

А. А. Коновалов, Л. Т. Роман

**Особенности проектирования
фундаментов
в нефтепромысловых
районах Западной Сибири**

Ленинград
Стройиздат
Ленинградское отделение
1981

ББК 38.58
К 64
УДК 624.15.04:624.131.27 (571.1)

Научный редактор — д-р техн. наук В.В. Докучаев

Коновалов А.А., Роман Л.Т.

К 64 Особенности проектирования оснований и фундаментов в нефтепромысловых районах Западной Сибири.— Л.: Стройиздат. Ленингр. отд.-ние, 1981. — 168 с., 37 ил.

В книге дается анализ особенностей проектирования оснований и сооружений в северных районах Западной Сибири, систематизируются необходимые для этого показатели климатических и мерзлотно-грунтовых условий района. Рассматриваются мероприятия по повышению несущей способности грунтовых оснований. Приводится методика тепловых расчетов, выполняемых при проектировании сооружений различного назначения и конфигурации.

Книга предназначена для инженеров-проектировщиков, изыскателей и строителей, занятых хозяйственным освоением севера Западной Сибири и смежных с ним районов.

К 30206 — 199 253 — 80. 3202000000
047(01) — 81

ББК 38.58
6С4.03

©Стройиздат, Ленинградское
отделение, 1981

ВВЕДЕНИЕ

Север Западной Сибири — один из богатейших районов мира по природным ресурсам. Хозяйственное освоение этой территории, в частности промышленное и жилищное строительство, затруднено специфическими мерзлотно-грунтовыми условиями — сильной обводненностью и заторфованностью территории, наличием вечномерзлых грунтов, имеющих преимущественно островное распространение и находящихся в пластично-мерзлом состоянии.

В таких условиях особенно важное значение приобретают инженерная подготовка территории к строительству и разработка мероприятий по ее осуществлению, учитывающих специфику мерзлотно-грунтовых условий и объективные тенденции их изменения в результате застройки.

Как известно, в силу значительной сжимаемости и длительности консолидации под нагрузкой заторфованные грунты относятся к категории слабых. Площадки, сложенные торфяными грунтами, используются под строительство только в отдельных случаях, в основном после пригрузки или замены торфов более прочными минеральными грунтами, либо после проведения других мероприятий, исключающих непосредственное использование торфов естественного сложения как оснований сооружений. Видимо этим обстоятельством можно объяснить факт значительного отставания в изучении строительных свойств (деформативных, прочностных, теплофизических) заторфованных грунтов, особенно мерзлых.

Мероприятия, исключающие непосредственное использование заторфованных грунтов в качестве оснований, обходятся весьма дорого. Так, например, в районе Сургута замена 1 м^3 торфа песком стоит около 4 руб. Поэтому отказ от использования заторфованных грунтов как оснований на севере Западной Сибири, где в отдельных зонах торфяники занимают до 80% площади при мощностях до 10 м, практически невозможен. Необходима постановка детальных исследований строительных свойств заторфованных грунтов в талом и мерзлом состояниях с целью определения возможности применения их в качестве оснований зданий и сооружений.

Определение большинства из указанных строительных свойств полевыми и лабораторными методами трудоемко и связано с большими затратами времени, поэтому практическое значение имеет разработка косвенных методов, позволяющих устанавливать количественные характеристики этих свойств по формулам связи с простейшими, легкоопределимыми в лабораторных условиях физическими свойствами (например, влажностью и объемной массой).

Наличие островной вечной мерзлоты, с одной стороны, и требования главы СНиП Ц-18-76, не допускающие применения в пределах одной строительной площадки I и II принципов строительства, с другой — определяют еще одну особенность строительства на севере Западной Сибири, вызывающую необходимость дополнительных материальных затрат: необходимость приведения грунта к теплофизически однородному состоянию — талому или мерзлому.

Вечномерзлые грунты в большей части Западной Сибири относятся к категории пластично-мерзлых, обладающих повышенной деформативностью. Талые грунты, обычно заторфованные или водонасыщенные, также характеризуются высокой сжимаемостью, поэтому нуждаются в предварительном уплотнении. Это третья особенность, также приводящая к удорожанию строительства на севере Западной Сибири.

Перечисленные особенности проектирования и строительства в северных районах Западной Сибири определяют следующие три актуальных направления исследований:

изучение и систематизация данных о строительных свойствах мерзлых и талых заторфованных грунтов;

совершенствование существующих или разработка новых методов расчета температурных полей промерзающих или оттаивающих грунтов при хозяйственном освоении площадок;

разработка способов повышения несущей способности грунтов, используемых как в мерзлом, так и талом состояниях.

В предлагаемой книге изложены результаты исследований по этим направлениям, выполненные авторами в Красноярском Промстройниипроекте, и практические рекомендации, полученные на их основе. Использованы также результаты других исследований для районов со сходными климатическими и мерзлотно-грунтовыми условиями.

Введение, § 1.1-1.3 написаны авторами совместно; § 1.4, 2.2, 2.3, главы 3 и 4, § 7.1 написаны А.А. Коноваловым, § 2.1, главы 5 и 6, § 7.2, 7.3 написала Л.Т. Роман.

ГЛАВА I ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Рассматриваемая территория расположена на севере Западно-Сибирской низменности. Ее естественными рубежами являются: с востока – долина реки Енисей, с юга – южная граница распространения вечномерзлых грунтов, которая проходит примерно по 60-й параллели, с запада – Урал, с севера – Карское море.

§ 1.1. Общая климатическая характеристика, количественная оценка элементов теплового баланса

Географическое положение района определяет четко выраженную зональность в распределении тепла и влаги, что обуславливает широтный характер и последовательность чередования с севера на юг природных зон. Северную оконечность территории занимает тундра (I зона), южнее 67° с.ш. ее сменяет лесотундра (II), примерно с широты Салехарда начинается лесная зона с подзонами северотаежных III₁ (до широты Сургута) и среднетаежных (III₂) лесов [1].

В табл. 1 приведены следующие обобщенные, по данным метеостанции, показатели климатических условий севера Западной Сибири, необходимые для проектирования: продолжительность солнечного сияния t_c , сутки/год; годовые значения суммарной Q_c и поглощенной B_{II} солнечной радиации, ккал/см²; радиационный баланс за теплый период года B_T и за год B_r , ккал/см²; среднелетняя t_r , среднезимняя t_x , среднегодовая t_g , абсолютного минимума t_m температуры и продолжительность периода с отрицательными температурами воздуха t_x , сутки; среднегодовая V_r и среднезимняя V_x скорости ветра, м/с, а также основные направления ветра зимой; средняя из наибольших декадных высот h_n и среднезимняя высота

Таблица 1

Обобщенные показатели основных элементов
климата севера Западной Сибири

№ зоны	Радиационный режим					Температура воздуха						Ветер	
	τ_c	Q_c	B_n	B_r	B_r	t_r	t_x	t_d	t_m	τ_x	V_r	V_x	
I	50	40	33	21	15	6,5	-17	-10	-57	216	6,8	8 (С., С.-3.)	
II	62,5	77	42	23	17,6	8	-16,5	-7,5	-55	195	6	4,8 (С.-В., Ю.-3.)	
III1	64,6	80	49	26	21	10	-16	-5	-54	175	4,5	4,2 (Ю.-В., Ю.)	
III2	71	83	53	29	25	11	-14	-3,5	-53	151	4	4,1 (Ю.-В., Ю.-3.)	
№ зоны	Снежный покров				Осадки			Ведный режим					
	h_n	h_c	$\gamma_{сн}$	$\tau_{сн}$	τ_r	τ_x	τ_r	C_n	C_n	C_n	$C_{об}$	E	ω
I	60	28	0,27	250	23	7	30	15,3	7,2	22,5	7,5	14,7	
II	70	22	0,25	240	27	8	35	12,3	7,3	19,6	15,4	22,7	
III1	75	32	0,21	230	29	9	38	10	9,4	19,4	18,6	28	
III2	75	40	0,22	205	36	14	50	11	9	20	30	39	

снега $h_{сн}$, см, а также средняя плотность снега $\rho_{сн}$, г/см³, и продолжительность периода со снегом $\tau_{сн}$, сутки; количество осадков за теплый τ_T , холодный τ_x и годовой τ_r периоды, см; поверхностный C_H , подземный C_P , полный $C_{об}$ стоки, испарение E и валовое увлажнение $\omega = C_P + E$, см/год.

Из табл. 1 видно, что вследствие континентальности климата на исследуемой территории продолжительность солнечного сияния в годовом периоде времени довольно велика, поэтому годовые величины радиационного баланса повсеместно положительны.

Резкое изменение продолжительности дня в течение года и воздействие сухих и холодных воздушных масс вызывают большие сезонные колебания температуры воздуха и ее низкие среднегодовые значения: среднегодовая температура воздуха во всем районе не поднимается выше минус 3–4°С.

Интенсивная атмосферная циркуляция на севере является причиной сильных ветров. Как известно, при скоростях ветра, больших 4 м/с, начинается метельный снегоперенос; за Полярным кругом повторяемость метелей составляет 70–80%, между Полярным кругом и 60-й параллелью – 40÷50%. Таким образом, при строительстве необходимо считаться с возможной снеготранспортируемостью.

Плоский рельеф, наличие вечномерзлых грунтов обуславливают замедленный сток и слабый естественный дренаж подземных вод, а недостаток тепла – незначительное испарение (от 25 до 60% осадков), поэтому вся территория переувлажнена и заболочена.

Климатические условия интересуют проектировщика фундаментов прежде всего в связи с их влиянием на формирование температурного режима вечномерзлого грунта. В первом приближении, без учета геотермического градиента, влияние которого на температуру грунта в пределах верхних 10–20 м невелико, выражение для среднегодовой температуры грунта в естественных условиях $t_{ср}$ можно записать в виде [2]

$$t_{ср} = t_g + (B_r - LE) / \alpha + 0,07 A_M \sqrt{R_{сн}}, \quad (1.1)$$

здесь, кроме известных обозначений, α – коэффициент конвективного (турбулентного) теплообмена; $R_{сн}$ – термическое сопротивление снежного покрова; LE – затраты тепла на испарение; A_M – разница между экстремальными

Фактические V_{ϕ} и вычисленные $V_{в}$ по формуле (1.2) значения радиационного баланса в теплый период года, ккал/см²

Пункт	Май		Июнь		Июль		Август	
	V_{ϕ}	$V_{в}$	V_{ϕ}	$V_{в}$	V_{ϕ}	$V_{в}$	V_{ϕ}	$V_{в}$
Диксон	1,0	0,7	5,2	5,6	7,5	7,3	4,3	4,0
Тамбей	1,2	0,9	4,2	3,6	7,4	5,8	4,9	3,4
Селехард	0,9	0,9	8,4	7,0	8,7	6,1	5,4	3,9
Тарко-Сале	2,5	2,0	8,3	8,5	8,2	7,9	5,1	5,2
Сугрут	5,6	5,8	8,0	8,2	7,6	7,7	5,5	3,3
Тобольск	6,9	7,6	8,1	6,1	7,8	5,6	5,5	3,3
Курган	7,3	8,3	8,1	6,2	6,8	5,6	5,3	3,6
Омск	7,1	7,6	8,3	6,2	6,9	5,4	5,1	4,3
Барнаул	8,0	8,1	9,0	6,4	7,4	5,9	5,6	4,7

среднемесячными температурами в годовом периоде времени. Температуры грунта определяются по данным метеостанций. Инструментальные измерения радиационного баланса на большинстве сетевых метеостанций не проводятся, ограничиваются наблюдениями за приходящей солнечной радиацией. В теплотехнических расчетах величину B_r , ккал/(см²·месяц), обычно определяют косвенным путем – по ее связи с приходящей суммарной радиацией и альбедо. Анализ этой связи, по данным метеостанций Западной Сибири и ряда других пунктов, позволил установить ее вид:

$$B = Q_c (0,9 - 0,7A)^2 - 0,7, \quad (1.2)$$

Где Q_c – суммарная солнечная радиация, определяемая по данным метеостанций или расчетом по известной формуле С.И. Савинова в зависимости от облачности [3]; A – альбедо поверхности, доли единицы.

Справедливость формулы (1.2) подтверждается табл. 2, где приведены фактические и вычисленные значения B за теплый период года*; те и другие отличаются не более чем на 10%. Значения альбедо для типичных поверхностей приведены в табл. 3 [5].

При строительстве зданий и сооружений поверхность грунта экранируется от прямой солнечной радиации, поэтому важно знать ее величину, для того чтобы спрогнозировать соответствующее изменение температурного режима грунта. Систематизированные данные по составляющим суммарной солнечной радиации – прямой и рассеянной – в рассматриваемом районе имеются только для одного пункта – Салехарда [5].

Из анализа этих данных, а также данных для ряда других районов получена формула связи прямой солнечной радиации S , ккал/см², с суммарной солнечной радиацией и общей облачностью n , доли единицы:

$$S = 0,2 Q_c / (n - \sqrt{0,1n}). \quad (1.3)$$

В табл. 4 приведены фактические и вычисленные по формуле (1.3) значения прямой солнечной радиации S , ккал/см²,

* В зимний период года величина второго слагаемого в формуле (1.1) близка к нулю [4].

Альbedo некоторых поверхностей

Характеристика поверхности	Альbedo, %
Снег:	
свежевыпавший	90
плотный, слежавшийся, сухой	60
загрязненный	28
Трава:	
зеленая	21
в период увядания	28
Песок сухой:	
желтый	35
серый	21
коричневый	19
Чернозем сухой	12
Глина синяя	23
Болота:	
плоские сфагновые	15-18
гипново-травяные	11
травяные	16
лесные	12-16
Галечник:	
светло-желтый	21
подчерненный	10
Оголенный грунт:	
забеленный известью	30-50
зачерненный угольной пылью	8-9
Асфальтовое покрытие	10-20
Щебеночное покрытие	18
Бетон светло-желтый	27
Бетон светло-серый	23
Дерево, окрашенное светлой краской	40
Цемент	27
Битумная пленка:	
свеженанесенная	9
после годичной эксплуатации	15
Гравий	13

Таблица 4

Фактические S_{ϕ} и вычисленные S_{ξ} по формуле (1.3) значения прямой солнечной радиации, ккал/см²

Пункт	Апрель		Май		Июнь		Июль		Август	
	S_{ϕ}	S_{ξ}								
Салехард	3,6	3,5	5,6	5,6	7,1	6,5	8,1	7,0	3,9	4,2
Игарка	4,8	5,7	7,3	7,1	8,0	6,7	9,2	8,2	5,0	4,9
Туруханск	5,1	5,0	6,7	6,2	7,0	6,0	8,2	7,0	4,5	4,1

для ряда пунктов области с вечномерзлыми грунтами. Таблица показывает, что при расчете месячной суммарной прямой солнечной радиации по формуле (1.3) ошибка не превышает 7-10%.

Затраты тепла на испарение λE равны произведению теплоты парообразования воды ($\lambda \approx 600$ ккал/кг) на количество испарившейся влаги за данный период. Инструментальные измерения испарения воды с поверхности грунта чрезвычайно трудоемки и до конца не обработаны. Существуют разные косвенные способы определения этой величины в зависимости от других метеозаэментов, определяемых на сетевых метеостанциях [6]. На рис. 1 показан график зависимости интенсивности испарения от среднемесячных величин температуры и влажности воздуха [6].

Для получения месячных сумм тепла, затраченных на испарение, величину, взятую на графике, нужно умножить на 1,8.

Коэффициент конвективного теплообмена зависит в основном от скорости движения воздуха в приземном слое. Как показывает анализ фактического материала [4], эту зависимость можно аппроксимировать формулой

$$\alpha = 1,1 + 5,3\sqrt{V} \quad , \quad (1.4)$$

где V - скорость ветра по данным метеостанций, м/с.

Значения этого коэффициента α_1 , рассчитанные градиентным способом [7], принятым в системе гидрометеослужбы (затраты тепла на турбулентный теплообмен делятся на градиент температуры в приземном слое воздуха), и α_2 , рас-

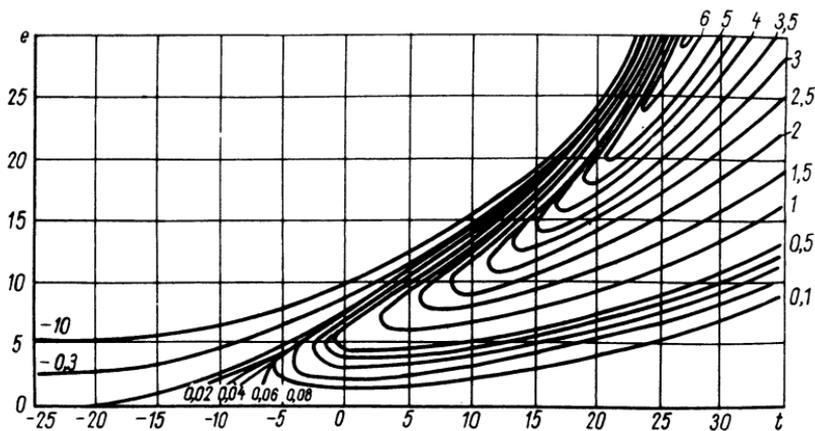


Рис. 1. Зависимость интенсивности испарения E от t , °С, и влажности e воздуха (по А.Р. Константинову, 1963 г.)

считанные по формуле (1.4) для условий Тарко-Сале, имеют следующие достаточно близкие значения:

Месяц	У	УІ	УІІ	УІІІ
α_1 , ккал/м ² ·ч·°С	13,3	17,0	14,0	13,9
α_2 , ккал/м ² ·ч·°С	12,2	13,0	11,2	11,0

Для определения теплопроводности снега $\lambda_{\text{сн}}$ обычно используются эмпирические формулы (в литературе насчитывается около десятка), связывающие эту величину с плотностью снега $\gamma_{\text{сн}}$. В геокриологических расчетах наибольшее распространение получила формула Проскуракова [8]

$$\lambda_{\text{сн}} = (0,87 \gamma_{\text{сн}} + 0,018) \cdot 1,16 \quad (1.5)$$

Сетевые метеостанции дают величину максимальной за декаду высоты снежного покрова. Переход от максимальных декадных высот к среднемесячным $h_{\text{сн}}^{\text{см}}$ осуществляется по формуле (1.6), составленной на основе предположения о линейном ходе изменения высоты снежного покрова в течение месяца:

$$h_{\text{сн}}^{\text{см}} = (h_0 + h_1 + h_2 + h_3) / 4, \quad (1.6)$$

Наименование станции	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Средняя величина $R_{сн}$
Тамбей	-	0,53	0,94	1,05	1,10	1,24	1,32	1,15	1,05
Новый Порт	-	0,78	1,00	1,28	1,20	1,27	0,95	1,10	1,07
Салехард	0,23	0,68	1,05	1,07	1,12	1,12	1,10	0,93	0,91
Уренгой	-	0,70	1,59	1,63	2,35	2,72	2,15	0,64	1,68
Надым	-	0,09	1,50	1,83	2,04	2,14	1,90	0,31	1,40
Тарко-Сале	0,38	0,10	1,58	1,85	2,90	2,70	2,06	0,52	1,52
Березово	0,17	0,10	1,76	1,41	1,95	2,14	0,67	0,09	1,00
Казым	0,11	0,09	1,82	2,36	2,30	3,14	1,35	-	1,60
Сосьва	0,21	1,26	2,12	2,50	2,96	3,30	1,53	0,40	1,78
Сартынья	0,14	0,60	0,93	1,55	2,28	2,60	1,53	0,90	1,32
Шухтуркорт	0,11	0,49	1,15	1,65	1,85	2,15	0,48	-	1,55
Сургут	0,35	0,72	1,66	2,26	2,56	2,82	1,90	0,44	1,60

где h_0 — максимальная высота снежного покрова за предыдущую декаду ($h_0 = 0$, если вычисляется высота снега за первый месяц), h_1, h_2, h_3 — максимальные высоты снежного покрова за первую, вторую и третью декады месяца.

В табл. 5 приведены значения термического сопротивления снежного покрова в некоторых пунктах исследуемого района, рассчитанные по изложенной методике при $\gamma_{\text{сн}} = 0,2 \text{ г/см}^3$.

§ 1.2. Геологическое строение, рельеф, покровные образования

Верхний ярус горных пород рассматриваемой территории представлен мощными (глубиной 2–3 км) рыхлыми мезокайнозойскими отложениями, покоящимися на жестком, кристаллическом фундаменте послегерцинской платформы. Современный рельеф и покровные образования сформировались главным образом в неогене и четвертичном периоде и в географическом распространении имеют явно выраженную широтную зональность.

На севере низменности в четвертичный период имели место морские трансгрессии, создавшие здесь рельеф ступенчатой равнины. В зоне материковых оледенений широко распространены флювиогляциальные отложения, развит холмистый грядово-моренный рельеф. В речных долинах залегают аллювиальные и озерно-аллювиальные отложения. Мощностью рыхлых четвертичных отложений достигает повсеместно около 300 м. Только вблизи Урала на поверхности территории Люлинвор — Черные Горы обнажаются морские породы эоцена (третичный период). Больше половины всей площади характеризуется высотными отметками, не превышающими 100 м над уровнем моря, 90% площади имеет уклон не более 1° .

Покровные образования представлены преимущественно морскими фашиями, однако широко распространены континентальные отложения (аллювиальные, озерно-болотные, ледниковые отложения полярного покровного комплекса). Осредненный стратиграфический разрез четвертичной толщи северной части Западной Сибири, по Г.И. Лазукову [10], дан в табл. 6.

В результате инженерных изысканий накоплено большое количество сведений о физических свойствах минеральных грунтов рассматриваемой территории, особенно для ее южной

Сводный стратиграфический разрез четвертичных отложений северной части Западной Сибири

Отдел	Горизонт	Мощность, м	Литология	Генезис отложе- ний
Голоцен	Совре- менный	5-10	Супеси, пески с растительными ос- татками, суглинка- ми	Делюви- альные, мор- ские, озер- но-болотные, покровные
	Сартан- ский	5-8	Пески, реже су- глинки	
	Картин- ский	5-10	Пески с просло- ями и линзами тор- фа, реже супеси	
	Зырян- ский	10-15	Пески с редкой галькой, линзами торфа и суглинка	
Плейсто- цен	Казан- цев- ский	50-90	Пески с прослой- ками торфа, редкой галькой и гравием Суглинки осколь- чатые с галькой Глины с ленточ- ной слоистостью	Морские
	Ямальс- кая се- рия	150-200	Суглинки осколь- чатые горизонталь- но-слоистые с гра- вием, галькой и ва- лунами Глины отсортиро- ванные с ленточной слоистостью Супеси горизон- тально-слоистые с галькой и гравием	Морские и ледни- ково-мор- ские

Характеристики физико-механических свойств грунтов
Среднего Приобья

Геологический комплекс	Виды грунтов	Плотность, г/см ³	Объемная масса, г/см ³	Коэффициент пористости ϵ , доли единицы	Пределы пластичности	
					W_L	W_P
Аллювиальные отложения: пойменных террас	Пески	2,65-2,67	1,56-1,89	0,57-0,96	-	-
	Супеси	2,66-2,71	1,49-1,79	0,71-0,93	0,18-0,22	0,15-0,19
	Суглинки	2,67-2,72	1,56-1,82	0,62-1,11	0,29-0,48	0,18-0,30
	Глины	2,67-2,71	1,78-1,95	0,55-1,39	0,48-0,49	0,20-0,31
I надпойменных террас	Пески	2,65-2,68	1,53-1,83	0,53-0,96	-	-
	Супеси	2,57-2,71	1,53-1,87	0,51-0,92	0,18-0,24	0,17-0,19
	Суглинки	2,61-2,72	1,46-1,93	0,49-1,11	0,28-0,41	0,18-0,27
	Глины	2,69-2,73	1,66-1,85	0,89-1,22	0,38-0,49	0,20-0,29
II надпойменных террас	Пески	2,65-2,68	1,58-1,90	0,48-0,88	-	-
	Супеси	2,66-2,69	1,61-1,73	0,59-0,81	0,18-0,22	0,14-0,17
	Суглинки	2,67-2,71	1,70-2,01	0,55-0,92	0,23-0,36	0,14-0,21
	Глины	2,68-2,72	1,59-1,85	0,58-1,00	0,37-0,42	0,19-0,25
III надпойменных террас	Пески	2,65-2,67	1,57-1,75	0,61-0,84	-	-
	Супеси	2,64-2,68	1,52-1,86	0,51-0,89	0,16-0,22	0,14-0,18
	Суглинки	2,65-2,71	1,68-1,95	0,69-1,13	0,25-0,36	0,15-0,22
	Глины	2,67-2,72	1,67-1,94	0,78-1,16	0,37-0,42	0,19-0,23

Водно-ледни-	Пески	2,64-2,70	1,51-1,78	0,63-0,81	-	-
ковые отложе-	Супеси	2,63-2,66	1,65-1,78	0,54-0,82	0,20-0,21	0,17-0,19
ния	Суглинки	2,65-2,73	1,69-2,04	0,49-0,92	0,25-0,36	0,16-0,23
	Глины	2,68-2,71	1,70-1,92	0,77-0,93	0,39-0,45	0,21-0,24
Ледниковые от-	Пески	2,65-2,67	1,53-1,68	0,55-0,89	-	-
ложения	Супеси	2,63-2,69	1,47-1,78	0,56-0,91	0,18-0,20	0,17-0,19
	Суглинки	2,66-2,73	1,69-2,07	0,51-1,01	0,24-0,33	0,17-0,24
	Глины	2,68-2,75	1,70-2,12	0,55-0,94	0,36-0,48	0,17-0,22

Продолжение табл. 7

Геологический комплекс	Виды грунтов	Консистенция J_2 доли единицы	Влажность W доли единицы	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, $O,1$ МПа	Компрессионный модуль деформации, $O,1$ МПа
Аллювиальные отложения; пойменных террас	Пески	-	0,14-0,32	32-35	0,040-0,160	50-108
	Супеси	1,00	0,28-0,47	16-21	0,065-0,225	35-80
	Суглинки	0,51-1,65	0,32-0,57	18-22	0,085-0,200	29-79
	Глины	0,49-1,82	0,35-0,65	7-20	0,088-0,200	7-65
I напойменных террас	Пески	-	0,10-0,27	30-32	0,100-0,220	105-245
	Супеси	-2,5-2,20	0,12-0,35	19-26	0,065-0,226	34-94
	Суглинки	-0,3-1,10	0,14-0,47	17-24	0,045-0,325	29-91
	Глины	0,35-0,79	0,24-0,45	21-27	0,050-0,137	42-87

Геологический комплекс	Виды грунтов	Консистенция J_1 , доли единицы	Влажность W , доли единицы	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, О,1 МПа	Компрессионный модуль деформации, О,1 МПа
II надпойменных террас	Пески	-	0,04-0,23	30-35	0,080-0,230	125-285
	Супеси	-2,1-1,31	0,07-0,29	22-24	0,100-0,250	65-105
	Суглинки	-0,6-1,20	0,14-0,31	21-26	0,050-0,400	40-110
	Глины	0,50-1,04	0,25-0,44	16-19	0,110-0,220	45-90
III надпойменных террас	Пески	-	0,08-0,14	26-32	0,070-0,180	185-265
	Супеси	0,24-0,82	0,13-0,30	20-24	0,082-0,180	47-104
	Суглинки	-0,27-1,21	0,20-0,36	21-27	0,050-0,250	35-90
	Глины	0,35-1,08	0,33-0,42	17-22	0,110-0,150	35-77
Водно-ледниковые отложения	Пески	-	0,09-0,20	30-34	0,120-0,160	80-100
	Супеси	-1,0-2,50	0,11-0,31	17-25	0,050-0,200	55-175
	Суглинки	-0,1-0,65	0,14-0,28	18-24	0,050-0,225	50-91
	Глины	0,15-0,63	0,22-0,38	18-22	0,125-0,245	44-120
Ледниковые отложения	Пески	-	0,05-0,22	30-38	0,080-0,180	80-256
	Супеси	-2,8-3,30	0,10-0,29	20-27	0,085-0,240	55-135
	Суглинки	-0,5-0,95	0,13-0,27	18-27	0,050-0,250	50-150
	Глины	0,00-0,63	0,19-0,32	15-31	0,185-0,350	45-95

части. В табл. 7 представлены обобщенные характеристики физико-механических свойств грунтов Среднего Приобья [12]. Физико-механические свойства торфяных грунтов подробно освещаются в гл. 2.

Заторфованность района в отдельных зонах достигает 70%. Наиболее благоприятными условиями торфообразования являются избыток увлажнения и теплое лето, поэтому мощность торфяных залежей увеличивается с севера на юг. Низинные торфяники в зоне тундры сменяются верховыми в зоне тайги. На исследуемой территории Н.Я. Кац [11] выделяет следующие болотно-торфяные комплексы:

1. В зоне I сосредоточены арктические тундровые минерально-осоковые болота. Суровый климат не способствует торфонакоплению. Мощность современных торфяных залежей 25-30 см.

2. В зоне II развиты плоскобугристые торфяники. Покровный комплекс состоит из мокрых низин (мочажин) и сухих торфяных бугров: высота бугров 30-50 см (реже 70 см), площадь от одного до нескольких сотен квадратных метров, форма круглая, реже вытянутая, грядообразная. Торфяные бугры в настоящее время не нарастают, а часто деградируют. Торф нарастает в мочажинах, где мягкий микроклимат.

3. В зоне III развиты крупнобугристые торфяники и выпуклые грядо-мочажные болота. Высота торфяных бугров 1,5-2,5 м (максимальная 11 м), площадь - до нескольких квадратных километров. В основании бугра часто залегает мерзлое минеральное ядро. В мочажинах мерзлота отсутствует вследствие перевевания снега с бугров в мочажины. Ветровая эрозия разрушает торфяные бугры, а на периферийных участках, куда стекает значительное количество воды, происходит их разрастание.

§ 1.3. Геокриологические условия

Особенности современной геокриологической обстановки севера Западной Сибири обусловлены в основном двумя факторами:

1) неоднократной сменой холодных и теплых эпох на ее территории в четвертичный период, когда происходило основное образование покровного комплекса;

2) расположением северной части низменности долгое время под уровнем моря.

Геокриологические условия рассматриваемого района подчиняются закону широтной географической зональности. По мерзлотному признаку на территории Западной Сибири выделяют [9] три зоны (рис. 2).

I. В тундре и лесотундре вечномерзлые породы имеют сплошное распространение с поверхности и по глубине, их мощность увеличивается от 250–300 м на широте Полярного круга до 500–550 м – на 70° с.ш.

II. К югу от Полярного круга примерно до широты 63° вечномерзлые грунты имеют двуслойное строение. Верхний слой прослеживается до глубины 30–80 м, в интервале глубин (30–80)–150 м располагаются талые грунты, подстилаемые вторым слоем мерзлого грунта мощностью до 200–300 м. Второй слой вечномерзлого грунта считают реликтовым, оставшимся от холодной эпохи, предшествовавшей климатическому оптимуму в конце плейстоцента. При последующем похолодании слой грунта промерз до глубины 30–80 м.

III. В более южных районах (от 63 до 60,5° с.ш.) сохранился только нижний слой вечномерзлого грунта. Кровля его залегает на глубине 150–230 м, а подошва опускается до 400–500 м.

Южнее Полярного круга вечномерзлые грунты с поверхности имеют несплошное распространение. До 65° с.ш. они занимают более 50% площади и расположены большей частью на междуречьях, а в зоне тайги – приурочены к безлесным торфяникам.

Криогенное строение вечномерзлых грунтов связано с условиями их образования. На территории севернее 68–69° с.ш. распространен сингенетический тип вечномерзлой толщи (грунты промерзли одновременно с их отложением). По разрезу они характеризуются высокой льдистостью (0,6–0,8 для торфов и 0,4–0,5 для песков и супесей), слоистой, сетчатой текстурой, наличием ктупных жил льда. При оттаивании сингенетически промерзших грунтов возможны осадки до 50–80 см/м. Южнее 68–69° с.ш. вечномерзлые грунты относятся к эпигенетическому типу (промерзли после отложения). Их структура зависит от состава и генезиса, но в целом льдистость эпигенетически промерзших грунтов меньше, чем сингенетических, и, следовательно, их осадки при оттаивании будут менее значительными.

Температурный режим вечномерзлых грунтов определяется зональными (климат, растительность и т.п.) факторами.

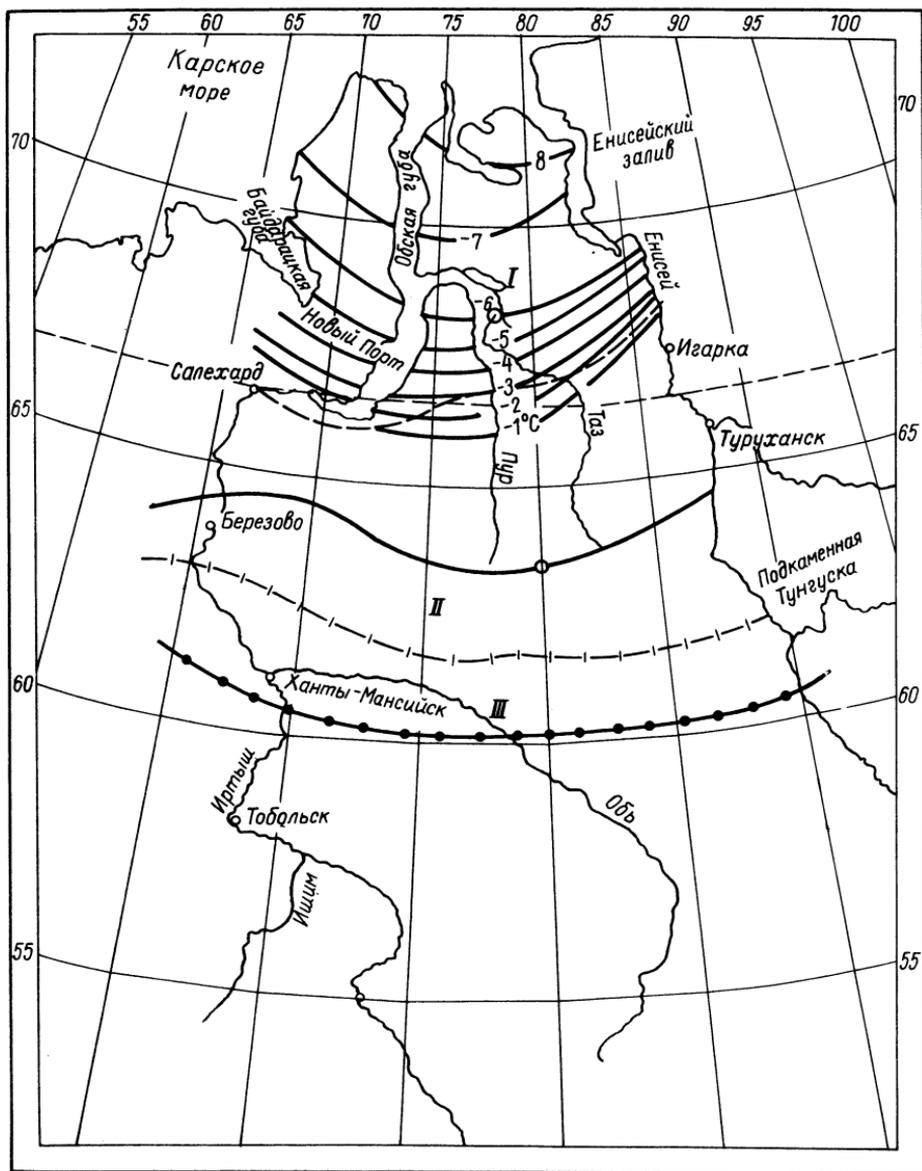


Рис. 2. Изотермы грунта на подошве слоя с сезонными колебаниями температур

— -1°C — изотермы; - - - — южная граница области сплошного распространения вечномерзлых грунтов; - / - / то же, островного распространения вечномерзлых грунтов; —•—•—•— — то же, реликтовой мерзлоты

Как видно из схематической карты на рис. 2, температура грунтов на уровне нулевых годовых амплитуд повышается с севера до 65° с.ш. от минус 8 до минус 1°C . Южнее вечномерзлые грунты находятся в пластично-мерзлом состоянии и имеют температуру около 0°C .

