. По таблицам Н. В. Смирнова [6] в зависимости от C_v и заданной повторяемости глубины промерзания определяется значение y (по Гумбелю).

8. Определяется величина модульного коэффициента K_s , соответствующего заданной повторяемости глубины промерзания,

$$K_s = 1 + C_v \left(\frac{y - y_n}{\sigma_n} \right). \quad (15)$$

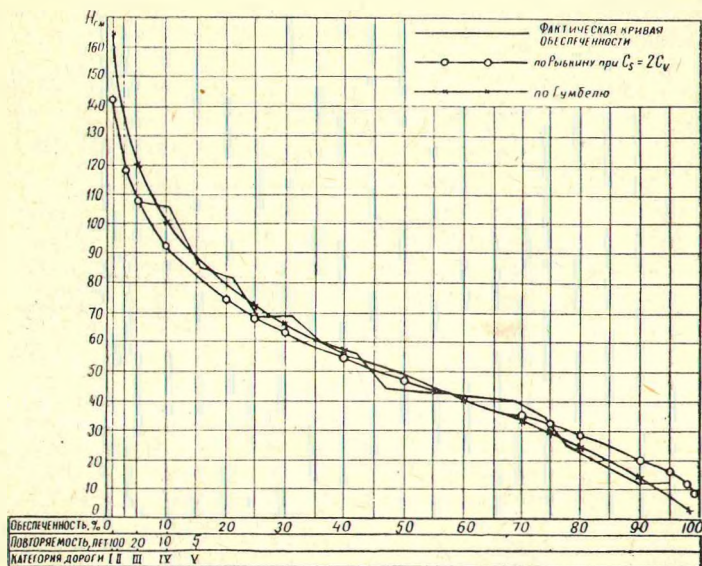


Рис. 1. Кривая обеспеченности максимальной глубины промерзания грунта по ст. Вилейка

9. Вычисляется искомая величина глубины промерзания заданной обеспеченности

$$H_p = K_s \cdot H_{cp}. \quad (16)$$

Этой величиной можно пользоваться в практических целях.

При отсутствии фактических данных наблюдений расчетная глубина промерзания грунтов может быть определена по картам изолиний средних многолетних глубин промерзания и коэффициентов вариации C_v . Применительно к условиям Белорусской ССР такая работа нами выполнена.

Для составления карт изолиний использованы данные 22 метеостанций, на которых в течение 16—20 лет велись наблюдения за глубиной промерзания грунтов. Кроме того, изучен вопрос о возможном применении существующих методов при построении кривой обеспеченности глубин промер-

зания грунтов. В частности, исследовались кривые — двойного экспоненциального распределения (Э. Гумбеля), биномиальная $C_s = 2C_v$ (С. И. Рыбкина) и интегральная распределения (С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля).

Расчет кривых обеспеченности максимальной глубины промерзания грунта рассмотрим на примере ст. Вилейка (табл. 1). Для определения $H_{ср}$, C_v и C_s данные наблюдений расположим по убывающей величине и проведем промежуточные вычисления.

Таблица 1

Годы	H , см	$H_{ср}$, см	$K = \frac{H_i}{H_{ср}}$	$K-1$		$(K-1)^2$	$(K-1)^3$	P, %
				+	-			
1954	108		2,0689	1,0689		1,1425	1,2212	5,3
1962	106		2,0306	1,0306		1,0521	1,0946	10,5
1964	85		1,6284	0,6284		0,3949	0,2482	15,8
1958	80		1,5326	0,5326		0,2837	0,1511	21,1
1950	69		1,3218	0,3218		0,1036	0,0333	26,3
1947	68		1,3027	0,3027		0,0916	0,0277	31,6
1952	58		1,1111	0,1111		0,0123	0,0014	36,8
1960	55		1,0536	0,0536		0,0029	0,0002	42,1
1957	44		0,8429		0,1571	0,0231	-0,0036	47,4
1948	43		0,8238		0,1762	0,0310	-0,0055	52,6
1963	43	52,2	0,8238		0,1762	0,0310	-0,0055	57,9
1949	42		0,8046		0,1954	0,0382	-0,0074	63,2
1956	40		0,7663		0,2337	0,0405	-0,0128	68,4
1951	35		0,6704		0,3296	0,1086	-0,0358	73,7
1961	24		0,4598		0,5402	0,2918	-0,1576	78,9
1953	18		0,3448		0,6552	0,4293	-0,2813	84,2
1955	12		0,2299		0,7701	0,530	-0,4567	89,5
1959	12		0,2299		0,7701	0,5930	-0,4567	94,7
Итого 942				4,0497	4,0038	5,2872	1,3548	

Используя данные табл. 1, определим C_v и C_s :

$$C_v = \sqrt{\frac{\Sigma(K-1)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{5,2872}{17}} = 0,56;$$

$$C_s = \frac{\Sigma(K-1)^3}{(n-1) \cdot C_v^3} = \frac{1,3548}{17 \cdot 0,176} = 0,45;$$

$$\frac{C_s}{C_v} = \frac{0,45}{0,56} = 0,8.$$

По вычисленным коэффициентам C_v и C_s на основании таблиц ординат интегральной кривой распределения [2, 3] получим значения максимальных глубин промерзания грунта разной обеспеченности, которые сводим в табл. 2 (по С. И. Рыбкину) и в табл. 3 (по Э. Гумбелю).