Большое влияние на температурный режим грунтов оказывает снежный покров, местами однозначно определяя существование вечной мерзлоты. Величина утепляющего воздействия снега доходит до $3-4^{\circ}\text{C}$. В районах с таким значением среднегодовой температуры вечномерзлые грунты распространены на свободных от снега участках.

Глубина сезонного оттаивания в естественных условиях увеличивается с севера на юг. Максимальные ее значения ($2-3$ м) наблюдаются в песчаных грунтах, минимальные ($0,2-0,3$) — в торфах. Глубина сезонного промерзания благодаря большой толщине снежного покрова в общем невелика и редко превышает $2-2,5$ м для песков и 1 м для торфяников.

§ 1.4. Закономерности изменения температурного режима в слое с сезонными колебаниями температуры и методика расчета его параметров

Температурный режим вечномерзлого грунта в слое с сезонными колебаниями зависит от характера годового хода температур на подошве деятельного слоя, определяемого годовым ходом температуры на дневной поверхности, режимом снегоотложения и тепловыми процессами, протекающими при промерзании — оттаивании грунта деятельного слоя.

Как показывают многочисленные данные натурных наблюдений, сезонные изменения температур у поверхности грунта $t_{\text{пов}}$ имеют периодический характер и аппроксимируются выражением

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{ср}} + A_0 \cos \frac{2\pi\tau}{\tau_r}, \quad (1.7)$$

где $t_{\text{ср}}$ — среднегодовая температура; A_0 — амплитуда колебаний температуры (абсолютная величина разницы между максимальной и среднегодовой — $A_{\text{от}}$ или минимальной и среднегодовой — $A_{\text{ох}}$ температурами поверхности; при строго периодическом характере колебаний $A_{\text{ох}} = A_{\text{от}}$); τ_r —

период колебаний, равный году; τ — время, отсчитываемое с момента наступления максимума температуры (как правило, с середины июля).

Если граничное условие на поверхности задано гармонической функцией типа (1.7), то температурное поле пространства ($y > 0$) без изоляции и при отсутствии фазовых превращений грунтовой влаги можно представить [31] в виде

$$t = t_{cr} + A_0 \exp(-D) \cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_r} - D\right), \quad (1.8)$$

где $D = y \sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_r}}$ — декремент затухания; a — коэффициент температуропроводности.

Приведем ряд уравнений, вытекающих из (1.8), которые понадобятся в последующем.

При значениях косинуса, равных ± 1 , получаем выражения для экстремальных значений температуры — максимальной и минимальной.

$$t_{\text{эк.}} = t_{cr} \pm A_0 e^{-D} \quad (1.9)$$

Косинус равен ± 1 , если его аргумент соответственно 0 и π . С учетом этого условия для времени наступления максимума и минимума температуры соответственно имеем

$$\tau_{\text{max}} = D\tau_r / 2\pi, \quad (1.10)$$

$$\tau_{\text{min}} = 0,5 + D\tau_r / 2\pi. \quad (1.11)$$

Из (1.10) можно получить выражение зависимости амплитуды колебаний температуры от глубины

$$A = A_0 e^{-D} \quad (1.12)$$

Если время отсчитывать от максимума температуры на данном уровне и брать в расчет амплитуды колебаний на этом же уровне, то формула (1.8) сведется к виду (1.7).

В.А. Кудрявцевым, В.В. Докучаевым и др. [21, 37] показана принципиальная возможность использования приведенного математического аппарата гармонических колебаний для оценки температурного режима грунта ниже деятельного слоя в реальных условиях.

Очевидно, следует ввести в приведенные формулы коррективы, учитывающие нарушения гармоничности колебаний температуры грунта в годовом цикле, вызванные прежде всего

фазовыми переходами грунтовой влаги и наличием снежного покрова. Кроме того, необходимо разработать оперативную методику определения температуры в деятельном слое (в настоящее время этот вопрос решен только в отношении минимальных температур).

Проанализируем фактический материал [4,5], обработанный в виде графиков распределения экстремальных и среднегодовых температур по глубине (рис. 3), а также хода температур на разных глубинах во времени (рис. 4).

Анализ этого материала показывает следующее. Теплозащитные свойства снежного покрова обуславливают сдвиг во времени минимума температуры на поверхности грунта в сторону положительных температур. Поскольку время наступления максимума температуры не изменяется, это вызывает уменьшение периода нагрева τ_H (продолжительность времени между максимумом и минимумом температуры) и, соответственно, увеличение периода охлаждения $\tau_{ох}$, а также превышение $A_{от}$ над $A_{ох}$.

Деятельный слой с происходящими в нем фазовыми превращениями влаги оказывает на нижележащие толщи грунта действие, в общем аналогичное (в плане нарушения гармоничности колебаний) действию снежного покрова. Разница в том, что при сезонном промерзании ($t_{cr} > 0$) период с фазовыми превращениями в теплое время года меньше, чем в холодное, поэтому, как и в случае со снежным покровом, $\tau_{ох} > \tau_H$, $A_{от} > A_{ох}$; при сезонном же оттаивании период с фазовыми превращениями меньше в холодное время года, тогда наоборот $\tau_{ох} < \tau_H$; $A_{от} < A_{ох}$.

Совместное влияние рассмотренных эффектов воздействия на грунт снежного покрова и фазовых переходов таково, что при сезонном промерзании они складываются друг с другом, и нарушение гармоничности колебаний температуры увеличивается. При сезонном оттаивании действие этих эффектов компенсируется друг другом и характер колебаний становится близким к гармоническому.

Анализ наблюдений показывает, что разность между периодами охлаждения и нагрева $\Delta_c = \tau_{ох} - \tau_H$, обусловленная влиянием снежного покрова в общем невелика: в среднем она составляет около 0,5 месяца и редко превышает 1 месяц.

Разность между периодами охлаждения и нагрева $\Delta_\phi = [\tau_{ох}(\xi) - \tau_H(\xi)]$, обусловленная влиянием фазовых переходов влаги, в пределах деятельного слоя увеличивается с глуби-

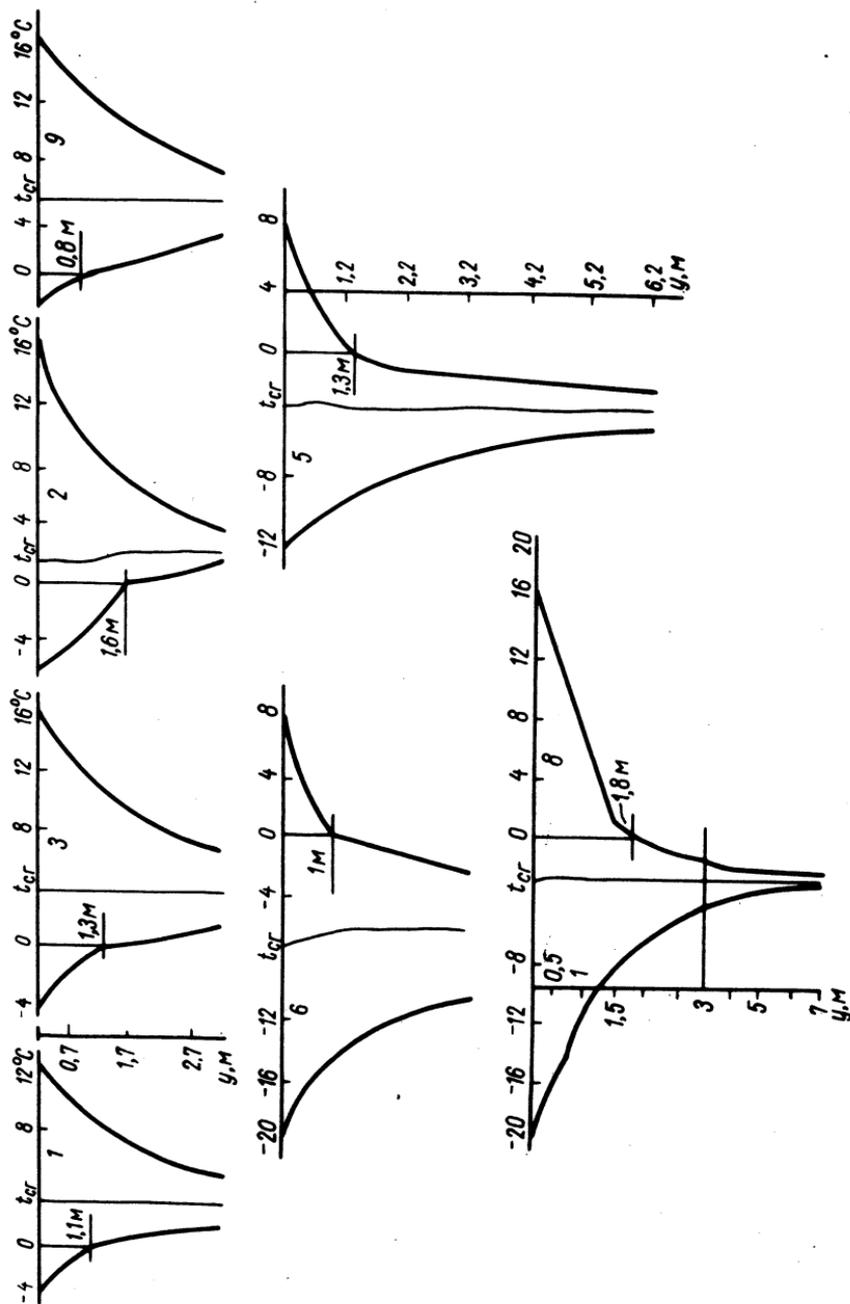


Рис. 3. Примеры распределения экстремальных температур по глубине (нумерация пунктов по табл. 8)

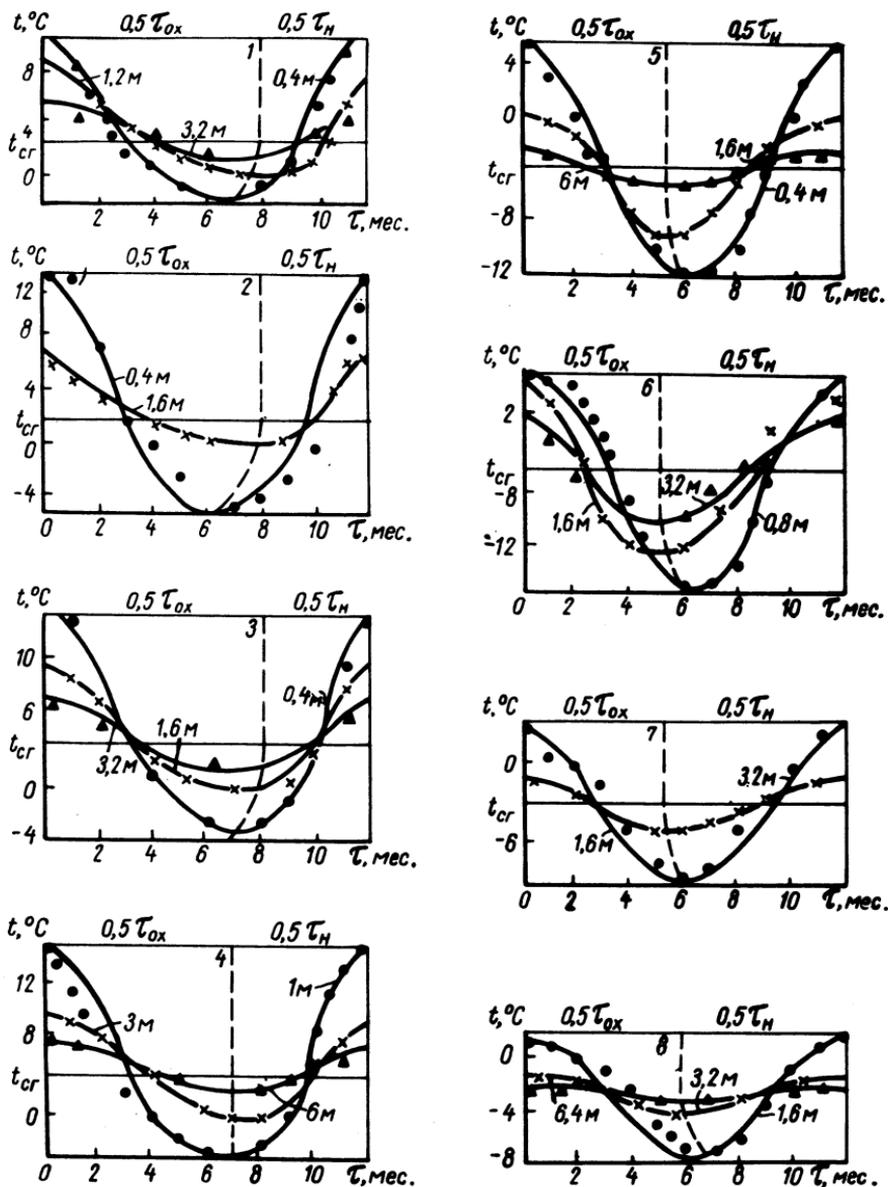


Рис. 4. Годовой ход температуры грунта (нумерация пунктов по табл. 8)

ной. На подошве последнего (глубина фазовой изотермы $\xi = h_g$) величина $\Delta\phi$ достигает своего максимального значения, которое, в частности для случая сезонного про-

мерзания, равно разнице между продолжительностью холодного времени года τ_x и теплого, в течение которого происходят фазовые переходы грунтовой влаги, $\tau_{\tau\phi}$.

Выражая градусо-часы на поверхности в теплый и холодный периоды года как $t_{\tau}\tau_{\tau}$ и $t_x\tau_x$ (t_{τ} и t_x — средние температуры за времена года с положительными и отрицательными температурами поверхности) и учитывая равенство

$$-t_x\tau_x\lambda_M = t_{\tau}\tau_{\tau\phi}\lambda_{\tau}, \quad (1.13)$$

после несложных преобразований имеем

$$\Delta_{\phi} = \tau_x \left[1 + t_x \lambda_M / (t_{\tau} \lambda_{\tau}) \right] \quad (1.14)$$

и

$$\tau_{ox} = 0,5\tau_r + 0,5\Delta_{\phi}. \quad (1.15)$$

Таким же образом получаем выражения для Δ_{ϕ} , τ_{ox} и продолжительности цикла нагрева τ_H на подошве деятельного слоя для случая сезонного оттаивания:

$$\Delta_{\phi} = \tau_{\tau} \left[1 + t_{\tau} \lambda_{\tau} / (t_x \lambda_M) \right], \quad (1.16)$$

$$\tau_{ox} = 0,5\tau_r - 0,5\Delta_{\phi} \quad (1.17)$$

и

$$\tau_H = \tau_r - \tau_{ox}. \quad (1.18)$$

В табл. 8 (столбцы 5–9) приведены исходные данные расчета, а также вычисленные с помощью приведенных формул (при $\lambda_M/\lambda_{\tau} = 1,2$) и наблюдавшиеся значения продолжительности циклов охлаждения (τ_{ox}^o и τ_{ox}^H) грунта на подошве деятельного слоя в различных районах СССР.

Из таблицы видна хорошая сходимость вычисленных и фактических данных. Некоторое общее уменьшение вычисленных значений τ_{ox} по сравнению с фактическими связано с недоучетом в расчетах величин Δ_c .

Значения τ_{ox} и τ_H выше подошвы деятельного слоя также можно найти по формулам (1.14)–(1.18), подставив в них вместо τ_x или τ_{τ} время, за которое фазовая изотерма достигает данной глубины, соответственно при промерзании или оттаивании грунта. Ниже подошвы деятельного слоя значения τ_{ox} и τ_H практически постоянны по глубине.

Ход по глубине минимальных температур при сезонном оттаивании и максимальных — при сезонном промерзании хо-

Таблица 8

Нумерация пунктов, исходные данные, а также наблюдавшиеся (Н) и вычисленные (В) значения t_{ox} , t_{max} , t_{min} , месяцы, на подошве деятельного слоя

№ п.п.	Пункт	Вид грунта	$t_{сг}$	t_x	t_x	t_T	t_{ox}^B	t_{ox}^H	t_{max}^B	t_{max}^H	t_{min}^B	t_{min}^H
1.	Березово	Суглинок	2,9	5,5	-1,8	6,9	8,0	8,0	0,6	1,0	8,8	9,0
2.	Туруханск	"	2,0	7,0	-3,1	9,0	8,3	8,0	2,3	2,0	11,3	10,0
3.	Няксимволь	"	3,6	6,0	-2,7	9,3	8,0	8,0	1,2	1,0	9,4	9,0
4.	Загорск	"	5,2	5,0	-2,3	10,7	8,0	8,0	1,3	1,0	9,0	9,0
5.	Среднеколымск	Глина	-3,7	8,0	-9,5	5,9	5,2	5,5	2,6	3,0	7,0	8,5
6.	Делянкир	Песок	-6,0	8,0	-13,5	5,5	4,8	5,0	2,2	3,0	6,0	8,0
7.	Покровск	Суглинок	-3,0	7,0	-16,7	11,6	5,2	5,5	4,3	3,5	8,3	9,0
8.	Якутск	Песок	-2,8	7,0	-12,8	11,6	5,8	5,5	4,0	3,5	9,3	9,0
9.	Васисс	Суглинок	5,2	5,0	-0,8	9,4	8,2	7,5	0,8	10	8,8	8,5

Примечание. Фактические данные по Загорску заимствованы у А.В. Павлова [4], по остальным пунктам — из справочников по климату СССР.

рошо описывается формулой (1.8), если вместо τ_r под-
 ставить $2\tau_H$ при расчете максимальных и $2\tau_{ох}$ при
 расчете минимальных температур.

За основное выражение для определения хода экстремаль-
 ных температур $t_{эк}$ по глубине с переходом через
 температуру начала замерзания $\approx 0^\circ\text{C}$ (минимальных при се-
 зонном промерзании и максимальных при сезонном оттаива-
 нии) также примем формулу (1.8) с $2\tau_H$ или $2\tau_{ох}$
 вместо τ_r , но учтем следующие граничные условия:

$$t_{эк}(0) = t_{ср} \pm A_0; \quad t_{эк}(h_g) = 0; \quad t_{эк}(\infty) = t_{ср}.$$

В результате для зоны грунта, находящейся выше фазовой
 изотермы, (первой) имеем

$$t_{эк} = t_{эк}(0) \left[1 - \frac{1 - \exp(-D_1)}{1 - \exp(-D_{\Phi_1})} \right]. \quad (1.19)$$

Для второй зоны, находящейся ниже фазовой изотермы,

$$t_{эк} = t_{ср} \left[1 - \frac{\exp(-D_2)}{\exp(-D_{\Phi_2})} \right], \quad (1.20)$$

где

$$D_1 = y \sqrt{\frac{\pi}{a_1 \tau_r}}, \quad D_{\Phi_1} = h_g \sqrt{\frac{\pi}{a_1 \tau_r}}, \quad D_2 = y \sqrt{\frac{\pi}{a_2 \tau_r}}, \quad D_{\Phi_2} = h_g \sqrt{\frac{\pi}{a_2 \tau_r}}.$$

Справедливость формул (1.19)–(1.20) подтверждается
 графиками, изображенными на рис. 3 для Березово и Нья-
 символя, на которых кривые хода экстремальных температур
 вычислены по этим формулам при инструментально опреде-
 ленных значениях теплофизических характеристик, а точками
 отмечены фактические данные.

Во многих прикладных задачах, помимо экстремальных тем-
 ператур, необходимо знать ход температур во времени. Рас-
 четы показали, что время наступления максимума и миниму-
 ма температуры мало отличается от такового при строго гармо-
 ническом характере колебаний температуры, если в формулы
 для их расчета (1.10)–(1.11), также как и в предыдущем слу-
 чае, вместо τ_r подставлять $2\tau_H$ при определении времени
 наступления максимума на данной глубине и $\tau_{ох}$ – ми-
 нимума.

Сказанное иллюстрируется данными табл. 9, в которой
 приведено наблюдавшееся (Н) и вычисленное (В) указанным
 способом время наступления экстремальных температур, счи-

Время наступления максимума и минимума на разных глубинах в Березово и Няксимволе

Значения τ	Березово		Няксимволь			
	$y=0,4$ м	$y=h_g$	$y=3,2$ м	$y=0,4$ м	$y=h_g$	$y=3$,
τ_{max}^H	0	0,5	2	0	1	2
τ_{max}^B	0,2	0,6	1,6	0,3	1,2	2,4
τ_{min}^H	7	9	10	7	9	10
τ_{min}^B	8,1	8,8	10,3	8,2	9,4	11

тая от максимума на поверхности, на разных отметках на метеоплощадках в Березово и Няксимволе.

Таким образом, для расчета температуры грунта на любой глубине можно использовать формулу вида (1.7), предварительно вычислив значения экстремальных температур и время их наступления по изложенной методике, подставляя в нее вместо τ_r , τ_H при расчете температур в цикле нагрева (хода температур от минимума и максимума) и τ_{ox} в цикле охлаждения, а вместо A_o — величину $A_{от}$ при расчете температур на отрезках времени, составляющих половины τ_H и τ_{ox} , примыкающих к максимуму, и $A_{ох}$ на отрезках времени, составляющих вторые половины τ_H и τ_{ox} , примыкающих к минимуму. Результаты такого расчета, а также фактический ход температур на разных глубинах приведены на рис. 4. Эти графики также иллюстрируют удовлетворительное (увеличивающееся с глубиной) совпадение вычисленных и наблюдавшихся величин.

Вследствие неравенства теплофизических характеристик грунта в слое сезонного оттаивания в талом и мерзлом состояниях среднегодовая температура на подошве этого слоя отличается от среднегодовой температуры поверхности.

Г.В. Порхаев [31] предлагает следующее выражение для определения среднегодовой температуры подошвы слоя сезонного оттаивания:

$$t_{cr} = \frac{\omega_3 + \omega_4 \frac{\lambda_r}{\lambda_m}}{\tau_r}, \quad (1.21)$$

где ω_3 и ω_4 — суммы градусо-часов поверхности в зимнее и летнее время.

Формула (1.21) соответствует случаю, когда летние градусо-часы полностью "расходуются" в слое сезонного оттаивания, т.е. ниже подошвы этого слоя положительные температуры, отличные от нуля, не проникают, а зимние градусо-часы частично расходуются в слое сезонного оттаивания (в течение периода промерзания этого слоя), а частично идут на понижение температуры грунта (от нуля и ниже), подстилающего слой сезонного оттаивания. На всех других отметках выше подошвы слоя сезонного оттаивания расходуются не все летние градусо-часы, а только их часть, соответствующая периоду времени, в течение которого нулевая изотерма достигает данной отметки. Поэтому в более общем виде формулу для среднегодовых температур в слое сезонного оттаивания можно записать:

$$t_{cr}(\xi) = \frac{\omega_z + (\omega_{or} \frac{\lambda_T}{\lambda_m} + \omega'_l)}{\tau_r}, \quad (1.22)$$

где ω_{cr} - сумма градусо-часов на поверхности грунта за период, в течение которого оттаивает слой заданной мощности; ω'_l - сумма градусо-часов за время от конца оттаивания данного слоя до конца летнего периода.

По формуле (1.12) можно найти приближенное выражение для мощности слоя с сезонными колебаниями температур H_0 при любой заданной точности измерения температуры грунта, например $-0,1^\circ\text{C}$. Подставив в (1.12) величины $A_y = 0,1$ и $A_0 = -t_{cr}$, после преобразования получим

$$H_0 = h_g + 50\sqrt{\alpha} (\epsilon_n |t_{cr}| + 2,3). \quad (1.23)$$

Из приведенных выше формул видно, что основными определяющими параметрами температурного режима грунта являются его среднегодовая температура и глубина слоя сезонного оттаивания или промерзания. Если эти параметры, а также показатели теплофизических свойств грунта установлены, то его температуру как функцию глубины и времени в большинстве случаев можно найти расчетным путем, избегая трудоемких и длительных полевых наблюдений. Среднегодовую температуру грунта допускается принимать равной температуре на глубине 10 м, найденной разовым замером в любое время года.

Вопросу определения глубины слоя сезонного оттаивания и промерзания посвящены работы [4, 31, 37, 38]. В главе 4 настоящей книги приведены схематические карты рас-

пределения глубин деятельного слоя (максимальной глубины слоя сезонного оттаивания или промерзания) на территории Западной Сибири, построенные с использованием общепринятых методов определения этой величины. Отметим, что глубину деятельного слоя можно определить также с помощью впервые здесь приведенных формул (1.14) - (1.16) из уравнения теплового баланса на подошве этого слоя в момент достижения ее нулевой изотермой:

$$\left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} - \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \right) \tau_T = Q_\Phi h_g, \quad (1.24)$$

где $\frac{\partial t}{\partial y}$ и $\frac{\partial t_2}{\partial y}$ - производные температуры по глубине при $y = h_g$; $Q_\Phi = \rho \gamma'_{ск} (W_c - W_H)$ - затраты тепла на фазовые переходы воды; ρ - удельная теплота кристаллизации воды; $\gamma'_{ск}$ - объемная масса скелета грунта; W_c - суммарная влажность; W_H - влажность за счет незамерзающей воды; λ_1 и λ_2 - коэффициенты теплопроводности грунта выше и ниже фазовой изотермы.

Подставив (1.14) и (1.15) в (1.24) после преобразования получаем формулу (1.25), используя которую можно найти глубину деятельного слоя:

$$\theta_\Phi = \frac{1 - [\exp(D_{\Phi_1} - 1)] D_{\Phi_1} \Phi}{1 + [\exp(D_{\Phi_1} - 1)] \sqrt{\frac{\lambda_2 C_2}{\lambda_1 C_1}}}, \quad (1.25)$$

где

$$\theta_\Phi = \frac{0 - t_{cr}}{t_{эк}(0) - t_{cr}}; \quad \Phi = \frac{\theta_\Phi \tau_i}{C_1 A_0 \pi \tau_i};$$

C_1, C_2 - истинные объемные теплоемкости в верхней и нижней зонах; τ_i - продолжительность теплого периода года при определении слоя сезонного оттаивания или длительность холодного - при определении слоя сезонного промерзания.

В табл. 10 приведены результаты вычислений по формуле (1.25) для случая с одинаковыми теплофизическими константами в обеих зонах.

Для примера рассчитаем максимальную за год глубину промерзания на площадке метеостанции в Березово, где $A_0 = \pm 8^\circ\text{C}$, $t_x = 5,5$ мес: $t_{cr} = 2,9^\circ\text{C}$, $\gamma'_{ск} = 1380 \text{ кг/м}^3$; $W_c - W_H = 0,19$; $\lambda_M = 1,2 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{C)}$; $C_M = 444 \text{ ккал/(м}^3\text{C)}$.

Соответственно имеем:

$$\theta_\Phi = \frac{0 - 2,9}{-8} = 0,36; \quad \Phi = \frac{80 \cdot 1380 \cdot 8760 \cdot 0,19}{444 \cdot 8 \cdot 3,14 \cdot 5,720} = 4,2 \approx 4.$$

Значения θ_{φ} при разных ψ и D

D	При ψ равной					
	0	0,5	1	2	4	10
0	1	1	1	1	1	1
0,25	0,78	0,75	0,71	0,68	0,57	0,22
0,40	0,68	0,60	0,55	0,44	0,16	-
0,60	0,55	0,40	0,48	0	-	-
0,80	0,46	0,22	0	-	-	-
1,1	0,35	0	-	-	-	-

По табл. 10 с помощью интерполяции находим величину D , соответствующую $\theta_{\varphi} = 0,36$ и $\psi = 4$; она равна $D = 1,1$ м. Глубина деятельного слоя на этой площадке, по данным наблюдений, равна 1,1 м, т.е. вычисленная величина h_g вполне удовлетворительно сходится с фактической.

$$h_g = \sqrt{\frac{3,14}{0,0026 \cdot 8760}} = 0,35$$

ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАТОРФОВАННЫХ И ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

§ 2.1. Основные показатели физических свойств

Торф — органогенная порода, представляющая собой скопление остатков растений, подвергшихся неполному разложению в условиях избыточной влажности и затрудненного доступа воздуха.

В болотоведении и торфяной промышленности применяется геоботаническая классификация торфа [13], согласно которой по морфологическому признаку торфы подразделяются на три типа: низинный, переходный, верховой. Низинные торфы развиваются преимущественно в отрицательных формах релье-

ефа, на осоково-гипновых болотах, характеризуются не-большой мощностью залежи (до 40-50 см), в условиях которой растения-торфообразователи не утрачивают связи с минеральным грунтом и получают питание снизу через корневую систему. С нарастанием торфяной залежи связь растительности с минеральным грунтом прерывается, на поверхности торфяника меняются растительные ассоциации, наибольшее распространение получает сфагновый мох, для существования которого достаточен минимум минеральных солей, получаемый с атмосферной влагой и пылью; низинная торфяная залежь превращается в переходную, а затем в верховую.

В пределах каждого типа торфа в зависимости от ботанического состава выделяются подтипы, группы и виды. Как видно из табл. 11 [13], в пределах каждого типа торфа его виды характеризуются определенной влажностью и степенью разложения: от древесных торфов к моховым показатель влажности возрастает, а показатель степени разложения снижается. Таким образом, влажность и степень разложения являются основными типологическими характеристиками торфа.

А.И. Сергеев [14] считает целесообразным выделять типы торфа в зависимости от среды, в которой происходило торфонакопление (озерный, болотный, аллювиально-болотный), а геоботанические условия образования принять в качестве определяющих фаций торфа (верховую, переходную, низинную). С таких позиций им обобщены физические свойства торфов центральной части Западной Сибири (табл. 12).

Степень разложения характеризует содержание гумуса и механическую раздробленность структурных элементов. Она обусловлена торфообразовательным процессом, при котором происходит физический распад растений и химическое изменение состава. Определяющим фактором при этом является комплекс условий, сопутствующий процессу формирования торфяной залежи и зависящий от климатических условий периода, в течение которого происходило отложение торфа, и от характера растений-торфообразователей. При высокой температуре микробиологический процесс распада протекает более энергично и степень разложения выше. В условиях сурового климата отлагается торф малой степени разложения.

Травяные и сфагновые торфы имеют меньшую степень разложения, чем ольховые и березовые, так как обладают большей стойкостью к микробиологическому воздействию. Отор-

Подтип, Группа	Лесо-топяной		Топяной		Золь- ность, %
	Лесной	Древесно- травяная	Травяная	Травяно- моховая	
Тип па	Древесная	Древесно- моховая	Травяная	Травяно- моховая	6+18
Низинный	Ольховый, березовый, ело- вый, сосновый низинный, иво- вый	Древесно- гипновый, древесно- сфагновый низинный коновый	Хвоще- вый, трост- никовый, осоковый низинный, вахтовый, шейхцерие- вый	Осоково- гипновый, низинный, новый низинный сфагновый низинный	6+18
Переходный	Древесный переходный	Древесно- осоковый пе- реходный	Осоковый переходный, шейх- цериевый переходный	Осоково- гипновый переходный, новый переходный	4+6
Верховой	Сосновый верховой	Сосново- пушицевый сфагновый	Пушице- вый шейх- цериевый верховой	Пушице- во-сфаг- новый, шейхце- риево- сфагновый верховой	2+4
Влажность торфа, доли единицы	0,87	0,89	0,91	0,92	0,92
Степень раз- ложения, %	52	44	37	32	20

Физические свойства торфов центральной части Западной Сибири (по А.И. Сергееву)

Генетический тип торфов	Фаши	Зольность, %	Степень разложения, %	Объемная масса, г/см ³	Объемная масса скелета, г/см ³	Плотность, г/см ³	Коэффициент пористости ϵ , доли единицы	Влажность W , доли единицы
Болотный	Верховая	18	5-20	0,96	0,08	1,57	18,2	10,2
	Верховая переходная	18	20-30	0,96	0,12	1,53	11,8	7,42
	Низинная переходная	18	30-40	0,96	0,15	1,52	9,6	5,38
Аллювиально-болотный	Низинная	18	40	0,96	0,20	1,41	6,1	3,86
	Низинная переходная	18-30	20-40	1,01	0,22	1,57	6,5	3,89
	переходная	30-40	20	1,14	0,42	1,97	3,8	1,81
	Низинная							

фование растительных остатков происходит особенно интенсивно в поверхностных слоях залежи (20–30 см), куда достаточно свободно проникает кислород. С глубиной количество микроорганизмов уменьшается. На больших глубинах встречается лишь ничтожное количество анаэробных бактерий.

Таким образом, физико-химические свойства торф приобретает в поверхностном торфогенном слое. Для практики строительства это обстоятельство имеет большое значение, указывая на то, что степень разложения торфа не зависит от его возраста, следовательно, не увеличивается со временем и не является причиной дополнительной деформации после возведения зданий.

С влажностью степень разложения находится в обратной зависимости: чем больше увлажнен торфообразующий субстрат, тем хуже аэрация и тем меньше степень разложения. Величину степени разложения R можно найти из зависимости, выведенной Ф.Н. Коваленко [15]:

$$R = \frac{95 - 5 W_n}{m (W_n + 1)}, \quad (2.1)$$

где W_n — полная влагоемкость торфа; m — эмпирический коэффициент, равный для верхового торфа 0,1, для низинного — 0,2.

В зависимости от степени разложения различают слабо-разложившиеся ($R < 20\%$), среднеразложившиеся ($R = 30 \div 45\%$) и сильноразложившиеся ($R > 45\%$) торфы. Указанные категории определяются визуально.

Несмотря на избыточную влажность торфы содержат некоторое количество свободного и растворенного воздуха, которое необходимо учитывать при определении физических свойств.

Средние значения пористости за счет зашемленного воздуха n_0 в водонасыщенном торфе в зависимости от степени разложения, вычисленные по данным Л.С. Амаряна, составляют:

для слаборазложившегося торфа	0,09
" среднеразложившегося "	0,05
" сильноразложившегося "	0,02

Степень разложения характеризует количество растительных остатков в грунте. Большинство исследователей в качестве весовой степени заторфованности принимают отношение

массы торфа к плотности минеральной составляющей грунта. Такое определение введено в нормативные документы [16]. Следует отметить, что оно не совсем удобно, так как обуславливает изменение степени заторфованности от нуля до бесконечно больших значений при увеличении в грунте количества растительных остатков. Целесообразнее выразить указанную степень заторфованности q_B как отношение массы торфа к массе всего сухого грунта. Полученная таким образом величина степени заторфованности изменяется в пределах от 0 до 1.

Количество растительных остатков в грунте может быть охарактеризовано объемной заторфованностью q_0 , представляющей отношение объема торфа к объему всего грунта в сухом состоянии.

Применяющиеся в настоящее время лабораторные методы определения степени заторфованности недостаточно точны. При выжигании растительных остатков затруднен учет зольности, а отделение гумусированной части грунта от минеральной не всегда возможно. В связи с этим на основе анализа результатов определения степени заторфованности разработан расчетный способ ее нахождения по плотности заторфованного грунта $\gamma_{з.г}$, которая представляет собой сумму плотностей минеральной γ_4 и органической γ_7 составляющих, взятых в соотношении, зависящем от степени заторфованности.

В том случае, когда степень заторфованности выражается как отношение массы торфа к плотности всего грунта в сухом состоянии, ее зависимость от $\gamma_{з.г}$, γ_4 и γ_7 имеет вид:

$$q_B = \frac{\gamma_7 (\gamma_4 - \gamma_{з.г})}{\gamma_{з.г} (\gamma_4 - \gamma_7)} \quad (2.2)$$

Аналогично для объемной заторфованности имеем:

$$q_0 = \frac{(\gamma_4 - \gamma_{з.г})}{(\gamma_4 - \gamma_7)} \quad (2.3)$$

Как известно, в инженерных расчетах плотность каждой разновидности грунта можно считать величиной постоянной: для песка равной 2,65, для глины - 2,74, для супесей и суглинков - 2,7 г/см³ [17], для низинных торфов - 1,5 г/см³ [18]. Подставив в формулы (2.2) и (2.3) зна-

чения плотностей минеральной компоненты грунта и торфа, получаем:

$$q_B = A / (\gamma'_{з.г} - B), \quad (2.4)$$

$$q_0 = C - D \gamma'_{з.г}, \quad (2.5)$$

где А, В, С, D – коэффициенты, зависящие от вида заторфованного грунта:

	Песчаные грунты	Глинистые грунты
А, г/см ³	3,46	3,26
В, доли ед.	1,30	1,19
С, доли ед.	2,30	2,20
D, см ³ /г	0,86	0,20

Переход к величине заторфованности q , принятой в СНиП Ц-15-74 по известным q_B или q_0 , осуществляется по формулам:

$$q = 0,44 q_B - \gamma'_{з.г} / (\gamma'_{з.г} - 1,5), \quad (2.6)$$

$$q = 0,67 q_0 \cdot 1 / (\gamma'_{з.г} - 1,5). \quad (2.7)$$

Плотность минеральных грунтов северной части Западной Сибири обусловлена видом грунта и меняется незначительно: для песка – от 2,62 до 2,69, для супесей и суглинков – от 2,58 до 2,71, для глины – от 2,72 до 2,75 г/см³. В несколько больших пределах изменяется плотность торфа γ'_T и грунтов, содержащих растительные остатки $\gamma'_{з.г}$. Величина γ'_T зависит от степени разложения R и зольности Z: с увеличением степени разложения плотность уменьшается, с увеличением зольности – увеличивается. Осредненные графики указанной зависимости, построенные по эмпирическим данным, заимствованным из работы [18], даны на рис. 5.

Плотность минеральных грунтов, содержащих растительные остатки $\gamma'_{з.г}$, определяется степенью заторфованности. Преобразуя зависимость (2.2), получим

$$\gamma'_{з.г} = \frac{\gamma_z}{1 + q_B (\gamma_z / \gamma'_T - 1)}. \quad (2.8)$$

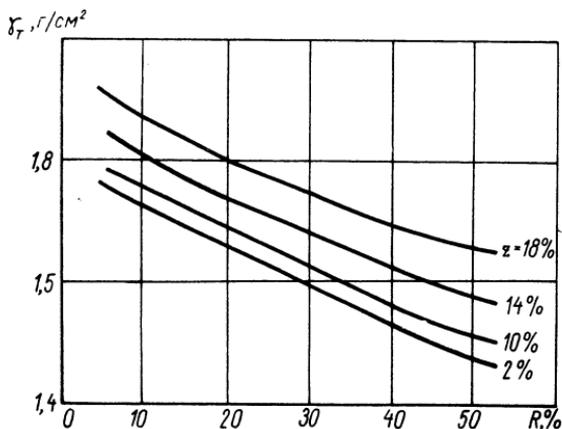


Рис. 5. Зависимость плотности торфа γ_T от степени разложения R и зольности z

Объемная масса торфа, кроме пористости и влажности, зависит от ботанического состава, степени разложения, зольности. Колебания величины объемной массы определяются соотношением воды и газов в порах грунта. Наибольшие колебания наблюдаются в зоне аэрации (до глубины 20–40 см). В зоне грунтовых вод, где объемное содержание газов не превышает 2–9%, величина объемной массы торфа меняется незначительно.

Непосредственное определение объемной массы как для талых, так и для мерзлых грунтов осложнено трудностями отбора образцов ненарушенной структуры. Кроме того, для определения объемной массы мерзлых грунтов необходимо иметь холодильную камеру или шурф с отрицательной температурой. Наши опыты показали, что методика комплексного определения физических свойств мерзлых грунтов, разработанная Г.П. Мазуровым [19], для торфа непригодна, так как объемная масса торфа зачастую меньше 1 г/см^3 и образцы не погружаются в воду.

Объемные массы талого γ_0^T и мерзлого γ_0^M грунтов можно определить расчетом. Соответствующие расчетные формулы несложно получить, суммируя массы основных компонентов грунтового комплекса:

$$\gamma_0^T = \frac{\gamma_u (1+W)(1-n_0)}{(W\gamma_u/\gamma_s + 1)}, \quad (2.9)$$

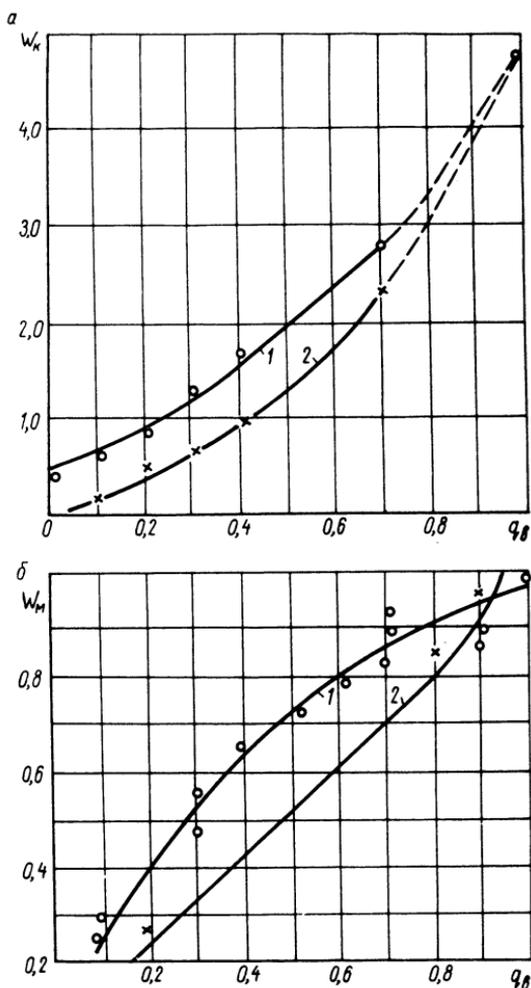


Рис. 6. Зависимость влагоемкости заторфованных грунтов от степени заторфованности
 а - капиллярная влагоемкость; б - молекулярная; 1 - глинистые грунты; 2 - песчаные грунты

$$\gamma_o^M = \frac{\gamma_L (1+W)(1-n_o)}{(W-0,08W_n + \gamma_L/\gamma_u)} \quad (2.10)$$

Для расчета γ_o^T и γ_o^M достаточно определить влажность грунта. Остальные параметры могут быть приняты осредненными: плотность льда γ_L равной $0,92 \text{ г/см}^3$;

n_0 , W_H , f_u - в зависимости от вида грунта (W_H - влажность за счет незамерзшей воды).

Сравнение величин объемной массы торфа, определенной известным методом режущего кольца и рассчитанной по предлагаемым формулам, показывает их хорошую сходимость.

Влажность грунтов колеблется в больших диапазонах. Наиболее вероятные значения весовой влажности (доли единицы) составляют: для песков 0,15-0,20, для супесей 0,20-0,30, для суглинков и глин 0,15-0,40 (см. табл. 7). Естественная влажность торфов в зависимости от типа и степени разложения колеблется от 2 до 10 (см. табл. 11).

На рис. 6 приведены графики зависимости капиллярной W_k и молекулярной W_m влагоемкости заторфованных грунтов, найденных по методике, изложенной в работе [20].

§ 2.2. Незамерзшая вода в мерзлых грунтах

Замерзание грунтовой влаги в диапазоне отрицательных температур, согласно современным представлениям [22], вызвано связывающим действием активных поверхностей частиц грунта и ионов растворенных солей, а также давлением, возникающим при расширении переходящей в твердое состояние воды.

Установлено, что при одинаковой температуре в промерзающих грунтах незамерзающей воды больше, чем в оттаивающих, а при одинаковой влажности у высушиваемого грунта температура начала замерзания $t_{н.з}$ выше, чем у увлажняемого [23].

Это связано с тем, что на фазовые превращения воды, как и на любой другой процесс, затрачивается определенное время, вследствие чего наблюдается запаздывание установления равновесного соотношения между температурой и количеством жидкой фазы воды в мерзлом грунте при изменении одной из этих физических характеристик. При этом, если данная температура выше предшествующей (оттаивающий грунт), то в начальные моменты времени влажность за счет незамерзшей воды больше равновесного значения (сказывается влияние предшествующего значения W_H , соответствующего более высокой температуре), если температура ниже, то наблюдаемые в начальные моменты времени значения влажности меньше равновесного. Со временем величины W_H в промерзающем и оттаивающем грунте сближаются, стремясь к одному равновесному при данной температуре значению W_H .

Сказанное подтверждается опытами авторов [23]. Две партии глинистого грунта с одинаковыми характеристиками: с объемной массой 1,8–1,9 г/см³, влажностью 0,26–0,27, выдержанные в течение 6 суток при различных средних температурах (минус 10°С и минус 0,5°С), – помещались в общую холодильную камеру с температурой минус 1,5°С. Через равные промежутки времени образцы, по одному из каждой партии, подвергались калориметрированию. Опыты были повторены дважды. Содержание незамерзшей воды W_n , доли единицы, оказалось равным:

	В промерзающем грунте	В оттаивающем грунте
$\tau = 0,75$ суток	0,095	0,049
$\tau = 1,5$ суток	0,082	0,060
$\tau = 3,0$ суток	0,083	0,082
$\tau = 6,0$ суток	0,082	0,081

Опыты показали, что для получения равновесных значений W_n или $t_{н.з}$ образцы грунта необходимо выдерживать при постоянной температуре или влажности не менее 3 суток.

Известен ряд аппроксимаций зависимости количества незамерзшей воды от температуры с помощью логарифмических или степенных функций, отличающихся у разных авторов численными коэффициентами и показателями степеней [21].

Наши исследования показали, что зависимость W_n от t при времени выдерживания образцов при данной температуре около 2–3 суток (состояние, близкое к равновесному) аппроксимируется формулой

$$W_n = \Pi |t|^{-n}, \quad (2.11)$$

где t – температура промерзающего или оттаивающего грунта в интервале $t_{н.з.п} \geq t \geq -20^\circ\text{C}$, где $t_{н.з.п}$ – температура начала заморзания влаги в грунте при его полном водонасыщении; n – безразмерный параметр, изменяющийся в пределах 0,24–0,35 (при $t < 1^\circ\text{C}$ для большинства грунтов равный 0,25); Π – параметр, зависящий от вида грунта, °С ^{n} .

На графиках рис. 7 нанесены величины влажности за счет незамерзшей воды в зависимости от температуры для промерзающих песчаных грунтов с различной степенью за торфованности φ по результатам исследований, выполненных авторами, а также по литературным данным и кривые, рас-

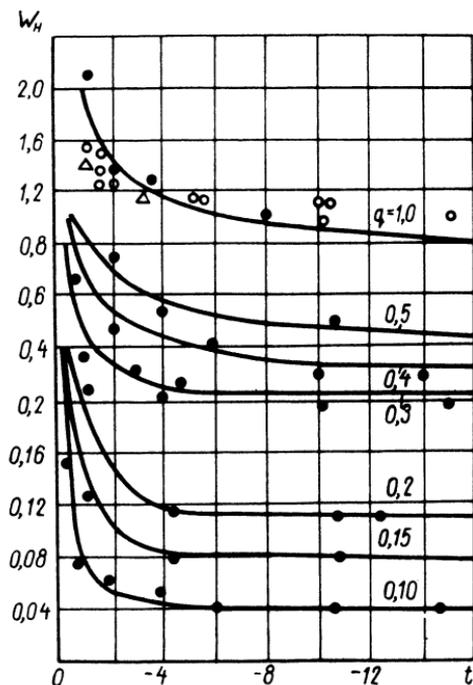


Рис. 7. Зависимость W_n от t в песчаных заторфованных грунтах
 • - по данным авторов; о - по А.Ф. Дерову [24]; Δ - по К.К. Павловой [25]; — по формуле (2.11)

считанные по формуле (2.11) при значениях Π , приведенных ниже:

	Песчаные грунты	Глинистые грунты
$q = 0,1$	0,06	0,16
$q = 0,2$	0,16	0,32
$q = 0,3$	0,33	0,48
$q = 0,5$	0,69	0,80
$q = 1,0$	1,60	1,60

Судя по рис. 7, вычисленные и фактические значения отличаются не более чем на 10%.

Аналогичные результаты получаются при аппроксимации формулой (2.11) зависимости W_n от t и для минеральных грунтов. Ниже приведены опытные (в числителе) данные, полученные Н.А. Цытовичем и З.А. Нерсесовой [26], и значения W_n (в знаменателе), вычисленные по формуле (2.11) для типичных незасоленных минеральных грунтов при значениях Π , равных 0,16 для глины, 0,1 - для суглинка и 0,05 - для суглиса:

	Глина	Суглинок	Супесь
$t = -1^{\circ}\text{C}$	$\frac{0,14}{0,15}$	$\frac{0,08}{0,10}$	$\frac{0,04}{0,05}$
$t = -4^{\circ}\text{C}$	$\frac{0,12}{0,11}$	$\frac{0,07}{0,07}$	$\frac{0,03}{0,04}$
$t = -9^{\circ}\text{C}$	$\frac{0,09}{0,09}$	$\frac{0,07}{0,06}$	$\frac{0,03}{0,03}$

Для водонасыщенного грунта при $t = t_{н.з}$ величина W_H равна полной влагоемкости W_n , откуда следует

$$W_H/W_n = (t/t_{н.з})^n \quad (2.12)$$

На рис. 8 приведены результаты экспериментальных определений W_H для различных грунтов, полученные авторами и заимствованные из литературных источников [27, 28],

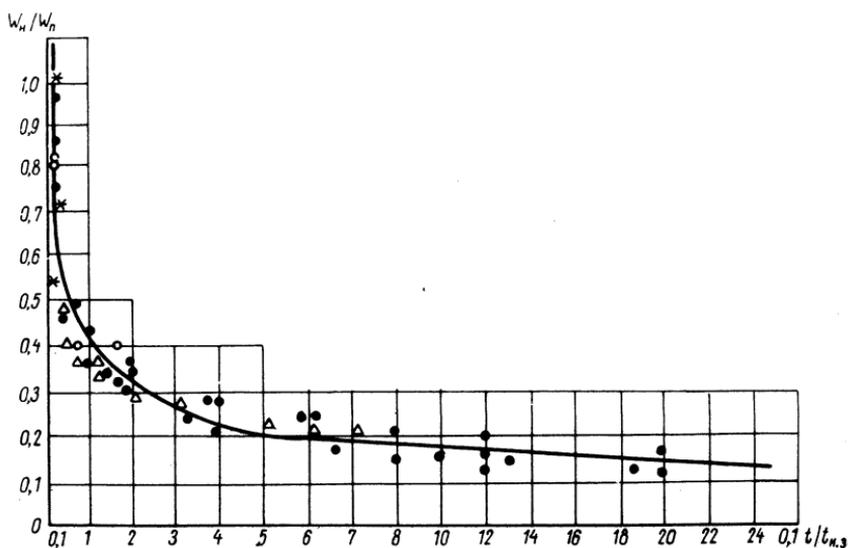


Рис. 8. Зависимость W_H/W_n от $0,1t/t_{н.з}$

● - по данным авторов для заторфованных грунтов;
 Δ - по данным З.А. Нерсесовой для юрской глины и покровного суглинка; ○ - по данным П.И. Андрианова для суглинка; * - по данным А.П. Боженовой для суглинка

обработанные* в виде безразмерной функции W_n / W_n от безразмерного аргумента $t/t_{n,3}$, при этом для удобства построения графика в качестве аргумента взята $1/10$ от $t/t_{n,3}$. Кривая на рис. 6 построена по формуле (2.12) при $n = 0,32$. Формула (2.12) применима практически во всем диапазоне реально возможных температур грунта. В ней отражена зависимость W_n от начальной влажности. В тонкодисперсных грунтах, как правило, набухающих при увлажнении, с увеличением влажности увеличивается также и полная влагоемкость. Температура начала замерзания при этом практически не изменяется. Из формулы (2.12) следует, что с увеличением полной влагоемкости при одном и том же значении $t_{n,3}$ и t увеличивается и величина W_n .

Температуру начала замерзания можно найти экспериментально или расчетным путем в зависимости от концентрации порового раствора по методике, изложенной ниже. Последняя представляет самостоятельный интерес для засоленных грунтов, широко распространенных на арктическом побережье Западной Сибири.

Растворенные в грунтовой воде соли являются, как правило, сильными электролитами и присутствуют в растворе в виде ионов. С повышением их концентрации ρ от нуля до эвтектического значения ρ_e температуры замерзания раствора понижаются от температуры замерзания дистиллированной воды ($t = 0,01 \approx 0^\circ\text{C}$) до температуры эвтектики t_e . Зависимость температуры замерзания водных растворов сильных электролитов от концентрации на графиках выражается слабовыпуклыми кривыми. Учитывая идентичность характера понижения температуры замерзания раствора с повышением концентрации, а также общность причины этого явления (понижение давления насыщенного пара над раствором по мере увеличения содержания в нем растворенных ионов), можно, опираясь на представления теории обобщенных переменных, предполагать о существовании определенного вида универсальной, общей для водных растворов солей любого состава зависимости относительных температур замерзания от относительной концентрации. Причем эта

* При обработке данных З.А. Нерсесовой [27] вместо полной влагоемкости в расчет принималась капиллярная влагоемкость; величины этих показателей, как известно, примерно равны.

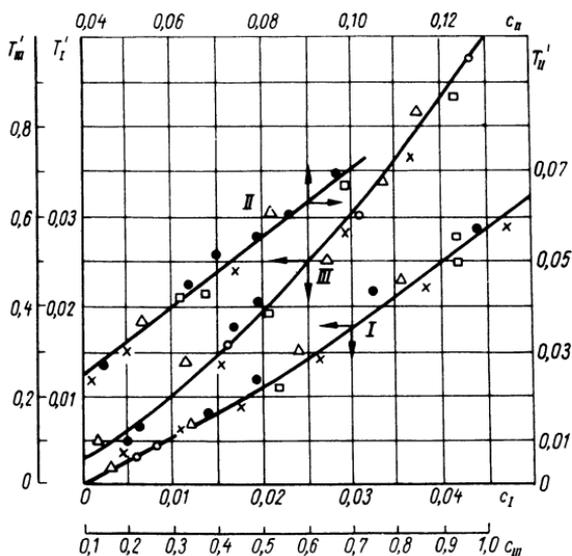


Рис. 9. Зависимость T' от c для растворов
 • — $NaCl$; \times — $CaCl_2$; Δ — $MgSO_4$;
 \square — $MgCl_2$; \circ — $NaNO_3$
 I, II, III, — номер отрезков кривой и соответствующие им шкалы c и T'

зависимость может выражаться в обобщенных переменных симплексного типа, представляющих собой отношения текущих и максимальных величин переменных, отсчитываемых от своего начального значения, в данном случае

$$c = \rho/\rho_0 ; \quad T' = t_{n,3}/t_0 .$$

Обработка экспериментальных данных подтвердила это предположение. На рис. 9 в графическом виде изображена зависимость T' от c для водных растворов различных солей. С практической точностью эту зависимость можно представить одной кривой для водных растворов солей любого состава. Эта кривая с погрешностью, не превышающей 2%, описывается выражением

$$T' = c^{1,15} = e^{1,15 \ln c} \quad (2.13)$$

В грунтовой воде обычно растворено несколько солей. Для сильноразбавленных растворов, каким является внутриводная влага, температура начала замерзания раствора смеси

солей является аддитивной величиной, т.е. равна сумме температур начала замерзания растворов всех компонентов смеси, каждая из которых находится по графику рис. 9. Соответственно формулу для $t_{н.з}$ раствора m солей можно записать в виде

$$t_{н.з} = \sum_{i=1}^{i=m} t_{зи} c_i^{1,15}$$

Значения $t_з$ и $\rho_з$ наиболее распространенных солей приведены ниже:

	$\rho_з, \%$	$t_з, ^\circ\text{C}$
<i>NaCl</i>	22,4	-21,2
<i>KCl</i>	20,6	-6,6
<i>CaCl₂</i>	29,9	-55,0
<i>MgCl₂</i>	21,6	-33,6
<i>NaNO₃</i>	38,0	-18,5
<i>MgSO₄</i>	19,0	-3,9

Сравнение величин $t_{н.з}$, вычисленных по приведенной выше формуле и найденных экспериментально, показало их хорошую сходимость [29].

§ 2.3. Теплофизические характеристики

Коэффициент теплопроводности промерзающих и оттаивающих грунтов можно определить по формуле С.А. Мартынова [21], положив в ней значение максимальной относительной льдистости равным единице. После несложных преобразований получим

$$\lambda_M = \lambda_T \left[1 + (\lambda'_M / \lambda_T - 1) (1 - W_n(t) / W_c) \right], \quad (2,14)$$

где λ_M , λ_T - коэффициенты теплопроводности практически полностью замершего и талого грунтов; λ'_M - при $W_n \neq 0$.

Расчеты по формуле (2.14) при подстановке вместо $W_n(t)$ выражения (2.11) показывают, что зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в диапазоне отрицательных ее значений интенсивно проявляется только при температурах, близких к температуре начала замерзания поровой влаги. При температурах ниже, чем $t_{н.з} - 1$, величину коэффициента теплопроводности можно принимать постоянной.

В настоящее время, благодаря исследованиям А.Ф. Чудновского, В.П. Ушкалова, М.С. Керстена, Н.С. Иванова, Д.И. Федоровича и др., накоплен и систематизирован обширный материал по теплопроводности минеральных мерзлых и талых грунтов [17, 30], который дополняет результаты исследований теплопроводности торфяных грунтов, выполненных авторами в Красноярском Промстройиниипроекте.

Справочные сведения о теплопроводности грунтов обычно представляются в форме таблиц, отражающих зависимости коэффициента теплопроводности от основных определяющих факторов — состава грунта, его влажности, объемной массы [30]. Связь теплопроводности грунта с его физическими свойствами можно выразить в форме однозначной зависимости от коэффициента водонасыщения $G = W_c / W_n$ — обобщенной переменной, характеризующей долевым состав компонентов грунтового комплекса, от которых зависят его теплофизические свойства. На графиках рис. 10 представлены результаты опытов авторов с торфяными грунтами, а также данные СНИП П-18 — 76 о теплопроводности минеральных грунтов, обработанные в виде зависимости от коэффициента водонасыщения.

Коэффициенты теплопроводности мерзлых грунтов, на основании которых построены графики на рис. 10, определены для температуры примерно минус 10°C и, следовательно, характеризуют практически полностью замерзшие грунты. Как известно, теплопроводность мерзлого грунта в общем больше, чем талого, вследствие большей теплопроводности льда по сравнению с водой. М.С. Керстеном [30] и другими исследователями было обнаружено, что при малых значениях влажности в температурном диапазоне примерно 0 — минус 4°C коэффициент теплопроводности мерзлого грунта меньше, чем талого. Физическое истолкование этому факту дал Н.С. Иванов [30], увязав его с зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры (с понижением температуры величина λ уменьшается). Это уменьшение заметно в основном при положительных температурах. В области отрицательных температур оно проявляется только при небольших, не превышающих максимальную молекулярную влагоемкость значениях влажности. При больших значениях влажности уменьшения λ не наблюдается в результате повышения коэффициента теплопроводности твердой фазы воды при понижении температуры мерзлого грунта.

В наших опытах коэффициент теплопроводности мерзлого грунта во всех случаях получился больше, чем талого, что и

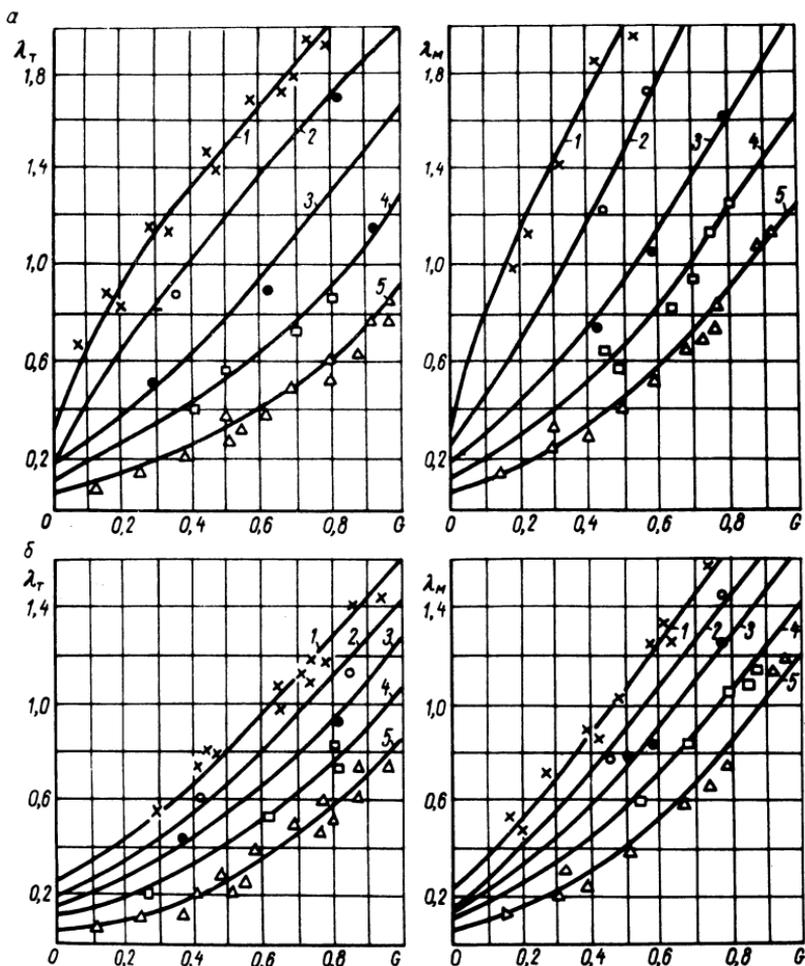


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м \cdot С) заторфованных грунтов в талом (λ_T) и мерзлом (λ_M) состояниях от коэффициента водонасыщения G

а - песчаных; б - глинистых; 1 - $q_b = 0$; 2 - $q_b = 0,05$; 3 - $q_b = 0,2$; 4 - $q_b = 0,4$; 5 - $q_b = 1$

отражено на графиках рис. 10. По-видимому, эффект понижения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта при небольших влажностях не проявился из-за низкой температуры проведения опытов.

Зависимость коэффициента теплопроводности от величины G с погрешностью, не превышающей 15%, можно представить в виде

$$\lambda = B + (A - B)G^\varphi, \quad (2.15)$$

где B и A — значения коэффициентов теплопроводности данного вида грунта соответственно при $G = 0$ и $G = 1$, причем A зависит от состояния грунта (мерзлого или талого); φ — безразмерный параметр, постоянный для данного вида грунта.

Теплоемкость грунта — аддитивная величина. Для заторфованных грунтов она составляет

$$C_M = \gamma_{ск} [C_1(1-q) + C_2q + C_L W_C - W_H(C_L - C_B)], \quad (2.16)$$

где C_M — истинная объемная теплоемкость мерзлого грунта; C_1, C_2, C_L, C_B — удельные теплоемкости скелетов, соответственно минеральной, органической части грунта, а также льда и воды, кДж/(кг·°С).

Эффективная объемная теплоемкость промерзающих и оттаивающих грунтов C_3 определяется по формуле [21]

$$C_3 = C_M - \frac{dW_H}{dt} \gamma_{ск} \rho, \quad (2.17)$$

где $\gamma_{ск}$ — объемная масса скелета грунта; ρ — удельная теплота кристаллизации. С учетом (2.11) эта формула приводится к виду

$$C_3 = C_M + \Pi \gamma_{ск} \rho n / t^{n+1}. \quad (2.18)$$

Ниже приведены осредненные значения удельных теплоемкостей C_y , а также параметра Π (по данным опытов) для различных грунтов, которые можно использовать в приближенных расчетах C_3 по формуле (2.18):

	C_y , кДж/(кг·°С)	Π , °С ^{0,25}
Пески	0,71	0
Супеси	0,75	0,05
Суглинки	0,8	0,1
Глины	0,92	0,15
Торфы	1,6	1,6
Вода	4,2	-
Лед	2,1	-

По данным опытов представилась возможность найти связь между постоянными, входящими в формулы для λ , W_n и $t_{n,z}$.

Ниже приведены значения параметра Π , соответствующие им значения B , A_T и A_M (соответственно для талого и мерзлого грунтов) и ψ :

$\Pi, ^\circ\text{C}^{0,25}$ 0,00-0,03	0,06	0,11	0,21	0,33	0,51	0,96	1,60
$B, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$... 0,34	0,30	0,27	0,23	0,19	0,13	0,09	0,08
$A_T, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$..2,55	2,10	1,80	1,45	1,39	1,16	0,93	0,87
$A_M, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$..3,13	2,78	2,55	2,20	1,97	1,62	1,28	1,16
$\psi, ^\circ$ 0,80	0,98	1,15	1,25	1,35	1,50	1,65	1,80

Зная Π , можно найти величины A , B и ψ и затем рассчитать по предложенным формулам величины $W_n(t)$, $c_z(t)$ и λ грунта в мерзлом и талом состояниях.

Величины Π при этом принимаются равными средним значениям или более точно определяются с помощью формулы (2.11) по экспериментально найденной величине температуры начала замерзания грунта при любом (одном) значении влажности.

ГЛАВА 3 ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТА В ОСНОВАНИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

§ 3.1. Систематизация тепловых задач

Инженерные сооружения можно представить как тепловые источники с постоянной в среднегодовом выражении температурой $t_n = \text{const}$, расположенные на поверхности или внутри грунтового полупространства. Начальная температура, а также температура поверхности полупространства (обе среднегодовые) вне контуров источника $t_0 = \text{const}$. При этом форма источника (сооружения) в плане может быть различной. Наиболее характерные конфигурации источников: беско-

нечная полоса (одна из сторон сооружения во много раз превышает другую), прямоугольник, круг (сегмент круга) и т.д.

В зависимости от положения по отношению к поверхности грунта все сооружения как тепловые источники можно разделить на четыре группы: поверхностные, заглубленные, приподнятые (типа зданий на подсыпках), подземные.

В талых грунтах, а также в средне- и крупнодисперсных мерзлых грунтах, теплофизические характеристики которых практически не зависят от температуры, распределение температур описывается известным дифференциальным уравнением Фурье. В СНиП Ц-18 - 76 "Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах", в научно-технической литературе [31] приводятся методики расчета температурных полей промерзающих и оттаивающих грунтовых оснований, базирующиеся на решении этого уравнения при указанных краевых условиях для случаев, когда сооружение имеет в плане форму полосы или прямоугольника, а точка, в которой определяется температура, находится под его центром или краем. Для решения инженерных задач, однако, этого недостаточно.

Во-первых, перечисленные формы не исчерпывают даже самые типичные конфигурации сооружений, в частности для резервуаров наиболее характерна круглая форма.

Во-вторых, не всегда можно ограничиться расчетом температур под центром и краем сооружения даже для оценки наихудших условий работы мерзлых оснований, т.е. для установления максимальной температуры грунта. Например, совершенно очевидно, что под зданием прямоугольной формы, под которым температуры у поверхности грунта ниже, чем у поверхности грунта вне контуров здания, самые высокие значения температур будут наблюдаться под его углами, а не под центром и краями.

В-третьих, существующие методы тепловых расчетов основываются главным образом на решении стационарного варианта задачи теплопроводности. Вопросы же управления температурным режимом грунта, обычно возникающие при строительном проектировании в условиях пластично-мерзлых и водонасыщенных грунтов севера Западной Сибири, требуют решений нестационарной задачи теплопроводности, которые известны только для ограниченного числа простейших случаев.

В-четвертых, существующие решения, особенно для случая с фазовыми переходами грунтовой влаги, получены при ряде упрощающих предпосылок - пренебрежении теплоемкостью

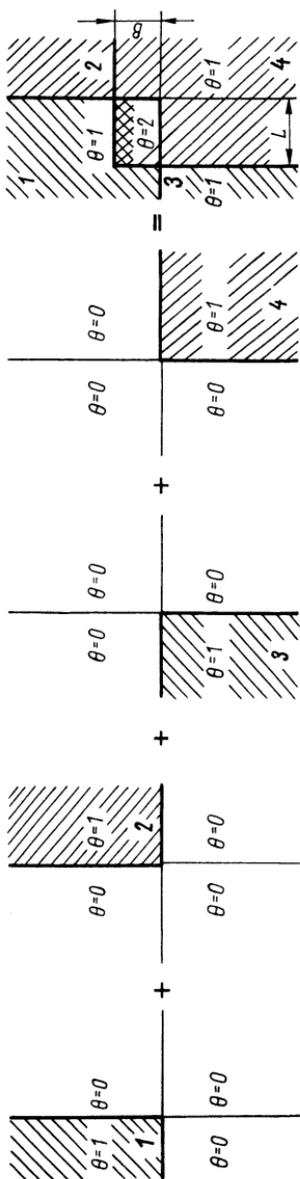
грунта, допущении фронтального характера промерзания, которое можно принять только для песчаных грунтов, но неверно для заторфованных; в некоторых случаях, как будет показано далее, величина ошибки за счет этих упрощений выходит за рамки допустимой.

Предлагаемые нами решения тепловых задач дополняют решения, приводимые в нормативной и справочной литературе, с точки зрения учета перечисленных выше замечаний.