Таблица 2

$P, \%$	1	3	5	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	95	97	99
Φ	3,09	2,28	1,89	1,34	0,74	0,54	0,36	0,07	-0,18	-0,41	-0,62	-0,74	-0,85	-1,10	-1,28	-1,38	-1,52
$M_s = \Phi C_v$	1,73	1,28	1,06	0,75	0,41	0,30	0,20	0,04	-0,10	-0,23	-0,35	-0,41	-0,48	-0,62	-0,72	-0,77	-0,85
$K_s = M_s + 1$	2,73	2,28	2,06	1,75	1,41	1,30	1,20	1,04	0,90	0,77	0,65	0,53	0,52	0,38	0,28	0,23	0,15
$H_p = K_s H_{cp}$	142	119	108	91	74	68	63	54	50	40	34	31	27	20	15	12	8

$$H_{cp} = 52,2 \text{ см}; \quad C_v = 0,55; \quad C_s = 2 \cdot C_v = 20,56 = 1,12.$$

$P, \%$	$\Phi(y)=1-P$	y	$0,53y$	$K_s=0,72-0,53y$	$H_p=K_sH_{cp}$
1	0,99	-1,527	-0,809	-0,809	—
3	0,97	-1,255	-0,665	0,055	3
5	0,95	-1,097	-0,581	0,139	7
10	0,90	-0,834	-0,442	0,278	14
20	0,80	-0,476	-0,252	0,468	24
25	0,75	-0,327	-0,173	0,547	29
30	0,70	-0,186	-0,098	0,622	32
40	0,60	0,087	0,046	0,766	40
50	0,50	0,367	0,194	0,914	48
60	0,40	0,672	0,356	1,076	56
70	0,30	1,031	0,546	1,266	66
75	0,25	1,246	0,660	1,380	72
80	0,20	1,500	0,795	1,515	79
90	0,10	2,250	1,192	1,912	100
95	0,05	2,970	1,574	2,294	120
97	0,03	3,491	1,850	2,570	134
99	0,01	4,600	2,438	3,158	164

$$C_{\sigma} = 0,56$$

$$C_s = 0,45$$

N — продолжительность наблюдения (18 лет);

H_{cp} — средняя глубина промерзания (52,2 см).

Модульный коэффициент

$$K_s = 1 + C_{\sigma} \left(\frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right) = 1 + 0,56 \left(\frac{y - 0,5202}{1,0493} \right) = 0,72 - 0,53y,$$

где \bar{y}_n и σ_n — среднее и стандартное отклонения;
 y — действительное отклонение.

При сравнении теоретических данных глубины промерзания грунтов с данными наблюдения видно, что расхождения незначительны. Следовательно, биномиальная кривая распределения вполне может быть использована для расчета глубины промерзания грунтов. Следует отметить, что обработку данных для построения кривой обеспеченности лучше вести по Э. Гумбелю, так как эта кривая имеет меньшие отклонения от действительной кривой, чем кривая, построенная по С. И. Рыбкину (см. рис. 1).

Выполненные аналогичным образом расчеты по всем двадцати двум метеостанциям БССР позволили составить карты изолиний. На рис. 2 представлена схематическая карта БССР с нанесенными на нее изолиниями средних многолетних глубин промерзания грунтов; на рис. 3 — карта с нанесенными на нее изолиниями коэффициента вариации C_{σ} . Расчет производим в таком порядке:

Для лесовозных автомобильных дорог в соответствии с этой рекомендацией расчетная обеспеченность будет составлять 10—20%.

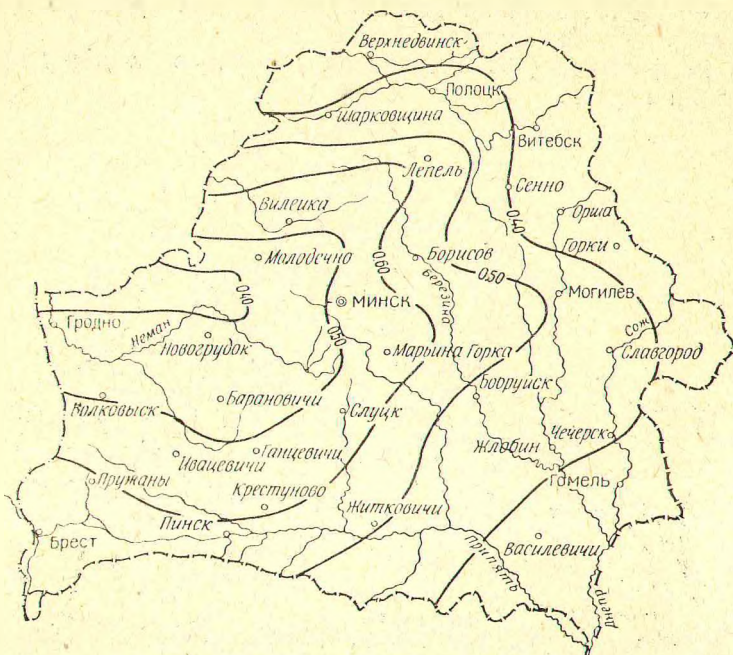


Рис. 3. Карта изолиний коэффициента вариации C_v

Литература

1. А. К. Бируля. Проектирование автомобильных дорог. Ч. I. Научно-техническое издательство Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1961.
2. Э. Гумбель. Статистика экстремальных значений. Изд-во «Мир», 1965.
3. В. В. Лебедев. Гидрология и гидрометрия в задачах. Гидрометеоздат, 1955.
4. Н. А. Пузаков. Водно-тепловой режим земельного полотна автомобильных дорог. Автотрансиздат, 1960.
5. Д. Л. Соколовский. Речной сток (основы теории и практики расчетов). Гидрометеоздат, 1950.
6. Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. Курс теории вероятностей и математической статистики. «Наука», 1965.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Гидрометеоздат, 1965.
8. Г. М. Шахунянец. Железнодорожный путь. Трансжелдориздат, 1961.