Решения для температурных полей, возбуждаемых в грунтовой полупространстве (при отсутствии фазовых переходов грунтовой влаги) сооружениями разной формы, базируются главным образом на принципе суперпозиции, который применим во всех случаях, когда краевые условия, внутренние источники и теплофизические характеристики не зависят от температуры среды. В соответствии с этим принципом рассматриваемый источник сложной конфигурации раскладывается на ряд простых, решения для которых или известны или их удастся получить. Общее решение ищется в виде алгебраической суммы решений для элементарных источников, причем искомое и составляющие его решения должны удовлетворять дифференциальному уравнению, а алгебраические суммы краевых условий в составляющих задачах должны быть равны таковым в общей задаче.

За элементарные удобно принять источники в форме бесконечного сектора на поверхности с произвольным углом в вершине φ . Тогда, используя сформулированные два правила, можно получить решения для большинства встречающихся на практике геометрических форм сооружений. Первое правило — правило наложения — применяется при определении температурных полей, создаваемых поверхностными источниками в форме четырехугольника, а также заглубленных и приподнятых источников, предварительно конформно отображенных на полосу. Четырехугольник получается наложением четырех бесконечных секторов (рис. 11), два из которых (1 и 4) накладываются друг на друга, а два других (2 и 3 на рис. 11,а) "вставляются" во внешние углы; полоса — путем наложения двух бесконечных секторов с $\varphi = \pi$ (рис. 11,б). Решения задач на определение стационарных температурных полей с применением правила наложения детально разобраны Брауном [31].

Формулу, соответствующую правилу наложения, можно записать в виде



б)

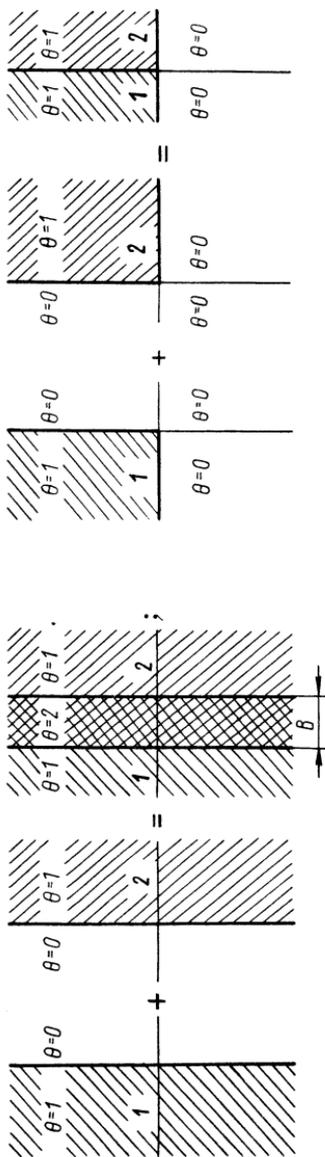


Рис. 11. Схемы наложения (а, б) и сложения (в) источников (В — ширина оружия, l — его длина)

$$\theta_n = \sum_{i=1}^{i=n} \theta_i - \theta_\delta, \quad (3.1)$$

где $\theta_n = (t_{(x,z,y,z)} - t_d)/(t_n - t_d)$ — температурное поле (в безразмерном виде) от n -угольного источника ($1 < n \leq 4$); θ_i — то же, от i -го бесконечного сектора с произвольным углом в вершине; θ_δ — то же, от бесконечного источника ($\varphi = 2\pi$); x, z — горизонтальные координаты; y — глубина; t_n — среднегодовая температура поверхности грунта под сооружением; t_d — то же, вне сооружения.

Второе правило — правило сложения температурных полей — применяется тогда, когда конфигурация источника образована приложением друг к другу без пересечения двух других фигур (рис. 11, в) или определяется температурное поле, создаваемое либо несколькими поверхностными источниками произвольной формы, либо приподнятыми и заглубленными источниками в форме бесконечного бруса, конформно отображенного на полосу.

Формула сложения имеет вид

$$\theta_m = \sum_{j=1}^{j=m} \theta_j, \quad (3.2)$$

где θ_m — температурное поле (в безразмерном виде) от составного источника или m отдельно стоящих источников; θ_j — то же, каждого составляющего или отдельно стоящего источника.

Возможности, а также особенности применения суперпозиции при решении сложных задач теплопроводности нагляднее всего иллюстрируются на примере их решения для простого, стационарного, варианта. В то же время выявляемые при этом правила и порядок расчета справедливы и тогда, когда решение является функцией времени, поэтому рассмотрение задач на определение температур при действии источников разной формы начнем со стационарного варианта.

§ 3.2. Стационарные температурные поля (СТП)

Для СТП под поверхностными источниками общим решением является интеграл Пуассона [32], раскрывая который для условий четвертьбесконечного источника, совмещенного с первой четвертью тригонометрического круга, имеем:

$$\theta_c = 0,25 + \frac{1}{2\pi} \left(\arctg \frac{x}{y} + \arctg \frac{z}{y} + \arctg \frac{xz}{y\sqrt{x^2+z^2+y^2}} \right). \quad (3.3)$$

Приложив друг к другу две четвертьбесконечности так, как показано на рис. 11, в, получаем полубесконечность и, согласно формуле сложения (3.2), решение для СТП от полубесконечного источника:

$$\theta_c = 0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x}{y} . \quad (3.4)$$

Это же выражение можно получить, положив в уравнение (3.3) координату $x = \infty$.

Воспользовавшись правилом наложения (рис. 11, а и б) и используя в качестве составляющих решений (3.4) и (3.3), получаем известные выражения для СТП, возбуждаемых источниками в форме бесконечной полосы и прямоугольника:

$$\theta_{\text{пол.с}} = \frac{1}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{0,5B+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{0,5B-x}{y} \right); \quad (3.5)$$

$$\theta_{\text{п.к.с}} = \frac{1}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(x+0,5B)(z+0,5L)}{y\sqrt{y^2+(x+0,5B)^2+(z+0,5L)^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(0,5B+x)(0,5L-z)}{y\sqrt{y^2+(0,5B+x)^2+(0,5L-z)^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(0,5B-x)(0,5L-z)}{y\sqrt{y^2+(0,5B-x)^2+(0,5L-z)^2}} + \operatorname{arctg} \frac{(0,5B-x)(0,5L+x)}{y\sqrt{y^2+(0,5B-x)^2+(0,5L+x)^2}} \right], \quad (3.6)$$

где B и L — ширина и длина прямоугольника; x, y — горизонтальные координаты, отсчитываемые от центров источников.

Решение для температурных полей под круглым источником радиусом R , включающее в себя эллиптические интегралы, приведено в работе [32]. Для оси симметрии оно значительно упрощается:

$$\theta_c = 1 - y / \sqrt{y^2 + R^2} . \quad (3.7)$$

Заглубленные и приподнятые источники. Ранее А.А. Коноваловым совместно с А.Г. Коношенко [33] получено решение для бесконечного бруса, одна сторона которого совпадает с поверхностью грунта, три (с температурой t_n) лежат ниже (здание с подвалами, траншея) или выше нее (здания на подсыпаемых основаниях). Решение получено методом конформных отображений. Оно имеет вид аналогичный (3.5) для СТП от полосового источника в плоскости ψ, ζ :

$$\theta_{(\psi, \zeta)} = \frac{1}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{1+2\psi-\psi}{\zeta} + \operatorname{arctg} \frac{1+\psi}{\zeta} \right), \quad (3.8)$$

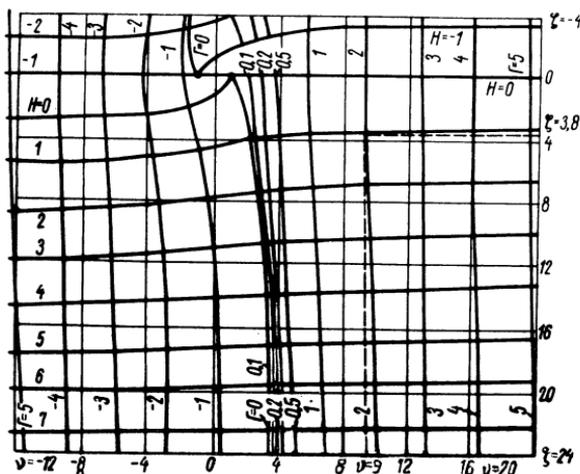


Рис. 12. Сетка для перевода координат реальной полу плоскости H, Γ в координаты вспомогательной ψ, ξ (пунктиром показан пример определения ψ и ξ для $H=1$ и $\Gamma=2$)

где ψ и ξ – горизонтальная и вертикальная координаты вспомогательной плоскости, определяемые с помощью графика на рис. 12 в зависимости от $\Gamma = (x + 0,5B)/h$ и $H = (y-h)/h$ (здесь h – расстояние по вертикали от дневной поверхности до низа или до верха источника); ψ_0 – горизонтальная координата, соответствующая на вспомогательной плоскости центру источника ($x=0, y=h$) и определяемая так же, как и ψ , но в зависимости от $\Gamma' = 0,5B/h$ и $H=0$.

Наиболее вероятной формой заглубленных или приподнятых сооружений является прямоугольный параллелепипед. Получить строгое решение для этого случая не удастся, приходится искать приближенные методы.

Покажем, что СТП от источника в форме прямоугольника на поверхности грунта приближенно можно представить в виде произведения СТП от двух взаимно перпендикулярных полосовых источников шириной B и l

$$\theta_{\text{пк.с}} = \theta_{\text{пол.с}}^B \theta_{\text{пол.с}}^l \quad (3.9)$$

Уравнение (3.9) удовлетворяет граничным условиям (при $y = 0$ величина $\theta_{пк}$ внутри прямоугольника, образованного пересечением полос, равна единице, вне его - нулю), но не удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности для стационарного варианта, имеющему вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0.$$

Соответствующая погрешность увеличивается с уменьшением разницы между длиной и шириной прямоугольника и с приближением к оси симметрии. Ниже приведены значения $\theta_{пк.с}$, рассчитанные по точной (3.6) и приближенной (3.9) формулам (соответственно в числителе и знаменателе) для квадрата под его центром (наихудший из возможных случаев) и под углом:

	Под центром	Под углом
$0,5 B/y = 1$	$\frac{0,32}{0,25}$	$\frac{0,15}{0,13}$
$0,5 B/y = 2$	$\frac{0,59}{0,50}$	$\frac{0,20}{0,18}$
$0,5 B/y = 7$	$\frac{0,87}{0,83}$	$\frac{0,23}{0,23}$
$0,5 B/y = 10$	$\frac{0,89}{0,86}$	$\frac{0,24}{0,24}$
$0,5 B/y = 20$	$\frac{0,95}{0,95}$	$\frac{0,24}{0,24}$

Из приведенных данных видно, что разница между СТП, вычисленными по обеим формулам, невелика. Поэтому формулой (3.9) можно воспользоваться для инженерных расчетов температуры под заглубленными и приподнятыми сооружениями, имеющими в плане форму прямоугольника. Для иллюстрации методики расчета приведем пример.

Требуется определить стационарную температуру грунта на глубине $y = 6$ м под центром заглубленного ($h = 3$ м) холодильника с размерами в плане 12×18 м. Температура поверхности грунта на контакте с холодильником $t_n = -5^\circ\text{C}$, вне его $t_o = -1^\circ\text{C}$.

1. Представляем прямоугольное в плане сечение сооружения как фигуру, образованную пересечением двух полос шириной 12 и 18 м, и определяем безразмерные переменные:

при $B = 12$ м

$$\Gamma' = 0,5B/h = 6/3 = 2; \quad H = (6-3)/3 = 1; \quad \Gamma = (0+6)/3 = 2;$$

при $B = 18$ м

$$\Gamma' = 0,5B/h = 9/3 = 3; \quad H = (6-3)/3 = 1; \quad \Gamma = (0+9)/3 = 3.$$

2. С помощью рис. 12 находим значения $\psi_g = \psi, \xi$
при $B = 12$ м

$$\psi_g = 8,9, \quad \psi = 9, \quad \xi = 3,8;$$

при $B = 18$ м

$$\psi_g = 12,8, \quad \psi = 13, \quad \xi = 3,8.$$

3. По формуле (3.8) вычисляем относительные температуры:

при $B = 12$ м

$$\theta = \frac{1}{3,14} \left(\arctg \frac{1 + 17,8 - 9}{3,8} + \arctg \frac{1 + 9}{3,8} \right) = 0,77;$$

при $B = 18$ м

$$\theta = \frac{1}{3,14} \left(\arctg \frac{1 + 25,6 - 13}{3,8} + \arctg \frac{1 + 13}{3,8} \right) = 0,83.$$

4. По формуле (3.9) определяем

$$\theta_{пк.с} = 0,77 \cdot 0,83 = 0,64.$$

Искомая размерная температура

$$t = -1 + (-5) \cdot 0,64 = -4,2^\circ\text{C}.$$

Подземные сооружения. Обычно они имеют цилиндрическую форму, причем их длина намного больше радиуса. Стационарное температурное поле для цилиндрического источника, параллельного поверхности грунта, описывается известным уравнением Форхгеймера [31].

§ 3.3. Нестационарные температурные поля (НТП)

Как следует из предыдущего параграфа, если известно температурное поле, возбуждаемое поверхностным четвертьбесконечным источником, то с помощью правил суперпозиции нетрудно получить решения для температурных полей от поверхностных источников более сложной (и наиболее типичной для сооружений) формы — полосы и прямоугольника. Однако строго аналитического решения для НТП от четвертьбесконечного источника, насколько это известно автору, нет.

Анализ уравнения (3.3) для СТП от четвертьбесконечного источника показывает, что оно является алгебраической суммой решений для температурных полей:

а) от двух полубесконечных источников при $\theta_n = 0,5$ и $\theta_0 = 0$ (θ_n — безразмерная температура источника; θ_0 — безразмерная температура поверхности полупространства вне источника) и обозначении пространственных координат x , y и z , y ;

б) от бесконечного источника при $\theta_n = -0,25$ и $\theta_0 = 0$;

в) для вертикальной оси, проходящей через центр поверхностного источника в форме прямоугольника со сторонами $2x$ и $2z$, при $\theta_n = 0,25$ и $\theta_0 = 0$.

В самом деле, выражения для СТП от двух полубесконечных источников при указанных краевых условиях соответственно для координат x , y и z , y имеют вид:

$$\theta_1 = 0,5 \left(0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right);$$

$$\theta_2 = 0,5 \left(0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{z}{y} \right).$$

Выражение для СТП от бесконечного источника получим, подставив в уравнение (3.4) $x = \infty$, тогда при $\theta_n = -0,25$

$$\theta_3 = -0,25 \left(0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\infty}{y} \right) = -0,25.$$

Наконец, подставив в выражение (3.6) $x = 0$, $z = 0$, а вместо B и L соответственно $2x$ и $2z$ и имея в виду, что θ_n равно $0,25$, а не 1 , имеем

$$\theta_4 = 0,25 \cdot \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{xz}{y\sqrt{y^2 + x^2 + z^2}}.$$

Складывая выражения для $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$, приходим к уравнению (3.3).

Решение для полубесконечного источника получено Лахенбрухом [34] в виде

$$\theta_H = 0,5 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{x}{y}} \exp\left(-\frac{x_1^2+1}{4F_0}\right) \frac{dx_1}{x_1^2+1}, \quad (3.10)$$

где $\operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{1/2\sqrt{F_0}}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{4F_0}\right) d\left(\frac{1}{2\sqrt{F_0}}\right)$ - табулированная функция [36]; $F_0 = \frac{\alpha \tau}{y^2}$ - число Фурье; α - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$.

В уравнении (3.10) оба безразмерных аргумента (F_0 и x/y) изменяются от 0 до ∞ , в связи с чем затруднительно представить это решение в компактной табличной и графической форме. Поэтому с помощью зависимости (3.4) выразим x/y через безразмерную температуру, изменяющуюся только от 0 до 1:

$$x/y = \operatorname{tg} \mathcal{K}(\theta_c - 0,5); \quad (3.11)$$

здесь и далее θ_c - правая часть выражений для СТП.

На рис. 13 приведено графическое решение интеграла Ψ во втором слагаемом уравнения (3.10), выраженном через F_0 и $\alpha = \mathcal{K}(\theta_c - 0,5)$.

Выражение для НТП от бесконечного источника общеизвестно:

$$\theta_H = \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}. \quad (3.12)$$

К этому же уравнению можно прийти, положив в (3.10) в верхнем пределе интегрирования $x/y = \infty$, что соответствует на графике рис. 11 случаю $\alpha = 0,5 \mathcal{K}$, так как для бесконечного источника $\theta_c = 1$. Выражение для НТП от полубесконечного источника превращается в выражение для НТП от бесконечного источника, когда $x/y = \infty$, что соответствует на графике рис. 13 случаю $\alpha = 0,5 \mathcal{K}$, так как для бесконечного источника $\theta_c = 1$. Это значит, что имеет место равенство правых частей уравнений (3.12) и (3.10) при $x/y = \infty$ (или $\alpha = 0,5 \mathcal{K}$), откуда

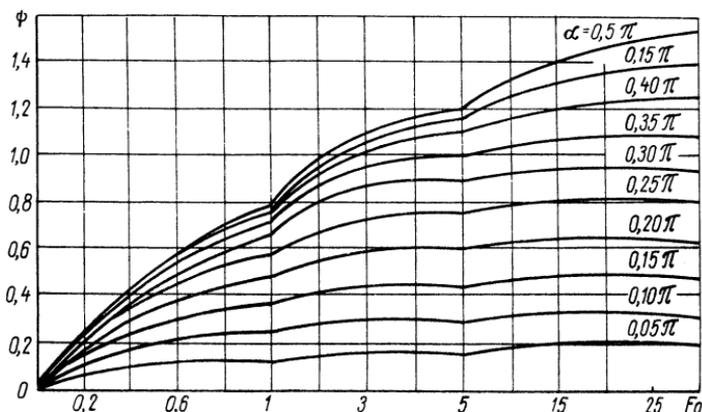


Рис. 13. Зависимость Ψ от α и F_0

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{0,5\pi} \exp\left(-\frac{x_1^2+1}{4F_0}\right) \frac{dx_1}{x_1^2+1} = 0,5 \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} = \frac{1}{\pi} \Psi_1.$$

Следовательно, выражение (3.12) можно записать

$$\theta_n = 2 \frac{1}{\pi} \Psi_1,$$

где Ψ_1 — частный случай Ψ при $\alpha = 0,5\pi$.

Используя в качестве элементарного решение (3.10), с помощью формулы наложения найдем выражение НТП для полосового источника*:

$$\theta_{\text{пол.н}} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{i=2} \Psi_i, \quad (3.13)$$

где Ψ_i — значения, определяемые по графику на рис. 11 при α , равных первому и второму слагаемым во втором сомножителе правой части уравнения (3.5).

Теперь перейдем к определению последнего слагаемого в выражении НТП от четвертьбесконечного источника — уравнения НТП для центра прямоугольного источника.

* Решение для НТП от полосового источника как функции x/y , $\frac{0,5B}{\sqrt{F_0}}$, F_0 впервые опубликовано Лахенбрухом [34], но с ошибкой в знаке; частные случаи этого решения — для центра и краев полосы — получены Г.В. Порхавым [31].

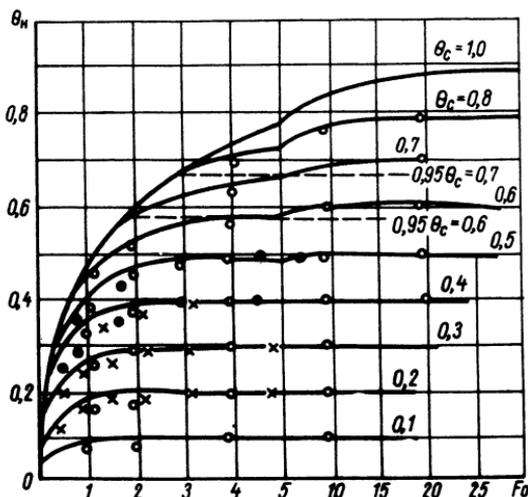


Рис. 14. Зависимость θ_n от F_0 и θ_c для центров источников разной формы

- по результатам физического моделирования для заглабленного параллелепипеда; x - то же, для заглабленного цилиндра; o - рассчитанные для центра полосы по формуле (3.15); — - то же, по формуле (3.14) для центра круга (пунктирными линиями на графике показаны значения θ_n , составляющие 95% от величины того значения θ_c , линии которого они пересекают, см. § 3.4)

При одинаковой ширине поверхностных источников наибольшее тепловое влияние на грунт оказывает полоса, наименьшее - круг. Прямоугольник занимает промежуточное положение. На рис. 14 показана зависимость НТП от F_0 и θ_c под центрами полосы, круга и ряда источников другой формы. Под центром круга НТП вычислены по известной формуле Лахенбруха [34]:

$$\theta_n = \text{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}} - (1 - \theta_c) \text{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0} (1 - \theta_c)^2}, \quad (3.14)$$

где θ_c - правая часть уравнения (3.7).

Под центром полосы НТП рассчитаны по формуле (3.13), которая для этого случая упрощается:

$$\theta_{\text{пол.н}} = \frac{2}{\pi} \psi^4, \quad (3.15)$$

где ψ^4 - значение ψ при $\alpha = \arctg \frac{0.5B}{2}$.

Значения θ_H под центрами остальных фигур найдены с помощью физического моделирования. Значения F_0 для них рассчитывались в зависимости от глубины, отсчитываемой от низа источника, y_u

Сравнение на рис. 14 величин θ_H под центрами полосы и круга показывает, что при одинаковых F_0 и θ_c они отличаются незначительно (не более чем на 10%). Учитывая то, что при одних и тех же значениях F_0 и θ_c величины θ_H под центром прямоугольника должны лежать между значениями θ_H под центрами круга и полосы, для определения НТП под центром прямоугольника в инженерных расчетах можно использовать любую из двух последних формул, например формулу (3.15), подставляя в нее

$$\alpha_{пк} = \operatorname{arctg} \frac{0,5B \cdot 0,5L}{y \sqrt{y^2 + (0,5B)^2 + (0,5L)^2}}$$

или формулу (3.14) при $\theta_c = 2 \alpha_{пк} / \pi$.

Теперь с помощью правила наложения нетрудно найти выражение для источника в форме прямоугольника — наиболее общей и распространенной конфигурации инженерных сооружений. Если разместить центр координат в центре прямоугольника, то это выражение будет иметь вид

$$\theta_{пк.н} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{i=4} \psi_i, \quad (3.16)$$

где ψ_i — значения ψ , определяемые по графику рис. 13, при значениях α , равных каждому из четырех арктангенсов в правой части уравнения (3.6).

Судя по данным физического моделирования, хорошая точность расчета НТП под центрами источников, не совпадающих с поверхностью грунта, обеспечивается по формулам (3.13)–(3.15) при подстановке в них соответствующих значений θ_c .

НТП в других точках полупространства можно определить приближенно, используя для них решение стационарного варианта задачи и решение НТП для оси симметрии, принимая форму изотерм на любой отрезок времени такой же, как при стационарном состоянии.

При этом также используются формулы (3.13)–(3.15), в которые вместо y в выражение для F_0 подставляется значение y_u , вычисленное с помощью формул для СТП под центрами источников конкретной конфигурации.

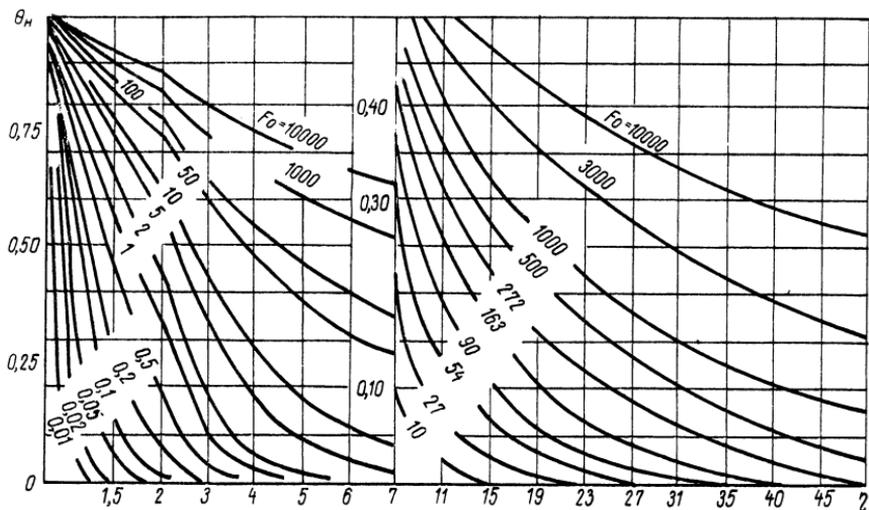


Рис. 15. Зависимость θ_n от ζ

Подземные сооружения. При достаточном удалении от поверхности грунта и в начальные моменты времени подземные сооружения, такие, как трубопроводы, санитарно-технические коммуникации, скважины и т.п., можно рассматривать как бесконечные цилиндрические источники в пространстве. Выражение для НТП, возбуждаемых в пространстве цилиндрическими источниками, известно [36]. На рис. 15 показана его графическая интерпретация.

Представленный график аппроксимируется более удобным для расчетов выражением

$$\theta_n = 1 - \frac{\tau_0 \zeta}{\tau_0 \zeta_0}, \quad (3.17)$$

где $\zeta = z/R$; $\zeta_0 = \tau_0/R = \exp 1,8 F_0^{0,11}$ — относительный радиус теплового влияния источника; ($F_0 = \alpha \tau / R^2$); R — радиус источника; τ_0 — радиус теплового влияния; z — кратчайшее расстояние от центра источника до данной точки).

Формула (3.17) справедлива для $1 \leq \zeta < \zeta_0$. Разница между величинами θ , найденными по точной и приближенной формулам, убывает с увеличением F_0 : для $F_0 \geq 100$ она не превышает 2%, для $10 < F_0 < 100$ погрешность расчетов по формуле (3.17) составляет около 10%.

Известное решение получено для постоянной по длине трубопровода температуры его поверхности. При ее линейном

изменении $t_n(x) = t_0 + Kx$ правая часть решения будет идентична (3.17), а левая – примет вид $\theta = \frac{t_{(x,z,\tau)} - t_0}{t_n(x) - t_0}$

(здесь x – расстояние вдоль трубопровода от точки, в которой $t_n = t_0$; K – постоянная).

В справедливости сказанного нетрудно убедиться подстановкой решения в дифференциальное уравнение теплопроводности и краевые условия.

Расчеты показывают, что для перехода от среднегодовых температур грунта к сезонноизменяющимся температурам, в том числе к максимальным, подходит формула

$$t_{(x,y,z)} = \left[t_0 + (t_n - t_0) \theta_n \right] \left[1 - \exp\left(-y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_r}}\right) \cos\left(\frac{\tau 2\pi}{\tau_r} - y\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_r}}\right) \right], \quad (3.18)$$

где θ_n – решение для НТП, формируемых источником конкретной формы; y – глубина, считая от подошвы деятельного слоя.

Обоснование (3.18), а также примеры сопоставления результатов расчетов с фактическими данными приведены в [36].

Для пояснения предлагаемой методики расчета приведем примеры.

Пример 1. Требуется определить среднегодовую и максимальную температуры грунта под зданием ($L = 36$ м, $B = 12$ м) спустя 2 года ($\tau = 17520$ ч) после начала его эксплуатации. Среднегодовая температура на поверхности грунта под зданием $t_n = -3^\circ\text{C}$, среднегодовая температура у поверхности грунта вне здания $t_0 = 1^\circ\text{C}$, коэффициент теплопроводности грунта $\alpha = 0,002$ м²/ч, координаты расчетных точек (центр координат располагаем на поверхности грунта под центром здания): а) $x = 0$, $z = 0$, $y = 5$ м; б) $x = 5$ м, $z = 0$, $y = 5$ м. Глубина слоя сезонного оттаивания под зданием в среднем равна 1 м.

Решение. 1. По формуле (3.5) определяем безразмерные СТП для вариантов:

$$\text{а) } \theta_c = \frac{1}{6,28} \cdot 4 \left(\arctg \frac{108}{5\sqrt{25 + 36 + 324}} \right) = 0,53;$$

$$\begin{aligned} \text{б) } \theta_c &= \frac{1}{6,28} \left(2 \arctg \frac{11 \cdot 18}{5\sqrt{25 + 121 + 324}} + \right. \\ &\left. + 2 \arctg \frac{(-1) \cdot 18}{5\sqrt{25 + 1 + 324}} \right) = 0,28. \end{aligned}$$

2. Для варианта "б" с помощью формулы (3.5), предварительно приведенной к виду

$$y_{ц} = \sqrt{\left(\frac{0,25B^2 + 0,25L^2}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,25BL}{\operatorname{tg}\theta_c}\right)^2 - \frac{0,25B^2 + 0,25L^2}{2}},$$

находим глубину под центром зданий с безразмерной стационарной температурой $\theta_c = 0,28$:

$$y_{ц} = \sqrt{\sqrt{324000 + 48600} - 180} = 10,8 \text{ м.}$$

3. Вычисляем безразмерные переменные, необходимые для расчета $\theta_{пк.н}$ по формуле (3.16), в своих вариантах:

$$a) F_0 = \frac{0,002 \cdot 17520}{25} = 14; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 =$$

$$= \operatorname{arctg} \frac{108}{5\sqrt{25 + 36 + 324}} = 0,32 \pi;$$

$$б) F_0 = 0,3; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0,34 \pi; \quad \alpha_3 = \alpha_4 = -0,06 \pi.$$

4. По графику на рис. 11 определяем значения интеграла ψ :

$$a) \psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = 0,8;$$

$$б) \psi_1 = \psi_2 = 0,31; \quad \psi_3 = \psi_4 = -0,07.$$

5. По формуле (3.16) находим искомые среднегодовые температуры в безразмерном виде:

$$a) \theta = \frac{1}{6,28} \cdot 4 \cdot 0,8 = 0,51;$$

$$б) \theta = \frac{1}{6,28} [(2 \cdot 0,31) - (2 \cdot 0,07)] = 0,08.$$

6. Имея в виду, что $\theta = \frac{t(x, z, y, \tau) - t_0}{t_0}$, вычисляем искомые среднегодовые температуры:

$$a) t = -1 + (-3 + 1) \cdot 0,51 = -2^{\circ}\text{C};$$

$$б) t = -1 + (-3 + 1) \cdot 0,08 = -1,2^{\circ}\text{C}.$$

7. По формуле (3.18), учитывая, что максимум температуры имеет место при значении косинуса, равном 1, и глубина слоя сезонного оттаивания под зданием по условию составляет 1 м, рассчитываем искомые максимальные температуры:

$$a) \quad t_{max} = -2 \left\{ 1 - \exp \left[-(5-1) \sqrt{\frac{3,14}{8760 \cdot 0,002}} \right] \right\} = -1,63;$$

$$b) \quad t_{max} = -1,2 \cdot 0,82 = 0,98.$$

Пример 2. Требуется определить температуру на расстоянии 0,5 м от центра охлаждающей грунт колонки ($R = 0,1$ м) после 10 суток ее работы; начальная температура грунта $t_0 = -0,5^\circ\text{C}$, температура поверхности колонки $t_n = -15^\circ\text{C}$, коэффициент температуропроводности $a = 0,002 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Решение. 1. Определяем безразмерные переменные

$$\zeta = \frac{0,5}{0,1} = 5; \quad f_0 = \frac{0,002 \cdot 240}{0,01} = 48;$$

$$\zeta_f = \exp 1,8 \cdot 48^{0,11} = 15,7.$$

2. По формуле (3.17) определяем искомую безразмерную температуру:

$$\theta_n = 1 - \frac{\zeta_n 5}{\zeta_n 15,7} = 0,41.$$

3. Вычисляем искомую размерную температуру

$$t = -0,5 + (-15 + 0,5) \cdot 0,38 \approx -6^\circ\text{C}.$$

§ 3.4. Температурные поля при наличии фазовых переходов грунтовой влаги

Аналитическое решение задачи теплопроводности при фазовых превращениях вещества получено только для одномерного варианта при допущении, что температура фазовых переходов — константа (задача Стефана). Это примерно соответствует действительности для песков и супесей.

Для расчета температур в основаниях сооружений при наличии в грунте фазовых переходов влаги применяются приближенные методы, большинство из которых базируется на известном принципе Лейбензона, заключающемся в представлении нестационарного процесса изменения температуры бесконечной последовательностью стационарных состояний [31]. В результате такой операции темпы промерзания (оттаивания) оказываются завышенными, поскольку из расчета выпадает теплоемкость. Ошибка возрастает с уменьшением влажности грунта W и увеличением размеров сооружения, причем в предельных случаях, когда грунт сухой или размеры сооружения бесконечны (одномерная задача $\theta_c = 1$), физи-

ческий смысл теряется полностью. Получается, что нулевая изотерма достигает любой отметки мгновенно. При достаточном удалении W и θ_c от этих предельных положений формулы, основанные на упомянутом принципе, дают удовлетворительные результаты. Нужно также отметить, что в ряде случаев принцип С.Г. Лейбензона - единственный прием, позволяющий получить сколько-нибудь удовлетворительное решение задачи по определению глубины промерзания или оттаивания грунта.

Общий ход решения задачи на промерзание (оттаивание) грунта в одномерном варианте следующий [36].

Распределение температур в мерзлой (1) и талой (2) зонах определяется в виде

$$t_i = A_i + B_i f_i(y, \tau) \quad i = 1; 2, \quad (3.19)$$

где A и B - постоянные, зависящие от краевых условий:

$$\left. \begin{aligned} t_1(0, \tau) &= t_n, \\ t_1(\xi, \tau) &= t_2(\xi, \tau) = t_\varphi \approx 0, \\ t_2(y, 0) &= t_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

здесь ξ - глубина фазовой изотермы t_φ ; $f(y, \tau)$ - температурная функция, удовлетворяющая условиям $f(0, \tau) = 1$, $f(y, 0) = 0$ и дифференциальному уравнению теплопроводности.

Постоянные A и B находим из краевых условий, затем подставляем их в (3.19) и после преобразования получаем:

$$t_1 = t_n \left[1 - \frac{1 - f_1(y, \tau)}{1 - M_1} \right], \quad (3.21)$$

$$t_2 = t_0 \left[1 - \frac{f_2(y, \tau)}{M_2} \right], \quad (3.22)$$

где M имеет вид $f(y, \tau)$, но с ξ вместо y ; f_1 и f_2 различаются только значениями коэффициента температуропроводности (соответственно α_1 и α_2).

Глубина фазовой изотермы находится из условия Стефана на границе мерзлой и талой зон:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial t_1}{\partial y} \right|_{y=\xi} - \lambda_2 \left. \frac{\partial t_2}{\partial y} \right|_{y=\xi} = q_\varphi \frac{d\xi}{d\tau} \quad (3.23)$$

(где q_φ - затрата тепла на фазовые переходы воды), в которое подставляются (3.21) и (3.22). После преобразо-

вания (3.23), с учетом этих подставок получаем уравнение для $\theta_\varphi = \frac{t_\varphi - t_0}{t_n - t_0}$, из которого можно определить глубину или время промерзания:

$$\theta_\varphi = \frac{1 - K_0(1 - M_1)d\xi / (D_1 \alpha d\tau)}{1 + D_2(1 - M_1)n / (M_2 D_1)}, \quad (3.24)$$

где $K_0 = \frac{2\varphi}{C_1 |t_n - t_0|}$; $F_0 = \frac{\alpha_1 \tau}{\xi^2}$; $n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $D_1 = \left. \frac{\partial f_i(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=\xi}$.

Значение D при известном выражении для НТП найти несложно. Для поверхностного бесконечного источника, когда

$$f(y, \tau) = \text{erfc} \frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}}, \quad D = -\frac{1}{\sqrt{\pi\alpha\tau}} \exp\left(\frac{-y^2}{y\alpha\tau}\right).$$

Для этого же случая из условия постоянства M определяется и $\frac{d\xi}{d\tau}$:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\xi}{2\tau}. \quad (3.25)$$

Уравнения (3.19) – (3.20) при значениях f , D и $\frac{d\xi}{d\tau}$ для бесконечного источника (сектора с $\varphi = 2\pi$) справедливы также для вертикалей, проходящих через вершины бесконечных секторов с $\varphi < 2\pi$, только в этом случае вместо температуры источника t_n подставляется значение t'_n , определяемое по формуле $t'_n = t_n \varphi / (2\pi) + [1 - \varphi / (2\pi)] t_0$.

Ход и общий вид решения для бесконечного цилиндрического источника (задача, сводящаяся к одномерной) аналогичны приведенному выше (но с z вместо y), однако в этом случае неясно, как определить величину $\frac{d\xi}{d\tau}$. Поступим следующим образом. В качестве $f(z, \tau)$ используем приближенное решение (3.17) и примем $t_0 = 0$ (тогда будем иметь дело не с двумя зонами, а с одной).

Подставив выражение (3.17) в (3.21), получаем уравнение, описывающее распределение температур в пространстве

$$t(z, \tau) = t_n \left(1 - \text{erfc} \frac{z}{R} / \text{erfc} \frac{\xi}{R}\right). \quad (3.26)$$

После подстановки (3.26) в условие Стефана и после преобразования будем иметь выражение для времени промерзания (или оттаивания):

$$\tau = \frac{\xi^2 K_0}{2\alpha} \left[\left(\frac{\xi}{R}\right)^2 \left(\text{erfc} \frac{\xi}{R} - 0,5\right) + 0,5 \right]. \quad (3.27)$$

Решение получилось таким же, как у С.Г. Лейбензона [31], который принял распределение температуры, как в цилиндрической стенке при $\zeta = \infty$.

Перепишем (3.27) в виде

$$\theta_{\phi} = 1 - 0,5 K_0 [\zeta^2 (\ln \zeta - 0,5) + 0,5] / F_0. \quad (3.28)$$

Величина $\theta_{\phi} = \text{const}$, следовательно, мы можем написать

$$\frac{d\xi}{d\tau} = - \frac{d\theta_{\phi}}{d\tau} : \frac{d\theta_{\phi}}{d\xi} = \frac{[z^2 (\ln \zeta - 0,5) + 0,5] R}{2\tau \zeta \ln \zeta}. \quad (3.29)$$

В выражение (3.29) не входят граничные температуры, поэтому оно справедливо для любого значения t_0 , а не только $t_0 = 0$.

В общем случае, когда $t_0 \neq 0$, выражение (3.26) относится к первой (ближней к источнику) зоне. Для второй зоны согласно (3.22) и (3.17) имеем другое уравнение:

$$t_2 = \frac{\ln \frac{z}{R} - \ln \frac{\xi}{R}}{\ln \frac{z_0}{R} - \ln \frac{\xi}{R}}. \quad (3.30)$$

Определяем производную D . Подставив ее и (3.29) в уравнение (3.24), найдем выражение для θ_{ϕ} , из которого можно определить радиус или время промерзания (оттаивания) при любом значении t_0 .

На рис. 16 приведен график выражения (3.24) для бесконечного цилиндрического источника при равных теплофизических константах грунта в талом и мерзлом состояниях, который рекомендуется для практического применения (предварительные расчеты показали, что различие теплофизических констант талого и мерзлого грунта мало влияет на величину θ_{ϕ}).

Попробуемся теперь по такой же схеме найти решение рассматриваемой задачи для оси симметрии ($x = z = 0$) конечных источников, где нормаль к изотермам совпадает с осью y , как в одномерной задаче, и, следовательно, условие теплового равновесия на изотермической поверхности $\theta = \theta_{\phi}$ имеет вид (3.23), а температурная функция $f(a, \theta, y, \tau)$ представляет собой правую часть зависимости (3.13) или (3.14) с выражением θ_c , зависящим от формы источника.

Тогда для распределения температур в зонах имеем:

$$t_1 = t_n \left[1 - \frac{1 - \frac{2}{\pi} \Psi_1^u(0,0,\eta,\tau)}{1 - \frac{2}{\pi} \Psi_1^u(0,0,\xi,\tau)} \right], \quad (3.31)$$

$$t_2 = t_0 \left[1 - \frac{\Psi_2^u(0,0,\eta,\tau)}{\Psi_2^u(0,0,\xi,\tau)} \right]. \quad (3.32)$$

Уравнения (3.31)–(3.32) удовлетворяют дифференциальному уравнению теплопроводности только при постоянстве M (знаменателей). Однако в данном случае они не могут быть постоянными, так как при $\theta_c = 1$ (бесконечный

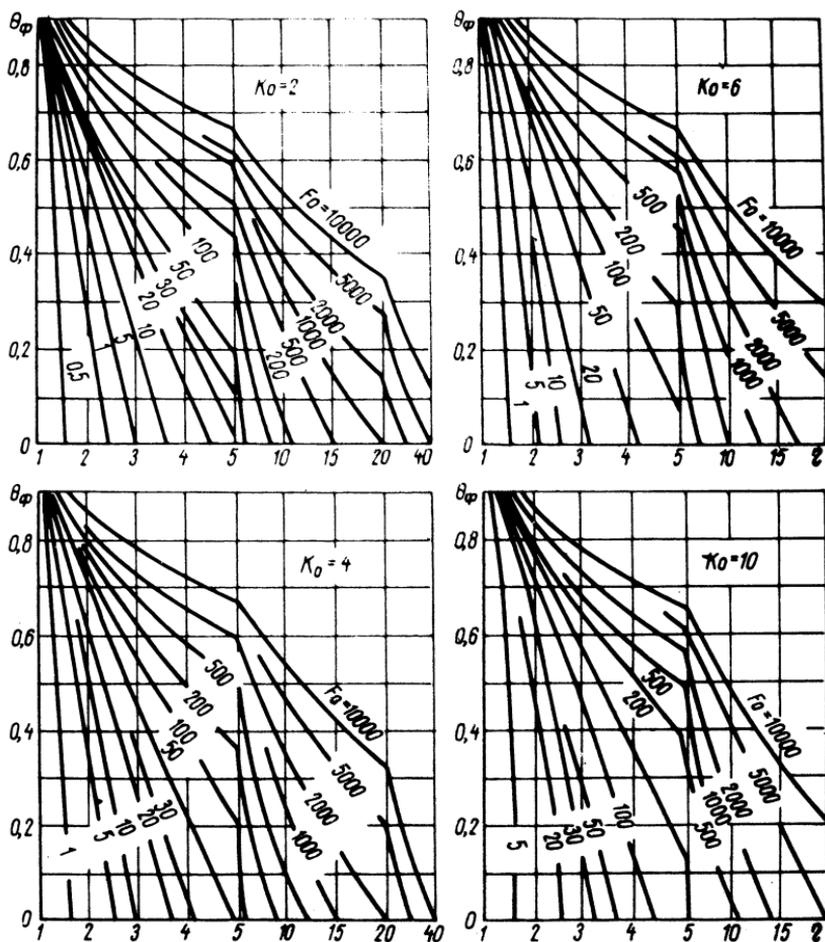


Рис. 16. Зависимость θ_φ от Fo, Ko, ζ

источник) величина M в зависимости от K_0 может принимать значения от 0 до 1 (это следует из аналогичного решения рассмотренной выше одномерной задачи с бесконечным источником на поверхности), а при $\theta_c \neq 1$ и $F_0 = \infty$ она постоянна при любом значении K_0 и составляет

$$\theta_\phi = \frac{t_\phi - t_0}{t_n - t_0}.$$

Допущение $M = const$ равнозначно предположению о том, что температуры на любой глубине достигают своего предельного (стационарного) значения по одномерному закону (3.12). Это предположение весьма близко к действительности, особенно если расчетные значения θ_c вычислять с какой-то допускаемой погрешностью, например 5%. Из рис. 14 видно, что вполне допустимо заменить истинную кривую зависимости θ_n от F_0 (например, при $\theta_c = 0,7$) ломаной линией, идущей от $F_0 = 0$ до $F_0 = 3$ по линии $\theta_c = 1$ (одномерный вариант), а от $F_0 = 3$ до $F_0 \approx \infty$ по пунктирной линии $\theta_c = 0,95 \cdot 0,7 = 0,67 \approx 0,7$. Аналогично при $\theta_c = 0,6$ истинную кривую зависимости θ_n от F_0 вполне допустимо заменить ломаной линией, идущей от $F_0 = 0$ до $F_0 = 1,8$ по линии $\theta_c = 1$, а от $F_0 = 1,8$ до $F_0 \approx \infty$ по пунктирной линии $\theta_c = 0,95 \cdot 0,6 = 0,57 \approx 0,6$.

Из предположения о том, что своего предельного (стационарного) значения температуры достигают по закону (3.12), следует также $\frac{d\xi}{dt} = \frac{\xi}{2\tau}$

Подставив значение $\frac{d\xi}{dt}$ в формулу (3.24), а также раскрывая D_1 , D_2 , M_1 и M_2 с учетом (3.31) и (3.32), после преобразования получаем

$$\theta_\phi = \frac{A - \sqrt{\pi} \frac{K_0}{2\sqrt{F_0}}}{A + B}, \quad (3.33)$$

$$A = \frac{2\sqrt{F_0} \operatorname{tg} \alpha \left\{ 2 \int_0^1 \frac{\exp\left(-\frac{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1}{4F_0}\right)}{(x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)^2} dx_1 + \left(\frac{1}{2\sqrt{F_0}} - 1\right) \int_0^1 \frac{\exp\left(-\frac{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1}{4F_0}\right)}{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1} dx_1 \right\}}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\operatorname{tg} \alpha} \frac{\exp\left(\frac{x_1^2 + 1}{4F_0}\right)}{x_1^2 + 1} dx_1},$$

$$B = \frac{K_0 \sqrt{K_\alpha} 2\sqrt{F_0} \operatorname{tg} \alpha \left\{ 2 \int_0^1 \frac{\exp\left(-\frac{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1}{4F_0 \cdot R_\alpha}\right)}{(x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)^2} dx_1 + \left(\frac{1}{2F_0 K_\alpha} - 1\right) \int_0^1 \frac{\exp\left(-\frac{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1}{4F_0 K_\alpha}\right)}{x_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1} dx_1 \right\}}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\operatorname{tg} \alpha} \frac{\exp\left(\frac{x_1^2 + 1}{4F_0 K_\alpha}\right)}{x_1^2 + 1} dx_1},$$

$$Fo = \frac{\alpha_1 \tau}{\xi^2}; \quad K_\alpha = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}; \quad K_\beta = \sqrt{\frac{\lambda_2 c_2}{\lambda_1 c_1}}; \quad \alpha = 0,5\pi\theta_c; \quad \theta_\varphi = \frac{t_\varphi - t_0}{t_n - t_0}$$

Из формулы (3.33) можно определить глубину или время промерзания под центром сооружения любой симметричной относительно центра формы. Форма сооружения в этом решении опосредована выражением для стационарной температуры θ_c , входящей в выражение для α . На рис. 17 приведен графический вид решения (3.33) при равных коэффициентах тепло- и температуропроводности грунта в талом и мерзлом состояниях. Температуры, в том числе фазовая, в других точках полупространства определяются так же, как описано выше для НТП заглубленных сооружений, — по изолиниям стационарных температурных полей, с использованием решения для оси симметрии.

Для пояснения предлагаемой методики расчета температурных полей в промерзающем грунте приведем пример. Дано: среднегодовая температура поверхности грунта в подполье длинного здания шириной 12 м $t_n = -4^\circ\text{C}$, температура на глубине 10 м до застройки $t_0 = 2^\circ\text{C}$; характеристики грунта: $\gamma_{ск} = 1500 \text{ кг/м}^3$, $W_c = 0,1$, $\lambda_m = \lambda_\tau = 1,16 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; $\alpha_m = \alpha_\tau = 0,002 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Определить, через какое время τ_φ фазовая температура (примерно 0°C) достигает глубины $y = 6 \text{ м}$ под центром здания и какие температуры на этот момент будут на отметках $y = 3 \text{ м}$ и $y = 8 \text{ м}$.

1. Вычисляем вспомогательные величины для определения τ_φ :

$$\theta_\varphi = \frac{t_\varphi - t_0}{t_n - t_0} = \frac{0 - 2}{-4 - 2} = 0,33; \quad K_0 = \frac{\gamma_\varphi}{c_1 |t_n - t_0|} = \frac{80 \cdot 1500 \cdot 0,1}{500 \cdot 6} = 4;$$

$$\theta_c = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{0,5B}{y} = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{6}{6} = 0,5.$$

2. По графику на рис. 17 для вычисленных θ_φ , θ_c и K_0 находим $Fo = \alpha \tau_\varphi / y^2$: $Fo = 7$.

Откуда

$$\tau_\varphi = \frac{7 \cdot 36}{0,002} = 126000 \text{ ч} \approx 14,4 \text{ года.}$$

3. Определяем относительные стационарные температуры под центром здания на глубинах 3 и 8 м:

$$\theta_c = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{6}{3} = 0,71, \quad \theta_c = 0,41.$$

$y = 3 \qquad \qquad \qquad y = 8$

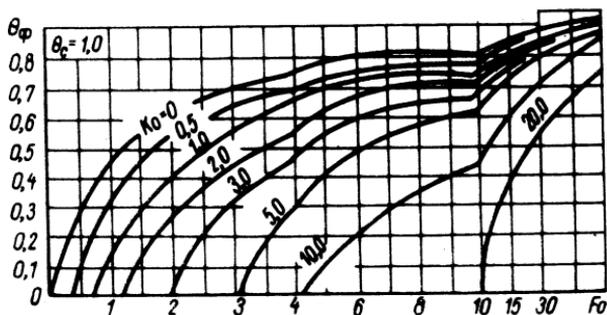
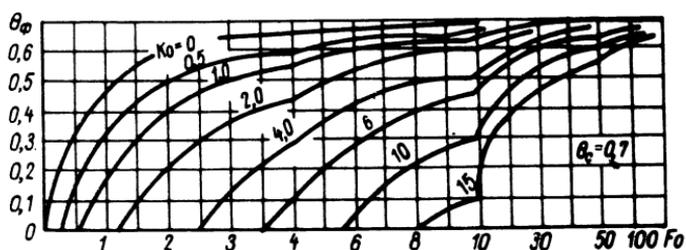
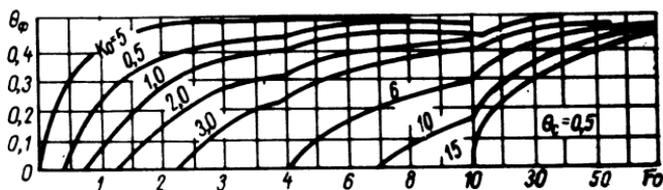
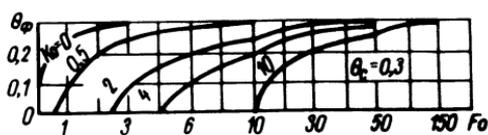


Рис. 17. Зависимость θ_{ϕ} от θ_c , Ko , Fo

4. Для этих же глубин рассчитываем Fo :

$$F_o = \frac{0.002 \cdot 126000}{9} = 28; \quad F_o = 4.$$

$y=3$ $y=8$

5. По графикам, представленным на рис. 17, и в зависимости от θ_c и F_0 при $K_0 = 0$ находим: $\theta_H = 0,698$, $\theta_H = 0,38$.

6. По графику рис. 17 для $K_0 = 0$ и $F_0 = 7$ определяем θ_ϕ , которая [см. (3.21)] соответствует величине M :

$$\theta_\phi = M_1 = 0,49.$$

7. С помощью формул (3.21)–(3.22) рассчитываем температуры на глубинах 3 и 8 м:

$$t_{y=3} = -4 \left(1 - \frac{1-0,698}{1-0,49} \right) = -1,63^\circ\text{C},$$

$$t_{y=8} = 2 \left(1 - \frac{0,38}{0,49} \right) = 0,45^\circ\text{C}.$$

Интересно сравнить время промерзания грунта в основаниях сооружений до заданной глубины, найденное с применением метода С.Г. Лейбензона [31] и по графикам рис. 17. Результаты такого сравнения для оси симметрии поверхностного сооружения в форме бесконечной полосы приведены в табл. 13. Для сопоставимости данных безразмерные функции и переменные, входящие в соответствующее решение работы [31], выражены в величинах, употребляемых в этой же работе, а именно:

$$\frac{\xi}{0,5B} = 0,5 \operatorname{ctg} 0,5 \pi \theta_c,$$

$$J = \frac{(1 - \theta_\phi) 4 F_0}{K_0 (\operatorname{tg} 0,5 \pi \theta_c)^2},$$

$$\beta = \frac{\theta_\phi h}{1 - \theta_c}.$$

Табл. 13 показывает, что относительная разница между F_0 , найденными сравниваемыми способами, как и следовало ожидать, увеличивается с уменьшением K_0 и увеличением θ_c .

При $K_0 = 0$ либо $\theta_c = 1$ эта разница (или, можно сказать, погрешность величины F_0 , найденной по графикам в работе [31]) возрастает до бесконечности (поскольку при этих значениях K_0 и θ_c выражение (3.33) превращается в известные точные аналитические формулы). В целом значения F_0 , рассчитанные с помощью (3.33), выше

Таблица 13

Значения обобщенного времени промерзания F_0

Исходные данные	При θ_c , равной						
	0,29	0,40	0,50	0,57	0,66	0,76	1,00
$\theta_\phi=0,29, K_\rho=0,5$	$\frac{\infty}{2,1}$	$\frac{1}{2,1}$	$\frac{0,55}{1,25}$	$\frac{0,43}{1,1}$	$\frac{0,39}{1}$	$\frac{0,35}{1}$	$\frac{0}{1}$
$\theta_\phi=0,29, K_\rho=1$	$\frac{\infty}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1,1}{2}$	$\frac{0,88}{1,7}$	$\frac{0,76}{1,6}$	$\frac{0,7}{1,58}$	$\frac{0}{1,5}$
$\theta_\phi=0,29, K_\rho=3$	$\frac{\infty}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{3,4}{5}$	$\frac{2,6}{3,9}$	$\frac{2,3}{3}$	$\frac{2,1}{2,9}$	$\frac{0}{2,8}$
$\theta_\phi=0, K_\rho=0,5$	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,4}{0,45}$	$\frac{0,3}{0,4}$	$\frac{0,3}{0,3}$	$\frac{0,26}{0,26}$	$\frac{0,26}{0,26}$	$\frac{0,26}{0,26}$
$\theta_\phi=0, K_\rho=1$	$\frac{0,95}{0,95}$	$\frac{0,8}{0,9}$	$\frac{0,65}{0,7}$	$\frac{0,6}{0,68}$	$\frac{0,55}{0,65}$	$\frac{0,5}{0,62}$	$\frac{0}{0,6}$
$\theta_\phi=0, K_\rho=3$	$\frac{2,7}{2,7}$	$\frac{2,4}{2,5}$	$\frac{1,9}{2,2}$	$\frac{1,8}{2}$	$\frac{1,7}{1,8}$	$\frac{1,5}{1,7}$	$\frac{0}{1,7}$

Примечание. В числителе дроби даны значения F_0 , найденные с помощью графиков в работе [31], в знаменателе - приведенные на рис. 17.

F_0 , найденных известным способом, т.е. темпы промерзания (или оттаивания), определяемые по методике, изложенной в [31], получаются завышенными.

Возможность применения предлагаемой методики для определения хода фазовой изотермы проверялась также экспериментом.

Большинство задач на промерзание грунта удается решить только с помощью ЭВМ. Трудности, с которыми при этом приходится сталкиваться, известны [22]. Они связаны главным образом с представлением о фронтальном характере промерзания ($t_\phi = const$), прежде всего с обусловленной этим представлением необходимостью определения подвижной границы между мерзлой и талой зонами, скорость передвижения которой заранее неизвестна.

Этих трудностей можно избежать, если представлять процесс фазовых превращений постепенным, протекающим в некотором диапазоне отрицательных температур, что физичес-

ки более верно. Расчеты на ЭВМ в этом случае можно выполнять по известной явной разностной схеме, учитывающей зависимость коэффициентов от температуры, разработанной А.П. Ваничевым [36].

Единственная трудность, которая при этом возникает, — учет скачкообразного изменения теплоемкости при переходе температуры через $t_{н.з}$. Она преодолевается, например, с помощью следующей формулы, непрерывно описывающей зависимость эффективной теплоемкости от температуры в возможном диапазоне ее изменения:

$$C_3 = C_T + \{C_M [1 + k(|t| + \Delta)^{-1,25}] - C_T\} \exp(-|t - t_{н.з}| \cdot 10^6). \quad (3.34)$$

где $k = t_{н.з}^{0,25} \gamma_{СК} W_0 \rho / (4C_M)$; $\phi = (t - t_{н.з}) / |t - t_{н.з}|$; $\Delta \approx 0,01$; W_0 — влажность грунта на начало промерзания; C_M и C_T — объемные теплоемкости полностью промерзшего и талого грунтов; ρ — удельная теплота кристаллизации.

Выражение (3.34) подобрано так, что в области $t < t_{н.з}$ оно практически обращается в найденную эмпирически (см. гл. 2) зависимость эффективной теплоемкости от температуры:

$$C_3 = C_M [1 + k(|t| + \Delta)^{-1,25}]. \quad (3.35)$$

Величина Δ в формулах (3.34) и (3.35) характеризует инерционность физических свойств воды. В результате инерционности, в частности, содержание незамерзшей воды в охлаждаемом грунте, соответствующее данной температуре, устанавливается с некоторым запаздыванием, за время которого температура успевает понизиться на величину Δ . Определить эту величину не представляется возможным, но, несомненно, что она невелика и в большинстве практических расчетов ею можно пренебречь. Однако введение ее в расчет позволяет физически обосновать возможность применения одного дифференциального уравнения вида

$$C_3 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (3.36)$$

для описания температурных полей влажного грунта во всем диапазоне изменения температуры, в том числе при переходе ее через $t_{н.з}$.

Дальнейший анализ показал, что задачу теплопроводности в промерзающем грунте при описании ее дифференциальным уравнением (3.36) можно решать методом последовательных

приближений, значительно проще, по сравнению с методом конечных разностей, реализуемым на ЭЦВМ, а зачастую позволяющим получить решение и без ЭЦВМ.

Сущность метода, его обоснованность применительно к анализу двух- и трехмерных температурных полей в основаниях инженерных сооружений покажем на примере.

Пусть требуется определить температуру под зданием прямоугольной формы при следующих исходных данных: температура поверхности грунта под сооружением равна $t_{\Pi} = -5^{\circ}\text{C}$, начальная температура равна температуре поверхности грунта вне сооружения $t_0 = -0,2^{\circ}\text{C}$, теплофизические константы C и λ в мерзлом и талом состояниях равны (в этом случае λ в правой части (3.36) выносятся за знак производной и теплоперенос можно характеризовать отношением λ к C - коэффициентом температуропроводности), причем: $C = 500 \text{ ккал/м}^3\cdot^{\circ}\text{C}$; $\frac{1}{2\sqrt{k\tau}} = \frac{4\sqrt{C_3}}{2\sqrt{\lambda\tau}} = 0,01\sqrt{C_3}$; $k = 5$; $\theta_c = 0,5$ (откуда $t_{(x,z,y)} = 0,5(-4,8) - 0,2 = -2,6^{\circ}\text{C}$).

Из условий примера заключаем, что величина эффективной теплоемкости, определяемая искомой температурой, должна лежать где-то в интервале значений C_3 , вычисленных по формуле (3.35) для $t = t_0 = -0,2$ и $t = t_{(x,z,y)} = -2,6$, т.е. $C_{-0,2} > C_3 > C_{-2,6}$, или в цифровом выражении (в ккал/(м³·°C)), $19192 > C_3 > 1257$.

С помощью формул (3.16) или (3.14) находим температуры, соответствующие этим теплоемкостям, тогда имеем для $C_3 = 19192 \text{ ккал/(м}^3\cdot^{\circ}\text{C)}$ $t_1 = -0,44^{\circ}\text{C}$, для $C_3 = 1257 \text{ ккал/(м}^3\cdot^{\circ}\text{C)}$ $t_2 = -2,4$.

Поскольку в грунте идет непрерывное понижение температуры от t_0 до $t_{(x,z,y)}$ и соответственно непрерывное уменьшение теплоемкости относительно $C_3 = 19192 \text{ ккал/(м}^3\cdot^{\circ}\text{C)}$, то совершенно очевидно, что фактическая эффективная теплоемкость должна быть меньше величины C_3 , вычисленной для постоянной температуры $t_1 = -0,44$. Если же рассматривать последовательность температур в охлаждающемся грунте в обратном порядке, от предельной температуры $t_{(x,z,y)}$ до t_0 , то можно заключить также, что фактическая эффективная теплоемкость должна быть больше C_3 , вычисленной для постоянной температуры $t_2 = -2,4^{\circ}\text{C}$. Следовательно, условие (3.36) можно уточнить:

$$C_{-0,44} > C_3 > C_{-2,4}$$

Условие (3,36), рассуждая аналогичным образом, уточняется до тех пор, пока члены рассматриваемых последовательностей температур (или теплоемкостей) с допустимой погрешностью (какой угодно малой) не начнут повторяться или последовательности не сойдутся. Члены (1, 2, 3, 4, 5, 6) указанных последовательностей, образуемые уточнениями левой 1 и правой 2 частей (3,36), рассчитанные по предлагаемой методике, даны ниже:

№ члена	1	2	3	4	5	6
C_1 , ккал/(м ³ .°С)...	-	19192	7476	2391	1477	1355
C_2 , ккал/(м ³ .°С)...	-	1257	1337	1345	1355	1355
t_1 , °С	-0,2	-0,44	-1,25	-2,12	-2,36	-2,36.
t_2 , °С	-2,6	-2,4	-2,38	-2,36	-2,36	-2,36

Из приведенных значений видно, что последовательности сходятся довольно быстро: в рассматриваемом примере, с точностью до сотых, они сходятся начиная с четвертого члена, а если рассматривать каждую из последовательностей отдельно, то при начале счета с $t_1 = t_{(x,z,y)}$ - уже со второго члена.

Анализ расчетов показывает, что для ускорения решения вторые члены целесообразно находить в обеих последовательностях температур, а затем окончательное решение искать, используя ту из них, второй член которой изменился по сравнению с первым членом в большее число раз.

При этом процедуру решения можно выразить следующей формулой:

$$t = t_0 + (t_n - t_0) \left[\operatorname{erfc} E k_1^{0,5} - \left(1 - \theta_c \operatorname{erfc} \frac{E k_1^{0,5}}{1 - \theta_c} \right) \right], \quad (3.37)$$

$$k_1 = 1 + k (|t_i| + \Delta)^{-1,25}, \quad (3.38)$$

где t_i - температура, определяемая по формуле (3.37), но с k_2 вместо k_1 ; k_2 - коэффициент, определяемый по формуле (3.38), но с t_{i+1} вместо t_i ; t_{i+1} - температура, определяемая по формуле (3.37), но с k_3 вместо k_2 , и т.д.; $E = \frac{y\sqrt{c_1}}{2\sqrt{\lambda r}}$; c_1 - теплоемкость, соответствующая начальной или предельной температуре.

При изменении температуры только в области $t < t_{n_3}$ величиной можно пренебречь.

Выражения (3.37) и (3.38) целесообразно привести к относительному (обобщенному) виду. Совместив начало отсчета

температуры в зависимости (3.38) с t_0 , после ряда несложных преобразований получаем:

$$\theta_n = \operatorname{erfc} Ek_1^{0,5} - (1 - \theta_c) \operatorname{erfc} \frac{Ek_1^{0,5}}{1 - \theta_c}; \quad (3.39)$$

$$k_1 = 1 + \alpha \theta_i^{-1,25}, \quad (3.40)$$

где $\theta_n = (t_{(x,y,z,\tau)} - t_0) / (t_n - t_0)$; $\alpha = k |t_n - t_0|$; θ_i — безразмерная температура, определяемая по формуле (3.39), но с k_2 вместо k_1 ; k_2 — коэффициент, определяемый по формуле (3.40), но с θ_{i+2} вместо θ_{i+1} , и т.д. по аналогии с расчетом по формулам (3.37) и (3.38).

Таким образом, θ при $t < t_{n,0}$ является функцией обобщенных переменных $E = \frac{t}{2\sqrt{Fo}}$, θ_c и α . На рис. 18,а приведены графики этой функции (сплошные линии) для трех значений θ_c и α , построенные по данным расчетов по формуле (3.39). Расчеты выполнялись так, как это показано в приведенном примере. Для каждого варианта сочетания переменных расчет считался законченным, когда очередной член последовательности отличался от предшествующего на 0,001.

Эти графики с погрешностью около 10% аппроксимированы выражением

$$\theta_n = \theta_c \exp \left[-b_1 E^{b_2(2,6 - 1,6\theta_c)} \right], \quad (3.41)$$

где $E = \frac{y\sqrt{c_m}}{2\sqrt{\lambda\tau}} = \frac{1}{2\sqrt{Fo}}$, c_m — теплоемкость полностью промерзшего грунта; b_1 и b_2 — коэффициенты, определяемые по графику на рис. 18,б в зависимости от θ_c и α .

При $\alpha = 0$ формула (3.41) превращается в уравнение

$$\theta_n = \theta_c \exp \left[-(0,43 + 1,47\theta_c) E^{(3,25 - 2\theta_c)} \right], \quad (3.42)$$

которая с погрешностью около 2–3% аппроксимирует аналитическую формулу (3.14).

Формулу (3.41) удобно использовать при расчете θ_n для промежуточных значений α и θ_c , кроме того, из нее в ряде случаев, в частности при $\theta_c = 1$, можно получить выражение для y и τ .

Изложенный метод расчетов, как это следует из самой процедуры расчета, применим тогда, когда изменение теплоемкости с изменением температуры происходит непрерывно и монотонно, так, что каждому значению температуры соответствует одно значение теплоемкости. Этим требованиям от-

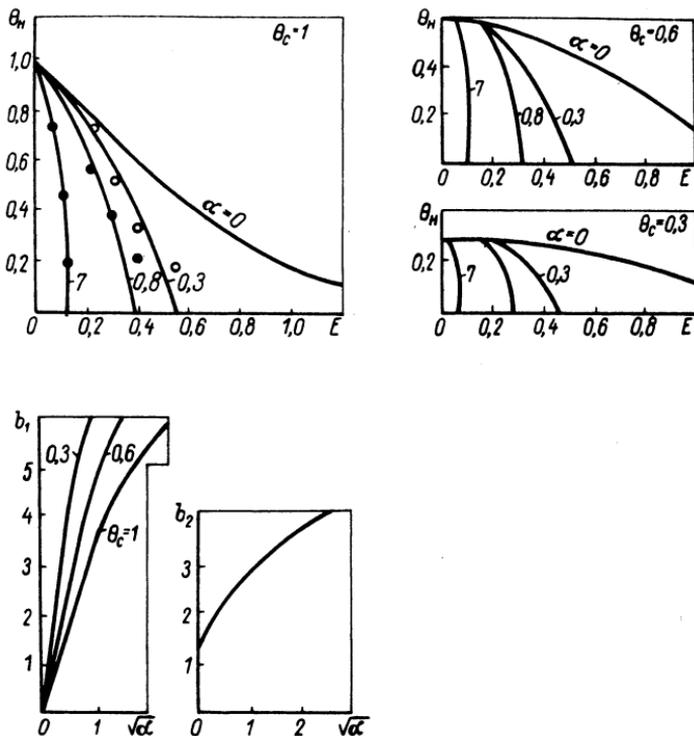


Рис. 18. Графики для θ_n , b_1 и b_2

вечает изменение теплоемкости грунта в области отрицательных температурных значений.

Вообще говоря, метод последовательных приближений справедлив для многих задач, встречающихся в практике проектирования на вечномёрзлых грунтах (например, при проектировании охлаждающих устройств и расчете оснований на пластично-мёрзлых грунтах). Однако для описания температурных полей во всем возможном диапазоне изменения температуры он не применим, так как при переходе температуры через $t_{н.з}$ происходит сначала резкое повышение эффективной теплоемкости грунта, а затем постепенное ее понижение, в результате чего одно и то же значение теплоемкости может соответствовать разным значениям температуры.

Покажем другой, более универсальный, хотя и менее точный, аналитический метод расчета температурных полей грунта, пригодный во всем диапазоне изменения температуры.

Из рассмотренного выше примера определения температуры грунта методом последовательных приближений видно, что температуру грунта при переменной теплоемкости можно вычислять по тем же формулам, что и в случае с постоянной теплоемкостью, подставляя в них некоторую "среднюю" теплоемкость, лежащую в промежутке между значениями теплоемкости, соответствующими температурам, разность которых определяет температурный напор $t_n - t_0$.

Величину теплового напора можно разбить на отрезки столь малые, что теплоемкость при изменении температуры внутри каждого отрезка будет постоянно равной среднеарифметическому из теплоемкостей, соответствующих температурам на концах этого отрезка.

Предположим теперь, что величина изменения температуры $t - t_0$ равна сумме этих отрезков температурного напора, помноженных на значение функции пространственных и временной координат, аналогичной таковой для случая с постоянной теплоемкостью, в которых фигурируют среднеарифметические из теплоемкостей, рассчитанных по температурам на концах каждого отрезка. Если в области непрерывного изменения теплоемкости ($t < t_{н.з}$) температурный напор разбить на бесконечно малые отрезки, это предположение для температур под центром сооружений можно записать в интегральном виде следующим образом:

$$t - t_0 = \int_{t_0}^{t_n} \left[\operatorname{erfc} EK^{0.5} - (1 - \theta_c) \operatorname{erfc} \frac{EK^{0.5}}{1 - \theta_c} \right] dt, \quad (3.43)$$

здесь $K = 1 + k|t|^{-1.25}$

Если же $t_0 > t_{н.з}$, то правая часть (3.43) интегрируется в пределах от $t_{н.з}$ до t_n и к ней прибавляется слагаемое

$$(t_{н.з} - t_0) \left[\operatorname{erfc} E_T - (1 - \theta_c) \operatorname{erfc} \frac{E_T}{1 - \theta_c} \right],$$

где $E_T = y\sqrt{c_r} / (2\sqrt{\lambda r})$.

Аналогично для случая оттаивания грунта ($t_n > t_{н.з}$, $t_0 < t_{н.з}$) имеем

$$t - t_0 = \int_{t_0}^{t_{н.з}} \left[\operatorname{erfc} EK^{0.5} - (1 - \theta_c) \operatorname{erfc} \frac{EK^{0.5}}{1 - \theta_c} \right] dt + \\ + (t_n - t_{н.з}) \operatorname{erfc} E_T - (1 - \theta_c) \operatorname{erfc} \frac{E_T}{1 - \theta_c}.$$

На графике рис. 18,а, соответствующем $\theta_c = 1$, значениями (○ и ●) показаны результаты расчетов θ_n по формуле (3.43) для случая $t_n < t_o < t_{н.з.}$.

Как видно из сравнения, результаты расчета по формулам (3.39) и (3.43) различаются в пределах допустимого. Следовательно, можно говорить о возможности применения формулы (3.43) в практических расчетах. При этом для удобства целесообразно использовать в качестве функций координат выражение (3.42) вместо (3.14). Таким же образом можно получить решение задачи теплопроводности с фазовыми переходами грунтовой влаги для любой конфигурации теплового источника и сочетания краевых условий, если заранее известно решение для случая отсутствия фазовых переходов.

ГЛАВА 4 ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУНТОВ КАК ОСНОВАНИЙ

§ 4.1. О выборе принципа использования грунтов как оснований

На рассматриваемой территории преимущественно распространена островная мерзлота (см. рис. 2). Тепловое состояние грунтов характеризуется неоднородностью и термодинамической неустойчивостью, среднегодовые температуры на большей части территории близки к нулю, в результате чего малейшее изменение внешних условий теплообмена может привести к промораживанию талых и оттаиванию мерзлых грунтов. Эти обстоятельства, а также требования строительных норм, не допускающих использования грунтов в качестве основания одного сооружения (за исключением линейных) одновременно в талом и мерзлом состояниях, определяют важную особенность проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений, заключающуюся в необходимости приведения грунтов к теплофизически однородному виду, т.е. в предпостроечном оттаивании островов мерзлого грунта (принцип I) или промораживании и охлаждении до твердо-

мерзлого состояния участков талого грунта (принцип II) в зависимости от выбранного принципа строительства. Кроме того, при таких грунтах повышаются требования к мероприятиям по сохранению в процессе эксплуатации расчетного температурного режима.

Анализ природных условий позволяет установить возможность, а иногда и предпочтительность применения того или иного принципа использования грунтов в качестве оснований с точки зрения возможности приспособления эксплуатационного режима здания или сооружения к естественному ходу теплообмена в системе атмосфера — литосфера и объективной тенденции его изменения в результате застройки. Если судить по наблюдаемому в естественных условиях центральной и северной частях Западной Сибири тепловому состоянию грунтов, то использование грунта в качестве оснований по принципу II для строительства в этих районах будет ошибочным, так как преимущественное распространение в естественных условиях здесь имеют талые грунты. Однако изучение закономерностей изменения климатических, гидрогеологических и мерзлотно-грунтовых условий в результате строительства приводит к противоположному выводу. В самом деле, тепловое состояние грунта (его температурный режим, наличие или отсутствие вечной мерзлоты и т.д.), как известно, обусловлено целым комплексом природных факторов, из которых важнейшими являются температура воздуха, снежный и растительный покровы, водный режим и т.п. Оценка перечисленных факторов дана в гл. 1 и коротко сводится к следующему: среднегодовые температуры воздуха на всей территории низкие (от -3°C на юге до -8°C на севере); в зимний период повсеместно устанавливается мощный снежный покров, отепляющее воздействие которого велико, особенно в зоне тайги, и достигает $3-4^{\circ}\text{C}$; повсюду развит мощный комплекс торфяно-болотных отложений, также являющийся хорошим теплоизолятором минерального грунта; степень обводненности территории велика, т.е. взаимодействие перечисленных факторов, определяющих тепловое состояние грунтов в Западной Сибири, таково, что только первый из них — температура воздуха — благоприятствует промерзанию грунтов и обеспечению их мерзлого состояния, прочие же факторы препятствуют существованию вечной мерзлоты.

Именно этим объясняется неоднородность теплового состояния грунтов в условиях западно-бугристого рельефа рассматриваемой территории: острова вечномерзлого грунта

располагаются в основаниях крупных бугров, с которых зимой сдувается снег, и вследствие этого они подвержены воздействию низких отрицательных температур и отсутствуют в западинах, где в зимний период откладывается мощный снежный покров (до 1,5–2 м), препятствующий образованию вечной мерзлоты.

На застроенной территории снежный покров уплотняется или удаляется вовсе, растительный и торфяной покров в значительной степени разрушается. Объективной тенденцией изменения влажности грунтов является ее уменьшение; все это увеличивает степень воздействия отрицательных температур воздуха на температурный режим грунта и приводит к новообразованиям вечной мерзлоты.

Нужно еще иметь в виду то, что грунты рассматриваемой территории – заторфованные, сильноольдистые, как правило, явно просадочны при оттаивании; их относительная осадка δ значительно больше 0,02. Использование таких грунтов в качестве оснований по принципу II оказывается невозможным [38].

С учетом сказанного можно сделать вывод о том, что на широте 65° и севернее 65-й параллели предпочтительно использовать принцип I, а на территориях южнее 65-й параллели – принцип II (в большинстве случаев с последующим упрочнением оттаявших грунтов). Однако и здесь с точки зрения соответствия природным условиям и закономерностям их изменения после застройки вполне возможно применение принципа I.

§ 4.2. Определение толщины деятельного слоя

Известно большое количество формул для определения толщины деятельного слоя h_d , критический их обзор приведен, например, в работах [21, 22]. Отметим только, что преобладающее большинство применяемых на практике формул является модификациями известной формулы Стефана, дополнительно учитывающими затраты тепла на нагрев или охлаждение грунта, и что результаты, получаемые при использовании этих формул, различаются незначительно.

Наиболее удобной формой систематизации данных по величине h_d является, как известно, составление схематических карт ее распределения для условий какой-нибудь одной разновидности грунта с приложением таблиц (графиков)

поправочных коэффициентов для перехода к характеристикам других грунтов.

Выполнение такой работы возможно при следующих исходных предпосылках:

1. Закономерности пространственного распределения глубин деятельного слоя связаны с климатическими условиями, которые по сравнению с инженерно-геологическими значительно меньше изменяются от места к месту и на территории (в районе) определенной протяженности могут быть приняты постоянными. Инженерно-геологические же условия внутри такого района различны, практически возможно наличие всех грунтовых разновидностей.

2. Толщина деятельного слоя описывается такой формулой, в которой можно "разделить переменные" (климатические и инженерно-геологические показатели), для того чтобы в поправочные коэффициенты не входили климатические параметры.

Первая предпосылка вытекает из закона географической зональности, подтверждается натурными данными и не требует специального обоснования; вторая обусловлена тем, что при введении коэффициентов, зависящих от климатических показателей, такая форма систематизации теряет смысл, так как определение этих коэффициентов не менее трудоемко, чем определение собственно h_g . Как следует из анализа существующих формул, вторая предпосылка фактически означает, что значения h_g должны определяться из наиболее простой модификации формулы Стефана.

$$h_g = \sqrt{\frac{2 t_n \tau \lambda}{\rho \gamma_{ск} (W_c - W_n)}}, \quad (4.1)$$

где t_n — средняя за период промерзания или оттаивания температура поверхности грунта, при расчете глубины сезонного оттаивания определяется по данным метеостанции или вычисляется по формуле типа (1.1), но без третьего слагаемого, и по среднелетним величинам температуры воздуха t_g , радиационного баланса B , затрат тепла на испарение λE и коэффициента конвективного теплообмена α , а при расчете глубины сезонного промерзания t_n принимается равной среднезимней температуре воздуха; τ — продолжительность зимнего (или летнего — при определении сезонного оттаивания) периода; λ — коэффициент теплопроводности мерзлого (талого) грунта.

Методика определения величин B , LE , α изложена в гл. 1. Только с помощью формулы (4.1) удается получить поправочные коэффициенты, независимые от t_n .

Обозначим показатели грунтовых характеристик в формуле (1.1), для которых рассчитывается величина h_k (картографируется). Тогда выражение для поправочного коэффициента k_n будет иметь вид

$$k_n = \frac{k_i}{k_k} = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\lambda_k}} \sqrt{\frac{\gamma_{скк} (W_c - W_n)_k}{\gamma_{скi} (W_c - W_n)_i}} = k_1 k_2, \quad (4.2)$$

где величины с индексом i — характеристики грунта площадки, для которой определяются h_g .

Возможность использования для расчетов h_g формулы (4.1) проверялась сравнением вычисленных и фактических значений глубин сезонного промерзания для Березово, Няксимволь и Октябрьское. Фактические значения h_g приняты по данным метеостанций. По данным метеостанций взяты и значения климатических параметров, входящих в расчетные формулы. На площадках метеостанций отобраны пробы грунта и определены его физические и теплофизические свойства (табл. 14).

Т а б л и ц а 14

Осредненные значения физических и теплофизических свойств грунтов на площадках метеостанций Березово, Няксимволь, Октябрьское

Вид грунта (пункт)	$\gamma_{ск},$ кг/м ³	$W,$ доли единицы	$\lambda_m,$ Вт/м·С	$\lambda_r,$ Вт/м·С	$a_m,$ м ² /ч	$\alpha_{r,2}$ м ² /ч
Глина (Березово)	1380	0,29	1,4	1,27	0,0027	0,0017
Суглинок с при- месью гравия (Няксимволь)	1500	0,12	1,15	0,9	0,0024	0,0018
Суглинок (Ок- тябрьское)	1860	0,24	1,86	1,6	0,0029	0,0022

В табл. 15 приведены фактические значения глубины сезонного промерзания h_g для указанных пунктов, а также h_g , вычисленные по формуле (4.1), и h_g , найден-

Исходные данные расчета и значения h_g, h'_g, h''_g на площадках метеостанций в Березово, Октябрьском и Няксимволе

Годы	$\tau, \text{мес}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$h_{сн}, \text{м}$	$h_g, \text{м}$	$h'_g, \text{м}$	$h''_g, \text{м}$
Березово						
1955	6	-15,7	0,43	1,07	1,10	1,09
1957	6	-16,2	0,62	0,80	0,90	0,80
1959	6	-15,7	0,42	1,00	1,16	1,10
1961	6	-12,5	0,35	1,28	1,10	1,08
Октябрьское						
1964	6	-17,1	0,66	1,04	0,92	0,81
1965	6	-13,5	0,90	0,47	0,50	0,45
Няксимволь						
1961	6	-11,0	0,44	1,60	1,40	1,30
1963	4	-11,5	0,35	0,8	1,15	1,1
1965	6	-14,8	0,50	1,2	1,5	1,4
1967	4	-14,1	0,29	1,6	1,5	1,4

ные по аналогичной формуле, вошедшей в СНиП П-18-76, но учитывающей теплоемкость промерзающего грунта (прибавлением к знаменателю величины $0,5 c_m t_n$). Снежный покров в расчетах учитывался методом "эквивалентного слоя"

$$h_g^c = \sqrt{h_g^2 + (\lambda_m R_{сн})^2} - \lambda_m R_{сн}, \quad (4.3)$$

где h_g^c - глубина деятельного слоя при наличии снежного покрова; h_g - то же, при его отсутствии.

Проведенное сравнение показывает вполне удовлетворительную сходимость фактических глубин промерзания с вычисленными по формулам: разница между ними не превышает в среднем 10-15%. Из таблицы также видно, что учет теплоемкости не намного улучшает точность расчетов. По-видимому, это связано, во-первых, с приближенностью обеих расчетных формул, во-вторых, с малостью величины $t_n c_m$ по сравнению с $\rho \gamma_{ск} (W_c - W_n)$.

На рис. 19 нанесены изолинии глубин h_g , вычисленных по формуле (4.1), т.е. для случая, когда снежный покров отсутствует, для песчаных грунтов с $W_c = 0,1$ и

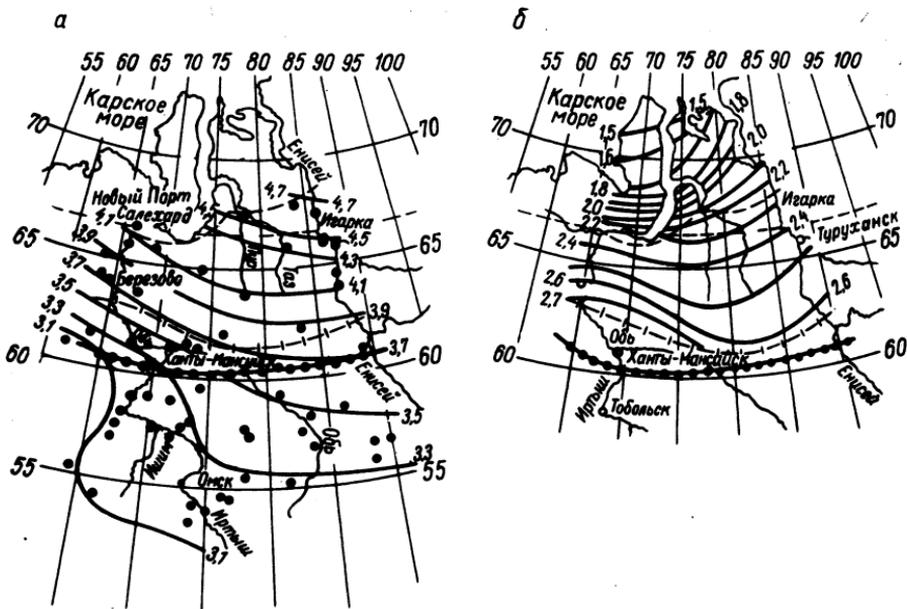


Рис. 19. Схематические карты глубин максимального сезонного промерзания (а) и оттаивания (б) песчаных грунтов, рассчитанных по формуле (4.1)

— — изолинии глубин промерзания и оттаивания; - - - - южная граница области сплошной вечной мерзлоты; - · - · - южная граница островной вечной мерзлоты; ● — пункты, для которых рассчитывалась глубина сезонного промерзания или оттаивания; - · - · - южная граница реликтовой мерзлоты

$\gamma = 1,8 \text{ г/см}^3$. Глубины сезонного оттаивания рассчитаны для районов сплошного и островного распространения вечной мерзлоты, а глубины сезонного промерзания — для районов, расположенных южнее области сплошной мерзлоты.

При расчете переходных коэффициентов $k_n = k_1 k_2$, позволяющих определить глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов, отличающихся от тех, для которых составлены схематические карты, преследовалась цель охватить все грунтовые разности, встречающиеся в северной части Западной Сибири, в том числе заторфованные и сильно-льдистые, и представить полученные величины k_1 и k_2 в удобном для практического применения виде.

Проанализируем, как изменяются коэффициенты k_1 и k_2 в зависимости от физических свойств грунтов и фазового состава грунтовой влаги.

Коэффициент k_1 , так же как и входящий в него коэффициент теплопроводности, определяется обобщающим показателем — степенью водонасыщения W_c/W_n .

В формулу (4.1) при вычислении глубины оттаивания подставляется коэффициент теплопроводности талых грунтов, а при вычислении глубин промерзания — коэффициент теплопроводности мерзлых грунтов, поэтому при расчете k_1 для случаев оттаивания и промерзания, вообще говоря, должны подставляться коэффициенты теплопроводности — соответственно λ_T и λ_M . Однако, учитывая небольшой интервал изменения величины отношения λ_M/λ_T для всех разновидностей грунтов (от 1,2 до 1,4), а также то, что отношение коэффициентов входит в выражение для k_1 под знаком радикала, значения k_1 для мерзлых и талых грунтов при каждом значении W_c/W_n можно принимать одинаковыми. На рис. 20 представлены результаты расчетов k_1 для различных грунтов. В качестве исходных величин использованы значения λ , найденные по графикам рис. 10.

График на рис. 20 справедлив для грунтов с суммарной влажностью $0 < W_c \leq W_n$, при промерзании которых формируется массивная криогенная текстура. Для сильновлажных грунтов постоянство отношения λ_M/λ_T нарушается из-за того, что в них формируются отдельные ледяные прослойки, по мощности соизмеримые с прослойками грунта (слоистая или сетчатая криогенная текстура), и вместо однородной системы в мерзлом состоянии имеет место более сложная двухслойная система.

Фактического материала по теплофизическим свойствам льдистых грунтов накоплено мало, поэтому определению коэффициента k_1 для них предшествовало исследование коэффициента теплопроводности экспериментальным и расчетным способами. Коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле А. Эйкена [39], позволяющей определить среднее их значение для двухкомпонентной системы, исходя из соотношения объемов и известных параметров каждого из компонентов:

$$\lambda = \lambda_1 \left| \frac{1 + 2V_2(1-\varepsilon)/(2\varepsilon+1)}{1 + V_2(1-\varepsilon)/(2\varepsilon+1)} \right|, \quad (4.4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности льдистого грунта;
 λ_1 — коэффициент теплопроводности льда, равный

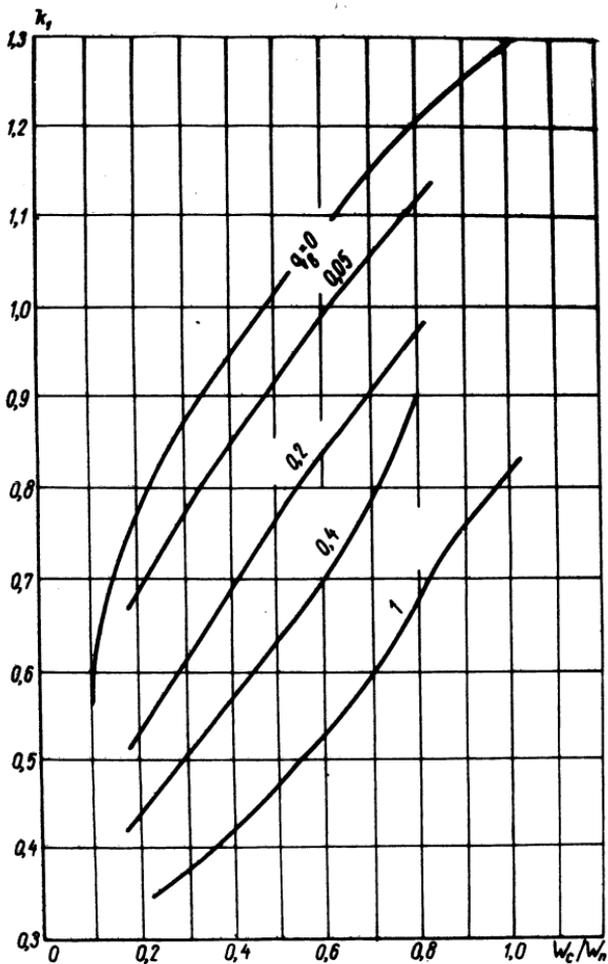


Рис. 20. График для определения k_1 при различной степени заторфованности $q_{\text{в}}$

$2,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; V_2 — объем прослоек грунта в единице объема льдистого грунта; $\varepsilon = \lambda_1 / \lambda_2$ (здесь λ_2 — коэффициент теплопроводности прослоек грунта).

Наблюдения показывают, что прослойки грунта при образовании включений льда уплотняются и их влажность близка к полной влагоемкости. В связи с этим значения коэффициентов теплопроводности прослоек грунта λ_2 принимались равными их значению для случая, когда влажность грунта близка к полной влагоемкости при максимальной плотнос-

ти: для песка $\lambda_2 = 3,14$; для супесей $\lambda_2 = 2,42$; для суглинков и глин $\lambda_2 = 2,2$; для торфов $\lambda_2 = 1,16$.

Расчитанные по формуле (4.4) величины коэффициента теплопроводности в зависимости от объема ледяных включений V_l в грунте приведены в табл. 16.

Т а б л и ц а 16

Средние значения коэффициентов теплопроводности льдистых грунтов λ , Вт/(м·°С)

Наименование грунта	При льдистости грунта за счет ледяных включений λ_2 , равной					
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
Пески	2,44	2,42	2,4	2,38	2,35	2,32
Супеси	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,28
Суглинки и глины	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26
Торфы	1,83	1,96	1,96	2,05	2,06	2,15

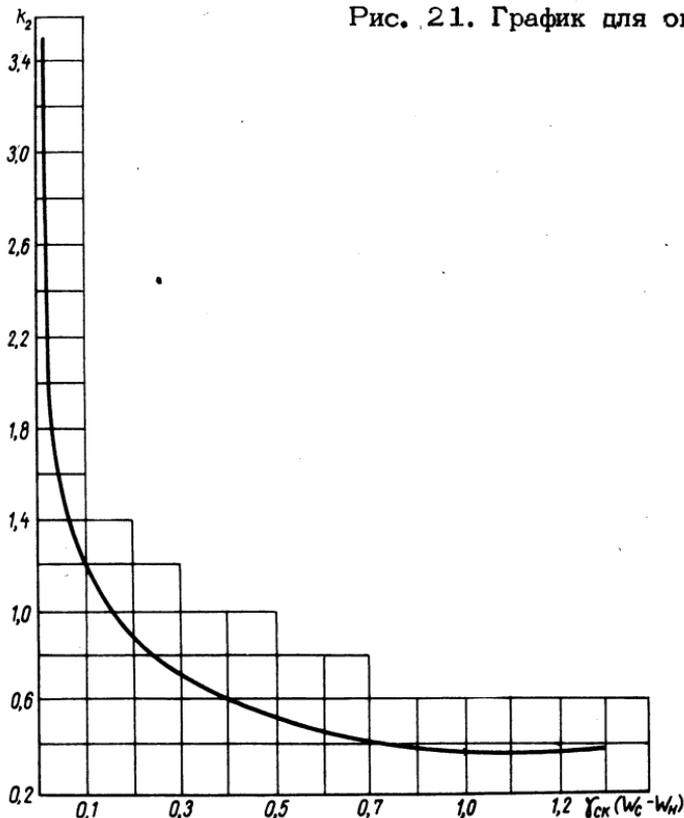
Проведенные авторами исследования по определению теплофизических свойств льдистых супесчаных грунтов калориметрическим способом дали результаты, близкие к расчетным данным:

λ_2	0,10	0,15	0,23	0,32
λ , Вт/(м·°С)	2,02	2,01	1,94	1,99

Как видно из табл. 16, коэффициент теплопроводности льдистых грунтов с увеличением объема льда в грунте изменяется незначительно, следовательно, незначительно изменяются и коэффициенты k_1 . Для всех видов мерзлых грунтов независимо от льдистости значения k_1 находятся в пределах от 1 до 1,14. Таким образом, для льдистых грунтов при определении k_1 можно не учитывать объем ледяных включений и принять при расчете глубины оттаивания льдистых грунтов $k_1 = 1,1$.

Коэффициент k_2 зависит от $f_{ск}(W_c - W_n)$, как показано на рис. 21. При расчете k_2 величина W_n принималась средней для температурного интервала с интенсивными фазовыми превращениями грунтовой влаги. Средние значения W_n для типичных (незасоленных) оттаивающих грунтов

Рис. 21. График для определения k_2



составляют: для песков - 0, для супесей - 0,07, для суглинков - 0,1, для глин - 0,15, для торфов - 1.

Величины k_g на схематических картах рис. 19 соответствуют средним многолетним глубинам сезонного оттаивания и промерзания, так как вычислены для средних многолетних климатических показателей. В СНиП П-18-76 за нормативную глубину слоя сезонного оттаивания рекомендуется принять не среднюю, а максимальную из наблюдаемых за 10 лет глубин сезонного оттаивания. Для перехода к максимальным значениям глубин сезонного оттаивания и промерзания необходим еще один поправочный коэффициент k_3 .

Определяющее значение при формировании мощности деятельного слоя имеет температура на поверхности грунта, которая в свою очередь зависит не только от температуры воздуха, но и от других факторов - снежного покрова, солнечной радиации, испарения и т.д., характер многолетних коле-

баний которых до настоящего времени не установлен. В то же время роль температуры воздуха в процессе промерзания и оттаивания грунта по сравнению с другими внешними условиями преобладающая, поэтому о характере многолетних колебаний температуры на поверхности грунта с достаточным основанием можно судить по колебаниям температуры воздуха.

Ниже приведены средние относительные отклонения температуры воздуха от средней многолетней нормы, вычисленные по данным климатического справочника для пяти пунктов Западной Сибири [5] за период наблюдений 70–80 лет:

	Для летней температуры, °С	Для зимней температуры, °С
Салехард	1,19	1,20
Березово	1,15	1,21
Сургут	1,14	1,22
Тобольск	1,16	1,23
Полтавка	1,14	1,19

Приведенные данные показывают, что в различных физико-географических районах Западной Сибири среднее отклонение летних и зимних температур от многолетней нормы практически одно и то же и составляет в среднем 1,16 для средней летней и 1,21 – для средней зимней температуры.

Учитывая, что на застроенной территории снежный покров сходит раньше, чем на естественной площадке, следовательно, раньше начинается оттаивание грунта, величину поправочного коэффициента k_3 при определении слоя сезонного оттаивания следует брать несколько больше, чем 1,16. Примем его приблизительно равным поправочному коэффициенту за счет колебаний температуры воздуха в зимний период, т.е. $k_3 = 1,21$. Тогда для определения максимальных значений глубин сезонного оттаивания и промерзания найденное по карте значение h_k следует умножить на 1,1, так как в формуле для расчета глубины сезонного оттаивания или промерзания величина температуры стоит под знаком радикала.

В результате окончательная формула для расчета максимальных глубин сезонного оттаивания и промерзания h_{max} будет иметь вид

$$h_{max} = 1,1 h_k k_1 k_2 \quad (4.5)$$

Сравнение вычисленных величин с фактическими показывает их достаточную для инженерных расчетов сходимость. Например, для районов Салехарда, по данным Г.И. Дубикова [9], глубина сезонного оттаивания песчаных грунтов составляет 1,4–2,75 м. По вычисленным данным эта величина при влажности в диапазоне 0,5–0,25 и объемной массе 1,2–2 г/см³ изменяется в пределах 1,6–2,7 м. Таким образом, нормативная глубина сезонного оттаивания H_T^H при проектировании сооружений с использованием грунтов по принципу I может быть рассчитана по формуле (4.5), т.е. $H_T^H = h_{max}$. Нормативная глубина сезонного промерзания H_M^H при проектировании сооружений с использованием грунтов по принципу II, определяемая строительными нормами как средняя из максимальных глубин сезонного промерзания, по данным наблюдений, за период не менее 10 лет на открытой, оголенной от снега поверхности рассчитывается по формуле

$$H_M^H = h_K k_1 k_2.$$

Примеры расчета. Определить нормативную глубину промерзания глинистого грунта в условиях Березово (объемная масса $\gamma = 1,65$ г/см³, влажность $W_c = 0,45$, плотность $\gamma_y = 2,7$ г/см³ $\lambda_M = 1,7$ Вт/(м·°С).

Решение. 1. По схематической карте (см. рис. 19) находим для Березово значение $h_K = 3,7$ м.

2. Рассчитываем физические показатели, необходимые для определения k_1 и k_2 :

коэффициент водонасыщения

$$\frac{W_c}{W_n} = \frac{W_c \gamma_y}{[\gamma_y(1+W_c) - \gamma] \gamma_g} = \frac{0,45 \cdot 1,65 \cdot 2,7}{[2,7(1+0,45) - 1,65] \cdot 1} = 0,88,$$

где γ_g — плотность воды, г/см³;

количество льда в единице объема грунта

$$\gamma_{ск}(W_c - W_n) = \frac{\gamma(W_c - W_n)}{1 + W_c} = \frac{1,65(0,45 - 0,15)}{1 + 0,45} = 0,34 \text{ г/см}^3.$$

3. По графикам (рис. 20 и 21) находим коэффициенты $k_1 = 1,02$ и $k_2 = 0,68$.

4. Определяем нормативную глубину промерзания

$$H_M^H = 1,1 h_K k_1 k_2 = 2,81 \text{ м.}$$

При тех же условиях определим среднесезонную глубину промерзания грунта в естественных условиях при наличии снега (в Березово $R_{сн} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$). В соответствии с формулой (4.3) имеем

$$h_g = \sqrt{\left(\frac{2,81}{1,1}\right)^2 + 1,7^2} - 1,7 = 1,4 \text{ м.}$$

§ 4.3. Способы сохранения проектного температурного режима оснований

Простейшим способом удаления тепла, выделяемого зданиями в грунт, является устройство проветриваемого подполья. Благодаря проветриванию подполья в теплый период года существенно уменьшается также возможность конденсации здесь влаги. Для проветривания в большинстве случаев достаточно естественного ветрового напора; при необходимости устраиваются средства побудительной вентиляции (вытяжные трубы с дефлекторами, вентиляторами и т.п.).

Температура в подполье — управляемая величина, зависящая главным образом от площади продухов. Она поддается расчету, однако в большинстве случаев подполье, его конструктивные элементы проектируются исходя из опыта местного строительства. Опыт показывает, что при наземной прокладке коммуникаций, как правило, выполняется условие $t_n < t_o$ и температуры грунта понижаются. Систематических наблюдений за температурным режимом подполий зданий в Западной Сибири, насколько это известно авторам, не проводилось. Поэтому для его анализа воспользуемся данными наблюдений, полученными авторами в смежных районах.

Для примера в табл. 17 приведены средние температуры воздуха в подпольях $t_{п.в}$ и вне здания t_v в Норильске, площади продухов $F_{пр}$, площади зданий в плане F , высоты подполья h .

Судя по этим и другим опубликованным в литературе [41, 42] данным, температура воздуха в подполье летом ниже, а зимой выше температуры наружного воздуха; среднегодовая температура воздуха в подполье несколько выше, а иногда она практически равна среднегодовой температуре наружного воздуха.

Температура воздуха в подпольях [40, 42] мало изменяется как в продольном, так и поперечном разрезе, в част-

Данные наблюдений за температурным режимом подполий зданий по наблюдениям Норильской мерзлотной станции

Адрес дома	$F, \text{ м}^2$	$F_{\text{пр}}, \text{ м}^2$	$h, \text{ м}$	$t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	Средние $t_{\text{п.в.}}/t_{\text{г}}$		
					ле- том	зи- мой	Годо- вые
Ул. Павлова, 4	2060	8,5	1,2	-2,0	<u>4,1</u> 9,1	<u>-16,0</u> -19,9	<u>-8,9</u> -10,2
Ул. Хмельниц- кого, 10	1740	6,3	1,4	-2,5	<u>4,3</u> 9,5	<u>-14,0</u> -17,4	<u>-8,0</u> -8,4
Ул. Севастополь- ская, 41	1580	6,4	1,2	-3,0	- -	- -	<u>-7,0</u> -8,4
Ул. Кирова, 9	1500	8,6	1,1	-2,5	<u>7,5</u> 9,9	<u>-11,3</u> -17,4	<u>-5,0</u> -8,4
Ул. Ленина, 16	2840	2,0	2,2	-2,0	- 9,5	- -17,4	<u>-6,4</u> -8,6

ности среднегодовые температуры воздуха по высоте практически постоянны, за исключением узких слоев толщиной около 10 см у поверхностей перекрытия и грунта, где они повышаются на величину порядка 0,1–0,7 $^\circ\text{C}$, т.е. температуру у поверхности грунта под зданием приближенно можно принимать равной температуре воздуха в подполье. Типичные примеры изменения температуры грунта под зданиями с холодными подпольями ($t_{\text{п}} < t_o$) показаны на рис. 22.

Из рисунка видно, что понижение среднегодовой температуры грунта под зданием происходит до тех пор, пока не установится температурный режим, соответствующий условиям теплообмена на поверхности грунта под зданием и около него.

Методика расчета температурного режима грунта в подпольном пространстве [31, 41] приведена в главе СНиП П-18-76.

Из других практических методов расчета подполий отметим метод В.Н. Иванова [42], доработанный авторами с целью применения к задачам управления температурным режимом грунта. Он пригоден для расчета подполий зданий с нормальным уровнем тепловыделений, т.е. когда термичес-

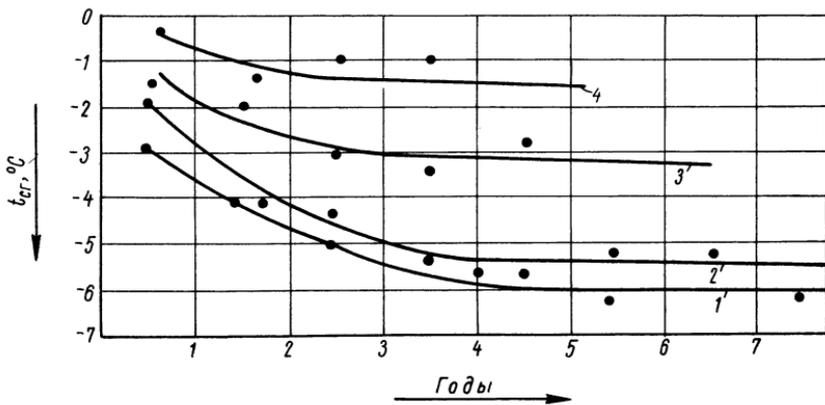


Рис. 22. Ход температур вечномерзлого грунта под центрами зданий

1 и 2 – среднегодовая температура грунта на глубине 5 м под двумя зданиями в Норильске (по М.В. Киму, 1965); 3 – максимальная температура на глубине 5 м под зданием в Якутске (по Г.О. Лукину, 1968); 4 – то же, в Игарке на глубине 4 м (по А.С. Кайкову, 1970)

кое сопротивление перекрытия над подпольем не меньше величины, вычисленной по формуле

$$R_0 \geq 0,1(t_{\text{пом}} + 2), \quad (4.6)$$

где 0,1 и 2 – параметры с размерностью соответственно в $\text{м}^2 \cdot \text{ч} / \text{ккал}$ и в $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пом}}$ – температура в помещении, $^{\circ}\text{C}$.

Анализ этого метода (составляющих его графиков) позволил найти следующую компактную форму выражения для определения площади продухов, необходимой для поддержания в подполье того или иного значения среднегодовой температуры:

$$F_{\text{пр}} = 2 F_{\text{пг}} \frac{2,6(B-5)}{\sqrt{\Phi\text{ОП}}} \cdot \frac{k_1 + k_2 |t_n|}{k_1 + k_2 |t_0|} k_3 k_4, \quad (4.7)$$

где $F_{\text{пг}}$ – площадь продольного сечения подполья при его высоте 1 м; B – ширина здания, м; $\Phi\text{ОП} = -t_x V_x \tau_x$ – фактор охлаждения подполья; t_x – среднезимняя температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; V_x – среднезимняя скорость ветра, м/с; τ_x – продолжительность зимнего периода, ч; k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от широты

места (в районах южнее 62° с.ш. $k_1 = 9$, $k_2 = 2,7$; на $62-68^{\circ}$ с.ш. $k_1 = 4$, $k_2 = 1,5$; севернее 68° с.ш. $k_1 = 0,3$, $k_2 = 1,1$; k_3 - коэффициент, учитывающий тепловое влияние санитарно-технических коммуникаций (при наземной укладке коммуникаций, равной 2, при надземной - 1,3, при отсутствии коммуникаций в подполье - 1); k_4 - коэффициент, учитывающий истинную высоту подполья, определяемый по табл. 18.

Таблица 18

Значения k_4

Ширина здания B , м	При высоте подполья h , м							
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
6	3,2	2,15	1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,08
12	2,1	1,5	1	0,75	0,5	0,4	0,25	0,22
24	1,7	1,3	1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45
48	1,3	1,15	1	0,85	0,8	0,75	0,7	0,68

Формула (4.7) справедлива при $6 < B < 48$ м и $0,5 \cdot 10^5 < \text{ФОП} < 9 \cdot 10^5$.

В табл. 19 приведены фактические значения F_{np} для ряда зданий в Норильске, F'_{np} - вычисленные по формуле (4.6) и F''_{np} - по формуле (4.7), а также исходные данные для расчета. Значения F'_{np} вычислены ориентировочно: в связи с отсутствием данных принимали $c = 0$, $N = 0$ (это примерно соответствует надземной прокладке коммуникаций, принятой в Норильске); $R_0 = 3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$, $\text{ФОП} = 7 \cdot 10^5$.

Таблица 19

Значения F_{np} , F'_{np} , F''_{np} , м^2

Адрес дома	k_1	k_2	k_3	k_4	F_{np}	F'_{np}	F''_{np}
Ул. Павлова, 4	0,3	1,1	1	0,79	8,5	9,8	9,6
Ул. Хмельницкого, 10	0,3	1,1	1	0,77	6,3	9,0	12,0
Ул. Севастопольская, 41	0,3	1,1	1	0,77	6,4	10,5	12,1
Ул. Кирова, 9	0,3	1,1	1	0,80	8,6	7,3	9,5

Из данных табл. 19 видно, что фактические и вычисленные по обеим формулам значения F_{np} различаются в пределах точности определения исходных величин.

Задаваясь площадью продухов и термическим сопротивлением перекрытия, можно добиться установления в основании здания температурного режима, обеспечивающего необходимую несущую способность. Возможности охлаждения грунта с помощью проветриваемого подполья велики, поскольку разница между среднегодовыми температурами грунта в естественных условиях и воздуха достигает 5–6°C и больше.

Конечно, если здание запроектировано с сохранением естественного температурного режима, в охлаждении грунта подпольем нет необходимости и площадь продухов задается такой, чтобы обеспечивалось условие $t_n = t_o$.

Использовать возможности охлаждения грунта подпольем для увеличения нагрузок на основание можно в совокупности с предпостроечным охлаждением грунта, в результате которого должен быть достигнут предельный температурный режим, устанавливающийся под зданием в процессе его эксплуатации. Следует отметить, что понижение температуры воздуха в подполье не приводит к увеличению стоимости перекрытия над подпольем за счет увеличения толщины теплоизоляции, поскольку последняя при любой фактической температуре воздуха в подполье согласно СНиП Ц-А. 7-71 рассчитывается из условия, что в подполье круглый год поддерживается температура, равная температуре наружного воздуха самой холодной пятидневки.

Существуют и другие способы регулирования температурного режима оснований – устройство холодных первых этажей, вентилируемых подсыпок, каналов и т.п. Они подробно описаны в литературе [31].

ГЛАВА 5 ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

§ 5.1. Параметры в уравнении длительной прочности мерзлых грунтов

При оценке длительного сопротивления мерзлого грунта нагрузке R_{gn} используется выражение С.С. Вялова [51]:

$$R_{gn} = \beta / \tau_n \frac{\tau_p}{B}, \quad (5.1)$$

где τ_p — время от момента приложения нагрузки до разрушения; β и B — параметры.

На основе анализа физической природы прочности мерзлых грунтов с позиций кинетической теории прочности [44] твердых тел удалось выявить возможность упрощения определения β и B . В соответствии с названной теорией разрушение рассматривается не как "кризисное" явление, наступающее при достижении предельной прочности материала, а как процесс постепенного разрыва межатомных связей в нагруженном теле в результате преобладания разрывающих флуктуаций (тепловых всплесков колебаний атомов) над восстанавливающимися, что приводит к постепенному накоплению разрывов межатомных связей. Долговечность зависит от напряжения и температуры, причем выявлена минимальная долговечность, за которой этой зависимости не существует. Такой минимальной долговечности соответствует период среднего колебания атомов ($\tau_0 = 10-13$ с). Многочисленными исследованиями долговечности твердых тел доказано, что в довольно большом диапазоне температур зависимость напряжения R от времени до разрушения, выраженная в полулогарифмическом масштабе, линейна и имеет общий полюс, ордината которого для всех материалов постоянна и равна $\lg \tau_0$. По-видимому, физические основы кинетической концепции прочности справедливы и для мерзлых грунтов, во всяком случае для квазиоднофазных (по Ю.К. Заречкому). К последним относятся грунты, поровая влага которых находится преимущественно в мерзлом состоянии.

Закономерности долговечности твердых тел исследовались экспериментально при одноосном статическом растяже-

нии [44]. Испытания грунтов на этот вид нагрузки показали, что зависимость их долговечности от напряжения отличается от такой же зависимости для твердых однородных тел. Для всех видов грунтов и льда функция $\sigma = f(\ln \tau)$ независимо от температуры нелинейна [45]. Характер зависимости напряжения от времени воздействия нагрузки при разрыве такой же, как при сдвиге, сцеплении, сжатии: для всех видов испытаний наблюдается резкое снижение сопротивления в начальный период и незначительное — при длительном воздействии нагрузки. Упрочнение мерзлого грунта, имеющее место при испытаниях на сжатие и сцепление, приводит только к уменьшению темпа снижения сопротивления со временем, но не меняет характера зависимости напряжения от времени воздействия нагрузки. Нелинейность этой функции для мерзлых грунтов (рис. 23 и 24), очевидно, вызвана многокомпонентностью, нестабильностью структуры в процессе испытаний, обусловленными переориентировкой частиц, перекристаллизацией льда в грунте.

Зависимость долговечности мерзлых грунтов от температуры также отличается от таковой для твердых однородных тел — она нелинейна. Это отличие характера зависимостей долговечности от напряжения и температуры, очевидно, обусловлено, кроме многокомпонентности, еще и тем, что естественная температура вечномерзлых грунтов и все данные по определению их прочности относятся к диапазону температуры, близкому к температуре начала замерзания грунтовой влаги. Испытания же однородных твердых тел, на основе которых выведено основное уравнение кинетической теории прочности, выполнены при температуре значительно ниже температуры плавления, т.е. ниже того температурного барьера, при котором материал как твердое тело перестает существовать и все его свойства, в том числе и прочностные характеристики, резко меняются.

Исследованиями С.С. Вялова установлено, что кривые $\sigma = f(\ln \tau)$ для мерзлых грунтов спрямляются, если их представить в виде $\frac{1}{\sigma} = f_1(\ln \tau)$. Причем, это справедливо для сжатия, сдвига и растяжения.

Прямые $\frac{1}{\sigma} = f_1(\ln \tau)$, полученные в результате испытания одного и того же вида грунта в твердомерзлом состоянии при различных температурах, сходятся приблизительно в одной точке, которая на оси времени проецируется постоянной для всех грунтов величиной, соответствующей $\tau_0 = 10-13$ с. На оси ординат указанной точке (полюсу) со-

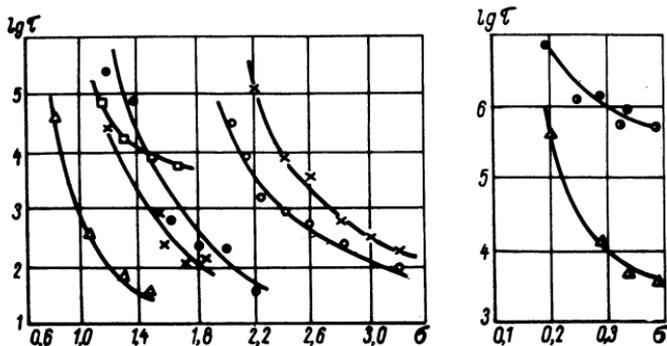


Рис. 23. Зависимость σ от $\lg \tau$ при разрыве

Δ - лёд, $t = -8^{\circ}\text{C}$; х - торф, $W = 3,0$, $t = -8^{\circ}\text{C}$; х - торф; $W = 6,15$, $t = -8^{\circ}\text{C}$; • - глина, $t = -8^{\circ}\text{C}$; о - супесь, $t = -8^{\circ}\text{C}$; □ - супесь, $t = -5^{\circ}\text{C}$; ● - песок, $t = -3,2^{\circ}\text{C}$; ▲ - супесь, $t = -4,2^{\circ}\text{C}$

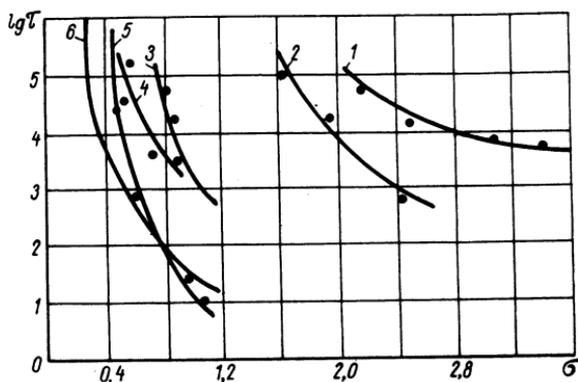


Рис. 24. Зависимость σ , МПа, от $\lg \tau$ при различных видах испытаний мерзлых грунтов

1 - келловейская супесь ($t = -5^{\circ}\text{C}$) при сжатии [48]; 2,3 - келловейская супесь ($t = -5^{\circ}\text{C}$ и $t = -20^{\circ}\text{C}$) при сцеплении [48]; 4 - торф ($t = -3,6^{\circ}\text{C}$) при сдвиге по боковой поверхности сваи; 5 - то же, супесь ($t = -3,6^{\circ}\text{C}$); 6 - торф ($t = -8^{\circ}\text{C}$) при сцеплении

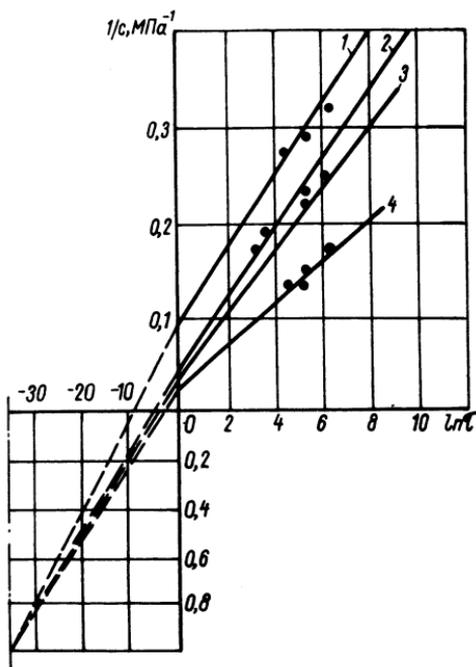


Рис. 25. Зависимость $1/c$ от $\ln \tau$ для торфа

- 1 - $W = 1,82$, $\gamma_0 = 0,93$ г/см³, $t = -3,5^\circ\text{C}$;
 2 - $W = 2,79$, $\gamma_0 = 1,05$ г/см³, $t = -8^\circ\text{C}$;
 3 - $W = 1,82$, $\gamma_0 = 0,93$ г/см³, $t = -2^\circ\text{C}$;
 4 - $W = 1,82$, $\gamma_0 = 0,93$ г/см³, $t = -3^\circ\text{C}$

ответствует значению $1/c = K_0$, постоянное для каждого вида грунта. Кроме сцепления C , этой же закономерности подчиняется и сопротивление сдвигу [50 и 51] по боковой поверхности свай (рис. 25).

Таким образом, хотя общий вид зависимостей долговечности от напряжения и температуры оказался отличным от такого же для твердых тел, предел минимальной долговечности твердомерзлых грунтов может быть принят $\tau_0 = 10^{-13}$. Наличие общего полюса в пучке прямых $1/R = f(\ln \tau)$ позволяет записать уравнение долговечности (5.1) в виде

$$R = \beta' / \left(\ln \frac{\tau}{B'} + \beta' K_0 \right), \quad (5.2)$$

где β' - параметр, аналогичный β в формуле (5.1), определяемый как котангенс угла наклона прямых $1/R = f(\ln \tau)$ к оси абсцисс; $\ln B'$ - абсцисса полюса; K_0 - ордината полюса.

Опытные данные показывают, что B' и K_0 для данной грунтовой разновидности остаются постоянными в том случае, если изменяется не температура, а размеры моделей свай.

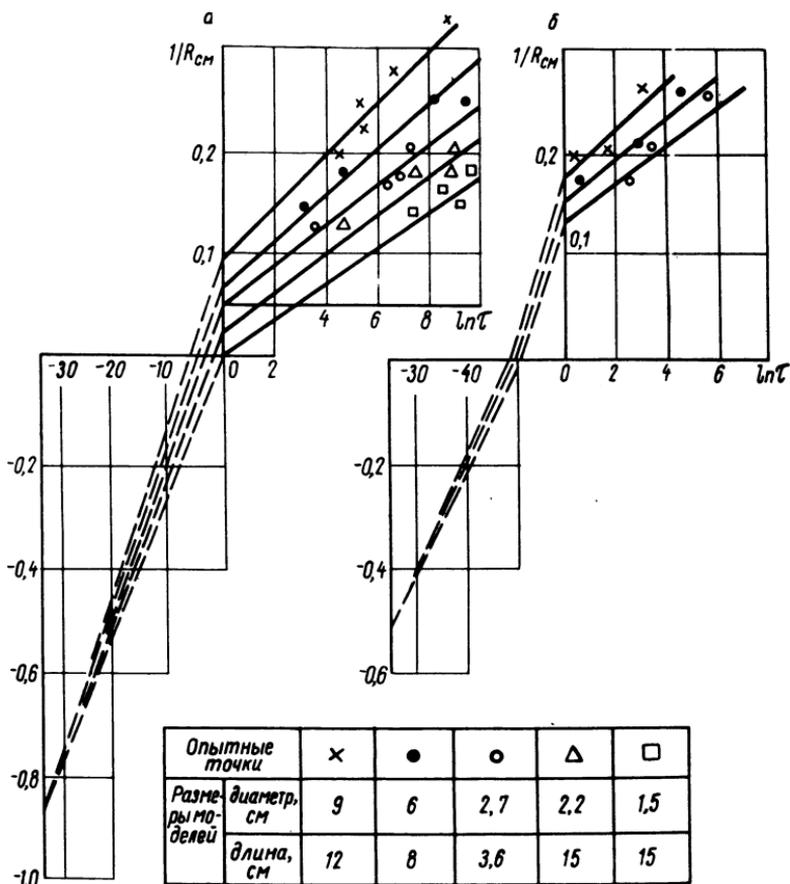


Рис. 26. Зависимость $1/R_{\text{см}}$ от $\ln \tau$, полученная при продавливании замороженных металлических моделей свай при температуре $-4,5^{\circ}\text{C}$
 а - в торфе; б - в песке

На рис. 26 представлены графики, построенные по данным испытаний на продавливание моделей свай, имеющих различные размеры, при одинаковой температуре минус $4,5^{\circ}\text{C}$. Ниже приводятся значения β' , найденные по графикам на рис. 26 в зависимости от длины и диаметра моделей:

Торф: β'

$\ell = 15$ см, $d = 1,5$ см 4,87

$\ell = 15$ см, $d = 2,2$ см 4,58

$l = 3,6$ см, $d = 2,7$ см	4,54
$l = 8,0$ см, $d = 6,0$ см	4,44
$l = 12,0$ см, $d = 9,0$ см	4,34

Песок:

$l = 3,6$ см, $d = 2,7$ см	5,71
$l = 8,0$ см, $d = 6,0$ см	5,40
$l = 12,0$ см, $d = 9,0$ см	5,29

Увеличение β' соответствует повышению величины сопротивления сдвигу. Приведенные выше данные позволяют оценить влияние размеров сваи на R_{cg} . Экспериментально установлено [51, 52], что с увеличением диаметра сваи уменьшается величина сопротивления сдвигу, причем это уменьшение идет с убывающей скоростью. С увеличением длины сваи сопротивление сдвигу несколько увеличивается. Например, из опытов для торфа, которые проводились примерно при одинаковом диаметре моделей сваи, видно, что величина R_{cg} с увеличением длины изменяется весьма незначительно, причем в сторону увеличения.

На рис. 27 представлена зависимость $1/\beta'$ от диаметра сваи, вмороженной в различные грунты при температуре минус $4,5^{\circ}\text{C}$, вычисленная по данным, приведенным выше а также по результатам других исследователей [52, 53]

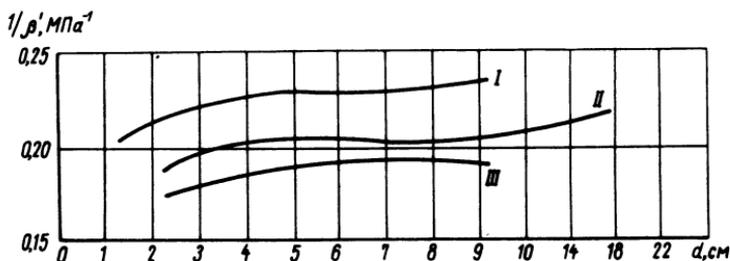


Рис. 27. Зависимость $1/\beta'$ от вида грунта и диаметра исследованных моделей сваи ($t = -4,5^{\circ}\text{C}$)
I - торф; II - суглинок; III - песок

Параметры B' и K_0 не зависят также от материала и формы сваи. Это положение иллюстрируется табл. 20, где приведены величины сопротивлений сдвигу мерзлого суглинка по боковой поверхности бетонных и металлических свай при температуре минус $4,5^{\circ}\text{C}$, фактические R_{ϕ} и обрабо-

Значения сопротивлений сдвигу моделей свай (по данным Ю.Я. Велли [53])

Время до срыва модели τ , мин	R , МПа, для моделей свай из			
	металла		бетона	
	R_g	R_φ	R_g	R_φ
18	0,401	0,480	0,569	0,570
42	0,370	0,440	0,510	0,510
60	0,356	0,400	0,488	0,490
222	0,317	0,370	0,424	0,450
420	0,310	0,340	0,382	0,440
600	0,294	0,310	0,398	0,430

Таблица 21

Значения сопротивлений сдвигу моделей свай (по данным А.П. Кардымона [53])

Время до срыва модели τ , мин	R , МПа, для свай с сечением					
	прямоугольным		квадратным		круглым	
	R_g	R_φ	R_g	R_φ	R_g	R_φ
30	0,365	0,375	0,395	0,410	0,450	0,450
60	0,350	0,350	0,380	0,375	0,430	0,430
75	0,340	0,340	0,370	0,370	0,425	0,425
120	0,328	0,326	0,360	0,350	0,400	0,400
180	0,310	-	0,340	0,336	0,390	0,390
520	0,290	-	0,310	-	0,355	0,350

таные R_g в соответствии с формулой (5.2) при $K_0 = 0,72$ и табл. 21, где приведены аналогичные данные для моделей свай разного сечения.

Следует подчеркнуть, что полюс в пучке прямых $\frac{1}{\tau} = f(\ln \tau)$ получается далекой экстраполяцией и, как указано в работе [54], может зависеть от вида грунта и характера испытаний. Особенно это будет сказываться при испытании высокотемпературных мерзлых грунтов, а также грунтов со значительным количеством пор, не заполненных льдом и водой, т.е. грунтов, в которых нарушена сплошность сечения.

Но, как видно из уравнения (5.2), изменение величины τ_0 незначительно скажется на значении R_{gl} . Расчеты показывают, что увеличение периода минимальной долговечности на десять порядков меняет длительное сопротивление всего на 10%, что находится в пределах точности опытных данных.

Поэтому для практических расчетов прочности грунтов, в которых вся свободная поровая вода замерзла, τ_0 можно принять равным 10^{-13} с.

Экспериментальные данные по определению сцепления, сопротивления сдвигу по поверхностям смерзания, полученные для образцов различных грунтовых разновидностей, отобранных в районе Сургута и Березово, показали, что значения второй координаты полюса K_0 находятся в пределах от минус 2 до минус 14 МПа⁻¹. Осредненно их можно задать следующими: для песчаных грунтов минус $2 \div 7$; для глинистых – минус $7 \div 10$; для торфяных – минус $10 \div 14$ МПа⁻¹.

Изложенное дает возможность определить β' для данного вида грунта и рассчитать R_{gl} . Зная значение R на какой-нибудь один промежуток времени τ , найдем

$$\beta' = (\ln \tau_0 + \ln \tau) / (K_0 - 1/R), \quad (5.3)$$

где R – напряжение, МПа, по площади боковой поверхности моделей свай; напряжение по сечению образца при сжатии; сцепление на момент времени τ ; τ – период времени, мин, от начала загрузки до срыва модели, до разрушения образца при сжатии; до момента определения сцепления. С учетом зависимости (5.3) длительное сопротивление может быть определено по формуле

$$R_{gl} = \frac{34,02 + \beta' \tau}{51,1(K_0 + 1/R) + (34,02 + \beta' \tau) K_0}, \quad (5.4)$$

где τ – определенный из опыта с заданной точностью период времени, мин, от начала загрузки до разрушения образца при сжатии; до сдвига модели; до момента определения сцепления; R – напряжение, МПа, при котором определено τ . Использование уравнения (5.4) позволяет сократить количество опытных определений, необходимых для расчета длительной прочности мерзлых грунтов.

§ 5.2. Сопротивление сдвигу мерзлых грунтов по боковой поверхности фундаментов

Результаты многочисленных определений сил смерзания [55] показали, что они зависят от температуры и вида грунта, его дисперсности, влажности. Максимальные силы смерзания при прочих равных условиях наблюдаются при влажности грунта, близкой к полной влагоемкости. При влажности меньше капиллярной влагоемкости грунты находятся в сыпучемерзлом состоянии и смерзания не наблюдается. В водонасыщенных грунтах наличие ледяных включений приводит к уменьшению сил смерзания. С понижением температуры наблюдается различная интенсивность возрастания длительных сил смерзания для различных грунтов.

Так, по данным И.Н. Вотякова [56], при понижении температуры песка на 1°C (в интервале температур минус $1-5^{\circ}\text{C}$) численные значения предельно длительных сил смерзания с бетоном возрастают в среднем на $0,12$ МПа; для суглинка в том же диапазоне изменения температуры это приращение составляет только $0,07$ МПа. Для торфа, по данным авторов, темп увеличения сил смерзания при понижении температуры еще меньше и равен при этих же условиях $0,016$ МПа. Анализ закономерностей изменения фазового состава влаги в этих грунтах показывает, что при понижении температуры от минус 1 до минус 5°C льистость в песке увеличилась на $0,015$; в суглинке — на $0,045$; в торфе — на $1,2$. Это свидетельствует о том, что темп увеличения сил смерзания при понижении температуры связан не столько с увеличением количества льда в грунте, сколько, очевидно, обусловлен влажностью за счет незамерзшей воды; в песке ее практически не остается и увеличение сил смерзания при понижении температуры обусловлено упрочнением льда; в суглинке влажность за счет незамерзшей воды при температуре минус 5°C составляла $0,055$; в торфе — около 1 . Наличие водной пленки вокруг частиц скелета грунта уменьшает цементирующие свойства льда, увеличивает пластичность, что, вероятно, и является основной причиной, сдерживающей увеличение сопротивления сдвигу глинистых и торфяных грунтов по сравнению с песчаными при понижении температуры.

Наличие растительных остатков в составе минеральных грунтов увеличивает общее влагосодержание, влажность за

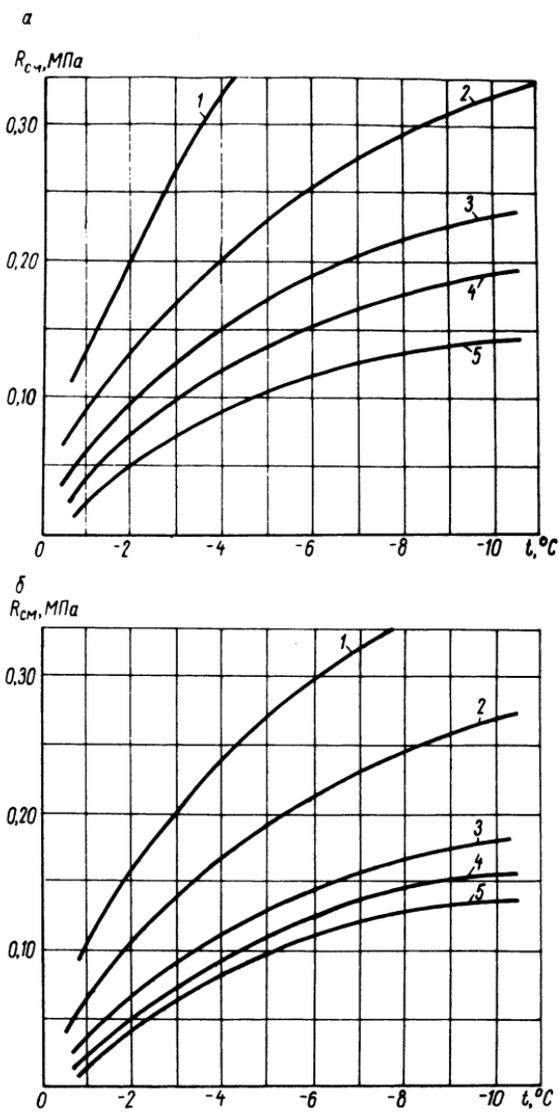


Рис. 28. Зависимость сопротивления сдвигу по бетонным поверхностям смерзания от температуры

а - песчаные заторфованные грунты; б - глинистые заторфованные грунты: 1 - $q = 0,05$; 2 - $q = 0,1$; 3 - $q = 0,2$; 4 - $q = 0,4$; 5 - торф

счет незамерзшей воды и уменьшает силы смерзания. На рис. 28 представлены полученные экспериментально и приведенные к расчетным значениям сопротивления сдвигу по

деревянными и бетонными поверхностями заторфованных глинистых и песчаных грунтов при влажности, близкой к полной влагоемкости, в зависимости от заторфованности и температуры. В том случае, когда в грунте содержатся ледяные включения, сопротивление сдвигу можно рассматривать как аддитивную величину:

$$R_{сг.л} = R_{сг}^r (1 - \Lambda_{\text{л}}) + R_{сг}^{\Lambda} \Lambda_{\text{л}}, \quad (5.5)$$

где $R_{сг.л}$ — сопротивление сдвигу льдистого грунта; $R_{сг}^r$ — сопротивление сдвигу грунта, залегающего прослойками между ледяными включениями; $R_{сг}^{\Lambda}$ — сопротивление сдвигу льда; $\Lambda_{\text{л}}$ — льдистость за счет ледяных включений. Для увеличения несущей способности фундаментов, работающих за счет сил смерзания в торфяных и льдистых грунтах, может быть предложено устройство песчаной рубашки. Выполненные исследования показали, что оптимальная толщина такой рубашки равняется наибольшему размеру сечения сваи, влажность песка близка к полной влагоемкости, объемная масса скелета составляет не менее $1,5 \text{ г/см}^3$.

§ 5.3. Сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению

Сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению экспериментально определяется вдавливанием в грунт сферических штампов постоянной нагрузкой или испытанием на сжатие мерзлого грунта постоянным, ступенчатым или убывающим во времени давлением. Наименее трудоемок первый способ. Для мелкодисперсных минеральных грунтов (песчаных и глинистых) методика испытания шариковым штампом стандартизирована. Она позволяет определить предельно длительное эквивалентное сцепление, в зависимости от которого находят расчетные давления на мерзлые грунты.

Параллельно выполненные испытания сферическими штампами в полевых (диаметр штампа 230 мм) и в лабораторных (диаметр штампа 23 мм) условиях показали одинаковые значения эквивалентного сцепления при прочих равных условиях, следовательно, для торфяных грунтов применима методика испытаний сферическими штампами малого диаметра по ГОСТ 21048-75, предназначенная для глинистых грунтов. Количество опытов, необходимое для получения вось-

мичасовых значений эквивалентного сцепления с доверительной вероятностью 0,8, равно четырем.

Длительное сцепление торфа с учетом рассмотренных выше закономерностей изменения параметров в уравнении длительной прочности (5.2), по данным кратковременных испытаний, может быть вычислено по формуле

$$t_{gl} = 0,66 c_{\tau} + 0,02 \ln \tau (c_{\tau} + 1) - 0,34, \quad (5.6)$$

где c_{τ} — эквивалентное сцепление за период времени τ , мин.

Результаты выполненных исследований сцепления различной степени заторфованных песчаных и глинистых грунтов, а также торфа при влажности, близкой к полной влагоемкости в диапазоне температур от $t_{н.з}$ до минус 15°C , позволили получить расчетные давления на эти грунты (рис. 29) в зависимости от степени заторфованности и температуры.

Выявление зависимости сил сцепления мерзлых грунтов от физических свойств показало, что влияние вида грунта, гранулометрического и химического состава, пористости, плотности, суммарной влажности, соотношения льда и воды, температуры проявляется совместно.

Обобщающим параметром физических свойств, обуславливающих величину сцепления, оказалось отношение влажности за счет льдистости к полной влагоемкости $W_{л}/W_0$. Количество льда в грунте, характеризуемое величиной $W_{л}$, зависит от температуры, но температурное влияние на прочностные свойства мерзлых грунтов не исчерпывается количественным показателем $W_{л}$. Понижение температуры уплотняет кристаллическую решетку льда, что обуславливает повышение прочности грунтов и в том случае, когда температура становится ниже интенсивных фазовых переходов влаги.

Исходной температурой, при которой начинается увеличение прочности мерзлых грунтов, является температура начала замерзания грунтовой влаги $t_{н.з}$. Температура грунта t и $t_{н.з}$ могут быть объединены в симплекс $t/t_{н.з}$, который совместно с $W_{л}/W_0$ является обобщающим показателем факторов, определяющих прочностные свойства мерзлых грунтов. Этот вывод подтвердился результатами испытаний. Силы сцепления грунтов, определенные для одного и того же промежутка времени τ , в системе координат $c_{\tau} \frac{W_{л}}{W_0} - \frac{t}{t_{н.з}}$

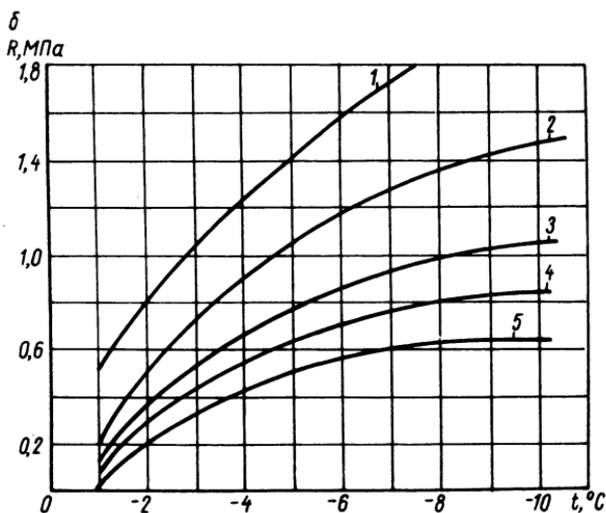
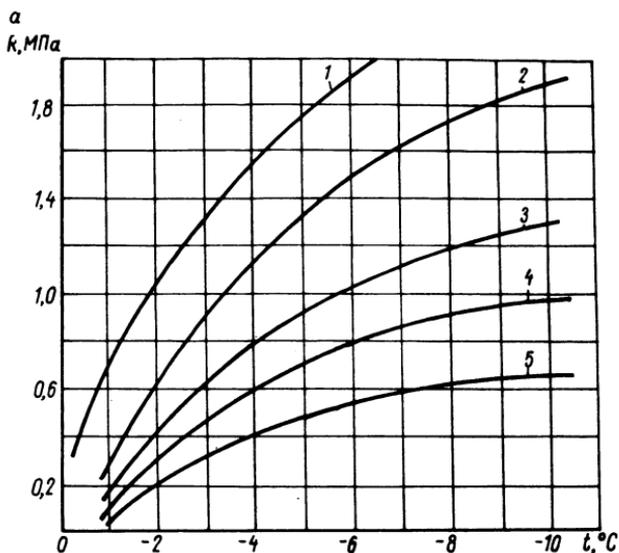


Рис. 29. Зависимость сопротивления сжатию мерзлых грунтов от температуры

а - песчаные; б - глинистые

1 - при степени заторфованности $q = 0,05$; 2 - $q = 0,1$;
3 - $q = 0,2$; 4 - $q = 0,4$; 5 - торф

объединяются одной прямой (рис. 30).

Зависимость длительного сцепления от указанных параметров имеет вид

Таблица 22

Значения коэффициентов $b_1 \div b_4$ и $\alpha_1 \div \alpha_4$

Вид грунта	$b_1, \text{МПа} \cdot \text{с}^{-1}$	α_1	$b_2, \text{МПа} \cdot \text{с}^{-1}$	α_2	$b_3, \text{с}^{-1}$	α_3	$b_4, \text{с}^{-1}$	α_4
Песчаные:								
$q = 0$	0,12	0,75	0,16	0,625	-	0,5	0,1	-0,75
$q = 0,1$	0,08	0,75	-	-	0,25	1,125	0,5	-0,75
$q = 0,25$	0,055	0,75	-	-	0,18	1,125	1,4	-0,75
$q = 0,6$	0,04	0,75	-	-	0,14	1,125	3,2	-0,75
Глинистые:								
$q = 0$	0,09	0,75	0,11	0,625	-	0,5	0,4	-0,75
$q = 0,1$	0,055	0,75	-	-	0,19	1,125	1	-0,75
$q = 0,25$	0,035	0,75	-	-	0,16	1,125	2	-0,75
$q = 0,6$	0,03	0,75	-	-	0,12	1,125	3,5	-0,75
Торф средне-разложившийся, массивной текстуры	0,25	0,75	-	-	0,09	1,125	3,6	-0,75
Лед	-	-	0,19	0,875	0,057	1,25	-	-

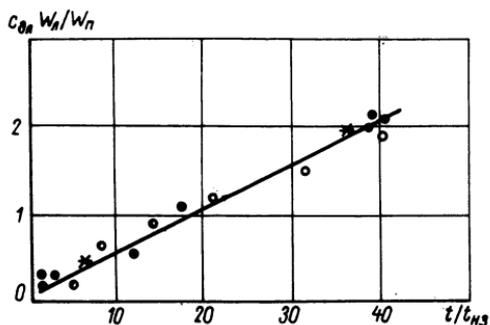


Рис. 30. Зависимость $\frac{c_{dl} W_n}{W_n}$ от $\frac{t}{t_{н.з.}}$
 • - для песка; * - для суглинка; ○ - для торфа

$$c_{dl} = (0,05t/t_{н.з.} + 0,1) W_n / W_n. \quad (5.7)$$

Опытные данные показали справедливость уравнения (5.7) для минеральных грунтов, в том числе засоленных, а также для заторфованных.

На практике часто возникает необходимость в аналитической зависимости прочностных характеристик от температуры. Зависимость сопротивления сдвигу по боковой поверхности свай, расчетного давления, коэффициента сжимаемости пластично-мерзлых грунтов с погрешностью, не превышающей 12%, можно аппроксимировать формулой

$$R = b |t|^{\alpha}, \quad (5.8)$$

где R - соответствующая прочностная или деформативная характеристика; t - температура; b и α - коэффициенты, зависящие от вида грунта и вида прочностной или деформативной характеристики. Значения b и α даны в табл. 22 и 23. При этом в зависимости от того, ка-

Таблица 23
 Значения коэффициентов b_5 , b_6 и α_5 , α_6

Льдистость	Грунты	Глубина погружения свай, м	b_5 , МПа·°C ⁻¹		b_6 , МПа·°C ⁻¹	
			α_5	α_6		
$L_B \leq 0,2$	Крупно-обломочные	Любая	3,5	0,33	1,25	0,33
	Пески крупные и сред-	Любая	2,1	0,33	1,25	0,33

Продолжение табл. 23

Льдистость	Грунты	Глубина погружения сваи, м	$b_5, \text{МПа} \cdot \text{°C}^{-1}$	α_5	$b_6, \text{МПа} \cdot \text{°C}^{-1}$	α_6
		ней крупности				
$L_f \leq 0,2$	Пески мелкие и пылеватые	3-5	1,4	0,33	0,9	0,5
		10	1,65	0,33	0,9	0,5
		15 и более	1,8	0,33	0,9	0,5
	Супеси	3-5	1,1	0,4	0,7	0,5
		10	1,25	0,4	0,7	0,5
		15 и более	1,4	0,4	0,7	0,5
	Суглинки и глины	3-5	0,85	0,4	0,6	0,5
		10	0,95	0,4	0,6	0,5
		15 и более	1,15	0,4	0,6	0,5
	$0,2 < L_f \leq 0,4$	Все виды грунтов	3-5	0,6	0,5	0,4
10			0,7	0,5	0,4	0,625
15 и более			0,75	0,4	0,4	0,625

кая характеристика рассчитывается, они обозначены следующими индексами: при расчете сопротивления мерзлого грунта и грунтового раствора сдвигу по боковым поверхностям смерзания $R_{см}$ - индексом 1, то же, мерзлого грунта и льда по мерзлому грунту и грунтовому раствору $R_{сг}$ - индексом 2; расчетного давления на мерзлые грунты R - индексом 3; коэффициента сжимаемости пластично-мерзлого грунта a - индексом 4, расчетных давлений на мерзлые минеральные грунты под нижним концом сваи R_0 - индексом 5 и под подошвой столбчатого фундамента R - индексом 6.

ГЛАВА 6 ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

§ 6.1. Температурная граница пластично-мерзлого и твердомерзлого состояния грунтов

Основания, сложенные пластично-мерзлыми грунтами, рассчитываются как по несущей способности, так и по деформациям, тогда как при твердомерзлом состоянии (коэффициент сжимаемости $\alpha < 0,05 \text{ МПа}^{-1}$) допускается рассчитывать основания лишь по несущей способности. Поэтому принятое в нормах разделение вечномерзлых грунтов на пластично-мерзлые и твердомерзлые имеет существенное практическое значение.

Минеральные грунты рассматриваемого региона не отличаются повышенной засоленностью, поэтому в том случае, когда они не содержат в своем составе растительных остатков, температура их твердомерзлого состояния может быть назначена по нормам без каких-либо дополнительных расчетов.

При использовании мерзлых заторфованных грунтов в качестве оснований необходим особенно тщательный подход к выбору расчетной схемы, а следовательно, к назначению температурной границы твердомерзлого и пластично-мерзлого состояния.

Основными факторами, обуславливающими повышенную сжимаемость заторфованных грунтов, являются: большее по сравнению с минеральными грунтами содержание незамерзшей воды, зависящее от температуры; повышенная ползучесть скелета торфа.

Для минеральных грунтов при температуре перехода из твердомерзлого в пластично-мерзлое состояние изменение влажности за счет незамерзшей воды при понижении температуры на 1°C примерно одинаково для всех видов грунтов и равно в среднем $0,028$ [2]. Если принять это значение справедливым и для торфяных грунтов, то, зная уравнение $W_n = f(t)$, можно рассчитать температуру перехода грунта из одного состояния в другое. Для расчетов использовалась зависимость влажности за счет незамерзшей воды от температуры (см. гл. 2).

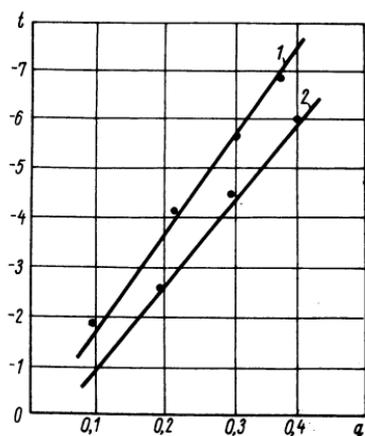


Рис. 31. Зависимость температурной границы твердомерзлого состояния t_r от заторфованности φ

1 — для глинистых грунтов ;
2 — для песчаных

Определив из (2.11) $\frac{dW_H}{dt} = \pi/\sqrt{t} = -0,25\pi t^{-1,25}$, приравняв полученное выражение 0,028 и подставив значение π , рассчитываем температуру t_r , разграничивающую твердомерзлое и пластично-мерзлое состояние для каждого вида заторфованного грунта при заданной заторфованности. Результаты расчета для песчаных и глинистых заторфованных грунтов даны на рис. 31.

Определение температурной границы пластично-мерзлого состояния выполнено также по основному показателю — характеристикам сжимаемости, полученным в полевых и лабораторных условиях при испытании на компрессию и шариковым штампом. Испытывался среднеразложившийся осоково-гипновый торф естественной и нарушенной структур, а также заторфованные глинистые грунты, имеющие влажность, близкую к полной влагоемкости.

При малых степенях заторфованности значение температурной границы твердомерзлого и пластично-мерзлого состояния, рассчитанное по влажности за счет незамерзшей воды, хорошо согласуется с результатами опытного определения деформативных свойств (рис.31). В торфяных грунтах со степенью заторфованности более 0,3 ползучесть скелета торфа обуславливает коэффициент сжимаемости более 0,05 МПа⁻¹ практически во всем диапазоне температур естественного залегания. Таким образом, основания, сложенные мерзлыми торфами и заторфованными грунтами, со степенью заторфованности $\varphi > 0,3$ необходимо рассчитывать как по первой, так и по второй группе предельных состояний при любой температуре.

§ 6.2. Расчет осадок оснований,
сложенных тальми и пластично-мерзлыми
грунтами по естественной пористости
грунтов

В тех случаях, когда пористость грунта ненарушенного сложения с глубиной уменьшается в результате длительного воздействия природного давления, характер зависимости естественной пористости от давления аналогичен получаемому при компрессионных испытаниях. Это позволяет облегчить способ определения осадок оснований, сложенных тальми и пластично-мерзлыми грунтами (при сохранении их естественного температурного режима в процессе эксплуатации сооружений), и отказаться от компрессионных испытаний грунтов.

Относительная осадка δ , выраженная через пористость n , составляет [57]

$$\delta = (n_1 - n_2) / (1 - n_2), \quad (6.1)$$

где n_1 и n_2 - пористости грунта соответственно до и после приложения нагрузки.

С учетом зависимости (6.1) общая деформация грунта, рассчитанная по методу послойного суммирования,

$$S = \sum_{i=1}^{i=m} \left(\frac{n_{1i} - n_{2i}}{1 - n_{2i}} \right) h_i, \quad (6.2)$$

где h_i - толщина i -го слоя; m - число слоев грунта.

Типичные кривые распределения пористости различных грунтов по глубине для конкретных площадок Нижневартовска, Сургута, Мегиона (по данным УралТИСИЗа) и Игарки (по данным КрасТИСИЗа), построенные в виде зависимости пористости от природного давления $p_{np} = \gamma_0 h_i$ (γ_0 - объемная масса грунта, г/см³; h_i - расстояние от поверхности до середины i -го слоя), приведены на рис. 32.

Таким образом, компрессионную кривую для совершенно однородных грунтов можно приближенно построить по данным наблюдений за изменением пористости по глубине, не прибегая к компрессионным испытаниям. По этой кривой можно судить о предельных осадках, так как естественная пористость сложилась в результате природного давления, действующего на протяжении всей геологической истории.

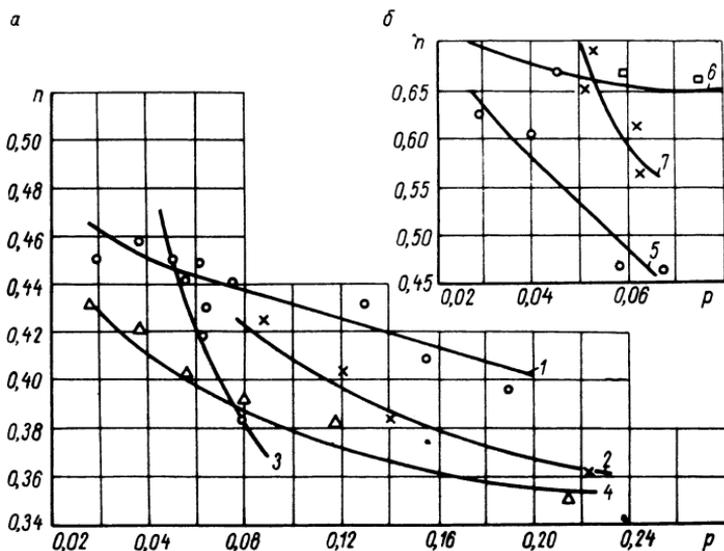


Рис. 32. Зависимость пористости n от природного давления $p_{пр}$

а - талые грунты; 1, 2 - суглинок (Нижневартовск); 3 - супесь (Сургут); 4 - суглинок (Мегион); б - пластично-мерзлые грунты (п. Игарка); 5 - глина; 6 - супесь; 7 - суглинок

Построенную таким образом зависимость естественной пористости от глубины можно использовать для приближенного расчета осадок, при этом за n_1 в формуле (6.2) необходимо принимать значение естественной пористости грунта на глубине определения осадки h , а за n_2 - пористость того же вида грунта, но на той глубине h_z , где природное давление $\gamma'_0 h_z$ равно сумме природного давления и дополнительного давления на глубине определения осадки h .

В табл. 24 приведены значения относительной осадки δ , вычисленные по предлагаемой методике и найденные опытным путем для некоторых строительных площадок Нижневартовска. Опытные значения получены по данным компрессионных испытаний в лабораторных условиях по общепринятой методике.

При давлениях, превышающих природное, вычисленные значения несколько больше опытных, что указывает на неполную консолидацию грунта при компрессионных испытаниях. В целом вычисленные значения относительной осадки сопостави-

Значения относительных осадок суглинка δ^*

Глубина отбора проб, м	Природное давление, МПа	При давлении, МПа			
		0,05	0,10	0,20	0,30
4,5	0,085	<u>0,014</u>	<u>0,022</u>	<u>0,036</u>	<u>0,043</u>
		-	0,030	0,048	0,052
6,8	0,134	<u>0,016</u>	<u>0,028</u>	<u>0,051</u>	<u>0,065</u>
		-	-	0,058	0,064

* В числителе приведены значения осадок по данным, в знаменателе — рассчитанные по формуле (6.1).

мы с опытными данными и превышают их не более чем на 30%.

Для расчета осадки по предлагаемому методу необходимо иметь набор значений пористости n , соответствующий диапазону изменения давлений от природного до давления под подошвой фундамента. При однородном грунте достаточно иметь данные по изменению пористости с глубиной в пределах 10–20 м.

Если сжимаемая толща состоит из нескольких слоев грунта различной генетической разновидности, обладающих разной структурной прочностью, то пористость нижележащих слоев может оказаться больше, чем вышележащих. Однако в каждом таком слое будет наблюдаться свой закон уменьшения пористости с глубиной. В этом случае для определения общей осадки приходится установленную наблюдениями зависимость n от p для каждого слоя экстраполировать на всю сжимаемую толщу. Поэтому необходимо знать количественный закон зависимости n от p . Наиболее правильным будет установить этот закон в каждом конкретном случае. Можно воспользоваться также результатами анализа материалов инженерных изысканий, выполненных УралТИСИЗом для различных районов севера Западной Сибири, который показал, что с удовлетворительной точностью зависимость n от p , МПа, в пределах $0,01 \leq p \leq 1$ ниже деятельного слоя аппроксимируется выражением

$$n = k \rho^{-b}, \quad (6.3)$$

где k и b – численные параметры, определяемые по данным изысканий на конкретной площадке.

Анализ опытных данных показал, что среднее значение b может быть принято равным $1/2$ для талых песчаных грунтов и $1/3$ – для талых глинистых. Для пластично-мерзлых грунтов параметр b необходимо определять в каждом конкретном случае, так как он зависит не только от категории грунта, но и от условий криолитогенеза.

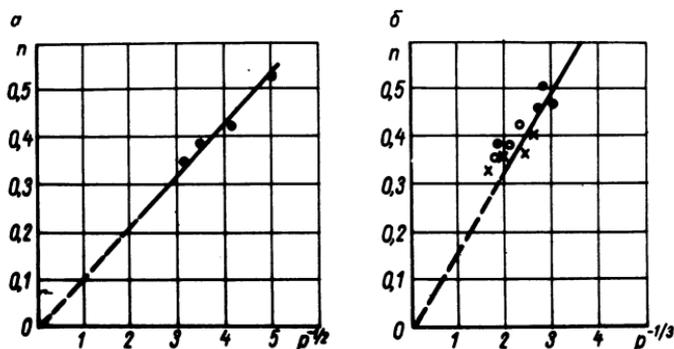


Рис. 33. Графики для определения коэффициента k

а – песчаные грунты; б – глинистые грунты

Поскольку график зависимости n от ρ^{-b} представляет собой прямую, выходящую из центра координат (рис. 33), величина k должна быть одинакова для любой глубины. Поэтому k определяется как среднеарифметическое из ряда значений n/ρ^{-b} , вычисленных по данным изысканий для конкретного слоя. Используя полученное таким образом k рассчитаем n для любого давления ρ . Величины n , полученные непосредственно по данным изысканий и с помощью формулы (6.3), отличаются не более чем на 10–15%.

Для иллюстрации порядка расчета осадок по предлагаемой методике рассмотрим пример. Требуется определить осадку оснований при исходных данных, приведенных на рис. 34 (сжимаемая толща равна 4,1 м, глубина заложения фундамента – 2,7 м).

По формуле (6.3) рассчитываем значения k для глинистых и песчаных грунтов: $k_1 = 0,53 \sqrt[3]{0,047} = 0,192$;

h, м	Литологический разрез	Пористость ρ	$\rho_{пр}$, МПа	Расчетная схема фундамента	Номер слоя i	$\rho_{пр i}$, МПа	h_i , м	ρ_{s_i} , МПа	
1	Суглинок								
2		0,53	0,047						
3		0,47	0,06		1	0,055	0,5	0,25	
4	Глина				2	0,07	1,2	0,20	
5		0,45	0,083						
6		0,43	0,09	3	0,09	1,0	0,16		
7	Песок				4	0,12	1,0	0,16	
8		0,43	0,12						
9		0,39	0,14	5	0,14	1,0	0,15		
10		0,37	0,16						

Рис. 34. Исходные данные для примера расчета осадок оснований по естественной пористости грунтов

$k_2 = 0,47 \sqrt[3]{0,06} = 0,184$; $k_3 = 0,45 \sqrt[3]{0,083} = 0,196$; $k_4 = 0,43 \sqrt[3]{0,09} = 0,193$ и т.д. Среднее значение k для глинистых грунтов равняется 0,191; аналогично найденное среднее значение k для песчаного грунта оказалось равным 0,147.

После этого решаем обратную задачу. Подставляя полученные значения k в уравнение (6.3), рассчитываем пористость, соответствующую природному $\rho_{пр i}$ и общему $\rho_{об i}$ давлениям в середине i -го слоя. Находим n_{1i} и n_{2i} , по значениям которых рассчитываем осадку каждого слоя по формуле

$$S_i = \left(\frac{n_{1i} - n_{2i}}{1 - n_{2i}} \right) h_i$$

и общую осадку $S_{об} = \sum_1^5 S_i$. Результаты расчетов приведены ниже:

$i = 1$	n_{1i} 0,49	n_{2i} 0,30	S_i , м 0,13
---------------	------------------	------------------	-------------------

$i = 2$	0,46	0,35	0,13
$i = 3$	0,41	0,36	0,078
$i = 4$	0,38	0,37	0,022
$i = 5$	0,37	0,37	0,000

Общая осадка $S_{об}$ составила 0,36 м.

Методика определения коэффициентов оттаивания и сжимаемости. В инженерной практике нашли применение два способа экспериментального определения сжимаемости грунтов при оттаивании под давлением — компрессионное исследование образцов в одометрах и полевые испытания грунтов горячими штампами.

Несмотря на то, что методика компрессионных испытаний нормирована, оценка достоверности получаемых характеристик сжимаемости до настоящего времени не получила исчерпывающего разрешения. Как отмечается рядом исследователей, величина модуля деформации талых грунтов, полученного штамповыми испытаниями, больше по сравнению с компрессионными данными, и это расхождение тем больше, чем большей структурной прочностью обладают испытываемые грунты.

Результаты определений сжимаемости при оттаивании мелких и средней крупности песков, выполненных УралТИ-СИЗОм в районе Нового Надыма [58], показали, что коэффициенты оттаивания, найденные в лабораторных условиях, от 2 до 13 раз, а коэффициенты сжимаемости от 2 до 6 раз выше полученных из штамповых испытаний.

С целью выравнивания границы исследуемой зоны рядом исследователей применялось устройство для оттаивания грунта вокруг штампа. В некоторых работах рекомендуется принимать ширину оттаиваемого вокруг штампа участка b_k равной диаметру штампа. При производственных испытаниях Фундаментпроект b_k принимал равным 25 см, независимо от диаметра штампа. В опытах В.П. Ушкалова [17] и В.М. Водолазкина [59] оттаивание грунта вокруг штампа не производилось. Не предусмотрено обогреваемое кольцо и в "Руководстве по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов" (1973 г.). Опытными Красноярского Промстройниипроекта показано, что ширина кольца влияет как на скорость, так и на конечную величину осадок, а следовательно, и на коэффициент оттаивания. Эти опыты проводились со штампом диаметром $d_{ш} =$

=800 мм при глубине оттаивания 400 мм (табл. 25)*. Давление на подошве штампов в процессе оттаивания составляло 0,01 МПа. Физические свойства испытанных грунтов отличались незначительно. Графики осадок даны на рис. 35.

Т а б л и ц а 25

Коэффициенты оттаивания пылевато-го суглинка по данным испытаний горячим штампом

Объемная масса скелета, г/см ³	Влажность, доли единицы			Коэффициент пористости	Ширина обогреваемого кольца, b_k	Коэффициент оттаивания
	естественная	на границе текучести	на границе растекания			
1,38	0,32	0,38	0,21	0,96	-	0,0385
1,45	0,28	0,38	0,21	0,83	$0,3 d_w$	0,106
1,45	0,29	0,36	0,22	0,88	d_w	0,107

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости оттаивания грунта вокруг штампа, но увеличение ширины обогреваемого кольца от $0,3 d_w$ до $1 d_w$ нецелесообразно, так как это требует увеличения размеров шурфа и делает установку для испытаний громоздкой. Как показали расчеты А.И. Золотаря и М.И. Когана, достаточно использовать кольцо меньших размеров ($b_k = 0,25-0,6 d_w$), но для выравнивания нижней границы талой зоны нагревать его до температуры, превышающей температуру штампа примерно на 20-25%.

Как известно, коэффициенты A и α рассчитываются по зависимости относительной осадки от давления, полученной при компрессионных испытаниях, т.е. в условиях постоянного давления по высоте образца и невозможности бокового расширения грунта. Первое условие (постоянство давления по глубине оттаянного под штампом грунта) в полевых опытах с достаточной для практических целей точностью обеспечивается ограничением глубины оттаивания до половины

* Все опыты методического характера в полевых и лабораторных условиях выполнены Г.М. Пахомовой.

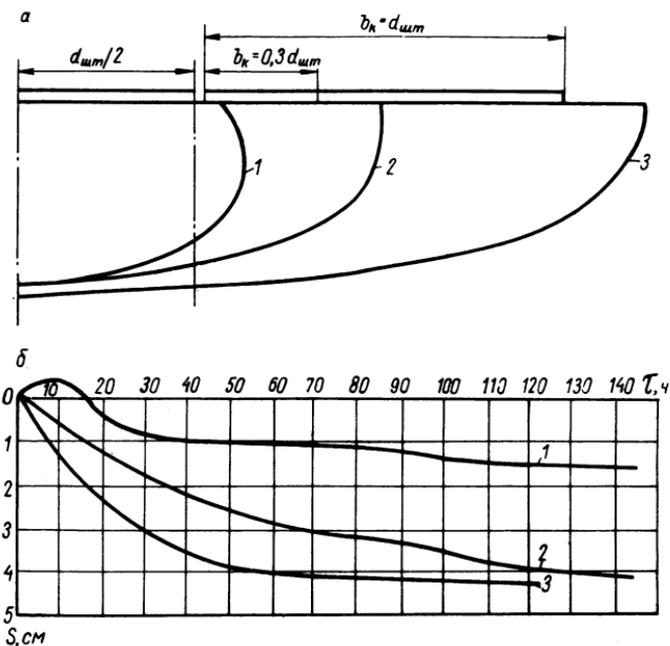


Рис. 35. Граница оттаивания (а) и осадка грунта (б) при оттаивании горячим штампом

1 - без обогреваемого кольца; 2 - с обогреваемым кольцом шириной $b_k = 0,3 d_{шт}$; 3 - то же, $b_k = d_{шт}$

диаметра штампа. Показанная необходимость оттаивания грунта вокруг штампа с целью выравнивания нижней границы чаши оттаивания влечет за собой возможность бокового расширения грунта в процессе уплотнения его ступенями нагрузок.

На рис. 36 представлены для сравнения графики относительной осадки при уплотнении грунта ступенями нагрузок в полевых опытах (физические свойства см. табл. 25) и по данным лабораторных компрессионных испытаний (средние из опытов, выполненных с двух- и трехкратной повторяемостью на образцах, отобранных непосредственно у места штамповых испытаний). Давление при оттаивании и ступени уплотняющих нагрузок в полевых и лабораторных испытаниях принимались одинаковыми. Только для случая, когда в полевых условиях обогреваемое кольцо не применялось, относительная осадка грунта, полученная в одометре, превышала тако-

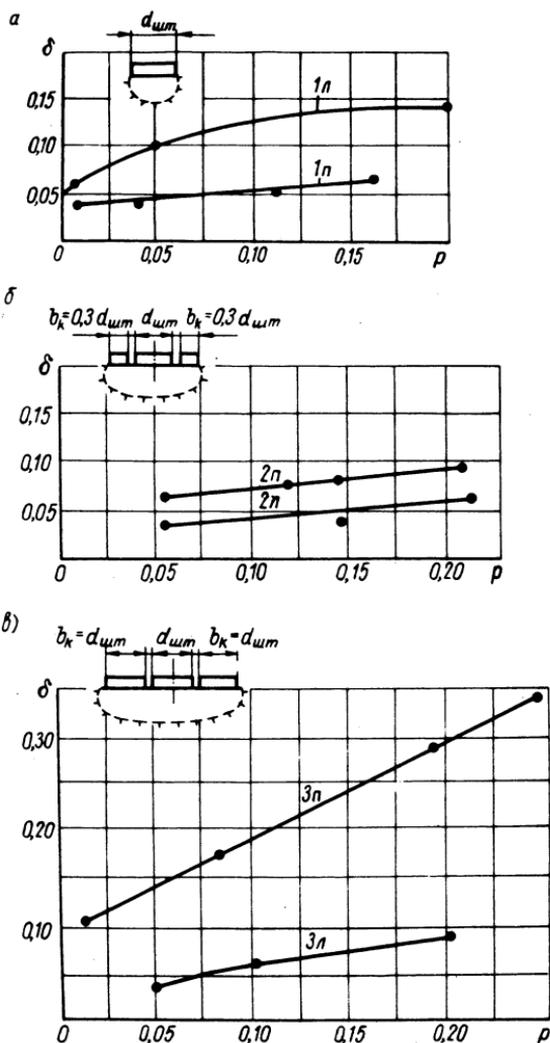


Рис. 36. Зависимость относительной осадки от давления по данным полевых испытаний (индекс П) при различной схеме оттаивания и лабораторных компрессионных (индекс Л) опытов

вую по данным штамповых испытаний. При наличии обогреваемого кольца (рис. 36, б и в) относительная осадка в полевых условиях, вычисленная без учета бокового расширения грунта, была больше, чем в лабораторных, причем с увеличением ширины кольца это превышение увеличивалось.

Таким образом, несоответствие данных полевых и лабораторных опытов при определении характеристик сжимаемости оттаивающих грунтов следует отнести прежде всего за счет несоблюдения в первом случае компрессионных условий.

Замеры температуры грунта под штампом, выполненные при полевых испытаниях, показали, что нулевая и близкая к нулю температура наблюдается лишь на границе чаши оттаивания. Мерзлый грунт, непосредственно примыкающий к талому слою, уже на глубине 1-2 см имел температуру минус 1-2°C. Учитывая это, расчетную схему работы горячего штампа можно принять в виде сжимаемого цилиндра оттаившего грунта на жестком (твердомерзлом) основании и в жесткой обойме, как это предложено А.И. Золотарем.

Указанная схема работы обуславливает необходимость учета бокового расширения грунта при вычислении коэффициента сжимаемости по данным полевых опытов. Решение такой задачи применительно к гибкому штампу получено А.И. Золотарем 60. Для жесткого штампа им предложен следующий способ обработки результатов опытов. Для каждой i -й ступени давления вычисляется среднее значение относительной осадки оттаявшего грунта. По совокупности этих значений строится прямая $\delta = f(p)$. Деформативные характеристики (коэффициенты оттаивания A и сжимаемости a) находятся как параметры этой прямой, уравнение которой имеет вид

$$\delta = A + ap \frac{d_w}{h_{cp}} \cdot \frac{K_0}{\beta}, \quad (6.4)$$

где h_{cp} — глубина оттаивания грунта под штампом, средняя из зафиксированных для каждой ступени давления; K_0 — безразмерный коэффициент, которым учитывается влияние на осадку глубины сжимаемой зоны, жесткости штампа, вида грунтов, расчетной схемы основания. Значения K_0 , по данным [60], приведены в табл. 26.

На величину коэффициента оттаивания оказывает влияние давление на грунт в процессе оттаивания. В большинстве работ рекомендуется производить оттаивание под давлением, равным 0,01 МПа, не превышающим структурной прочности основных видов дисперсных грунтов. Некоторые авторы указывают на необходимость оттаивания грунта под природным давлением или приходят к выводу о независимости осадки оттаивания от давления.

Значения коэффициента K_0

$\frac{h_{от}}{d_w}$	$\frac{b_k}{d_w}$	При M_0 равном			
		0,27	0,30	0,35	0,42
0,4	0,25	0,256	0,243	0,216	0,166
	0,50	0,260	0,248	0,225	0,182
	0,25	0,300	0,285	0,253	0,193
0,5	0,50	0,306	0,293	0,267	0,219
	0,25	0,341	0,323	0,286	0,216
0,6	0,50	0,345	0,331	0,302	0,250

Лабораторные опыты по выявлению влияния величины давления на численные значения коэффициентов оттаивания и сжимаемости дали следующие результаты. Испытывались как искусственно замороженные, так и вечномерзлые грунты ненарушенной структуры. Замороженные образцы готовились следующим образом: керны талого суглинка, взятые с глубин 7 и 14 м, устанавливались в холодильную камеру при температуре минус 6°C. Их замораживание производилось под природным давлением. Монолиты мерзлых грунтов отбирались в шурфе на опытной площадке на глубинах 4,2 и 5,1 м. Из каждого искусственно замороженного и мерзлого монолита готовили два одинаковых образца. Физические свойства их приведены в табл. 27.

Осадка при оттаивании и уплотнении определялась в одометрах конструкции Н.А. Цытовича. Диаметр образцов равнялся 79 мм, высота 33 мм.

Оттаивание выполнялось штампом при температуре подошвы 20°C. До начала оттаивания прикладывалась нагрузка обжатия, равная природному давлению. Затем один из параллельных образцов оттаивал под собственным весом штампа (0,006 МПа) с уплотнением его после оттаивания ступенями давлений ($p_1 = 0,025$ МПа; $p_2 = 0,047$ МПа; $p_3 = 0,08$ МПа; $p_4 = 0,175$ МПа; $p_5 = p_{пр}$), каждая последующая ступень прикладывалась после стабилизации осадки. Второй образец оттаивал под природным давлением.

Результаты всех опытов показали, что оттаивание незагруженных образцов сопровождалось увеличением их объема за счет разуплотнения и набухания. Первоначальной вы-

Физические свойства испытанных в лабораторных условиях образцов суглинка

Глубина отбора проб, м	Природное давление, МПа	Плотность, г/см ³	Объемная масса скелета грунта, г/см ³	Влажность, %	Коэффициент пористости
4,2	0,084	2,60	1,67	19,8	0,56
5,1	0,100	2,63	1,66	19,8	0,58
7,0	0,133	2,77	1,51	26,0	0,84
14,0	0,299	2,76	1,85	14,0	0,44

соты они достигали только тогда, когда в процессе уплотнения после оттаивания давление от ступеней нагрузок достигало природного. Для образцов, оттаянных под природным давлением, характерно наличие осадки как в процессе оттаивания, так и в результате консолидации оттаянного грунта. Результаты испытаний свидетельствуют о влиянии величины нагрузки на осадку оттаивания и показывают необходимость проведения оттаивания под природным давлением.

Опыты показали, что для заторфованных грунтов и торфов зависимость относительной осадки от давления имеет более выраженный криволинейный характер, чем для минеральных грунтов. Поэтому аппроксимация ее осредненной прямой приводит к значительным ошибкам. Для выявления компрессионной кривой в таких грунтах следует уменьшить ступени уплотняющего давления: для грунтов, содержащих растительные остатки, и заторфованных — до 0,05 МПа, для торфа — до 0,025 МПа. Коэффициент сжимаемости необходимо рассчитывать дифференцированно в зависимости от давления, как тангенс угла наклона прямой, соединяющей точку относительной осадки при оттаивании под нагрузкой, равной природному давлению, и точку на кривой $\delta = f(p)$, соответствующую давлению, для которого определяется значение коэффициента сжимаемости α .

При лабораторных испытаниях кольцо для выдавливания монолитов следует применять диаметром на 2–3 мм больше, чем рабочее кольцо одометра, с целью предотвращения возможного зазора между боковой поверхностью образца и

кольцом одометра; именно такого характера погрешности и приводят к увеличению относительной осадки, полученной в лабораторных опытах, по сравнению с полевыми.

§ 6.3. Зависимость характеристик сжимаемости оттаивающих грунтов от физических свойств

В связи с тем, что проведение испытаний по определению осадок оттаивающих грунтов трудоемко и требует специального оборудования, многие исследователи стремились на основе статистической обработки экспериментальных данных получить зависимость осадки при оттаивании от физических свойств грунтов. Так, осадка свободного оттаивания глинистых грунтов с ледяными включениями при частичном закрытии микропор, по данным А.М. Пчелинцева, может быть определена [56] по формуле

$$\delta = \frac{0,8 \gamma'_z (W_c - W_{MH})}{0,92 + \gamma'_z (W_c - 0,08 W_n)}, \quad (6.5)$$

где γ'_z — плотность минеральных частиц; W_c — суммарная влажность; W_{MH} — влажность минеральных слоев; W_n — влажность за счет незамерзшей воды.

Подставляя средние значения плотности в формулы, полученные В.Ф. Жуковым [62], Н.Н. Вотяковым для песчаных [56], М.Ф. Киселевым [62] — для глинистых и авторами настоящей книги — для заторфованных грунтов, найдем выражения для определения относительной осадки мерзлых грунтов, оттаивающих под давлением, а также при свободном оттаивании и дальнейшем уплотнении (табл. 28).

Т а б л и ц а 28

Формулы для расчета относительной осадки δ грунтов при оттаивании

Вид грунта	При оттаивании под давлением	При уплотнении оттаивающих грунтов
Песок	$\delta = \frac{k_1 W_c}{1,13(2,68 W_c + 0,92)}$	$\delta = \frac{W_c (k_1 - 0,09)}{1 + \epsilon_n}$
Глинистые грунты	$\delta = 1 - \delta_{ск} \left[0,37 + \frac{1}{\gamma'_z} (W_p + k_1 W_n) \right]$	$\delta = \frac{W_c - W_p - k_1 W_n}{1 - W_c \gamma'_z}$

Вид грунта	При оттаивании под давлением	При уплотнении оттаянных грунтов
Заторфованные грунты	$\delta = \kappa_n - \varepsilon_n \left(1 - \frac{q}{\kappa_3 q + \kappa_1} \right)$	$\delta = -\varepsilon_n \left(1 - \frac{q}{\kappa_3 q + \kappa_1} \right)$
Торф	—	$\delta = \left(\varepsilon_n - \frac{W_c \gamma_z}{\gamma_B} - 0,05 \right) \cdot \left[0,15 - \varepsilon_n \left(1 - \frac{p}{27p + 0,22} \right) \right]$

Значения безразмерного коэффициента κ_1 , использованного в формулах табл. 28, в зависимости от давления приведены в табл. 29.

Таблица 29
Значения коэффициента κ_1

Вид грунта	При p , МПа					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Песок	0,14	0,17	0,21	0,22	0,23	0,25
Глина:						
$17 < W_n < 21$	1,10	0,80	0,72	0,65	0,57	0,50
$21 < W_n < 26$	1,00	0,75	0,60	0,55	0,50	0,45
$20 < W_n < 32$	0,90	0,65	0,57	0,50	0,42	0,35
$W_n > 32$	0,80	0,55	0,47	0,40	0,35	0,30
Глинистый заторфованный грунт	0,95	0,65	0,50	0,35	0,28	0,22
Песчаный заторфованный грунт	2,22	1,70	1,38	1,10	0,96	0,88

Величины безразмерного коэффициента κ_2 в зависимости от влажности составляют:

$W_c \dots$	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5
$\kappa_2 \dots$	0,035	0,065	0,090	0,150

Безразмерный коэффициент κ_3 принимается равным для песчаных заторфованных грунтов - 6,67, для глинистых заторфованных грунтов - 2,14; безразмерный коэффициент κ_4 равен 0,01 для песчаных заторфованных грунтов и 0,025 - для глинистых заторфованных грунтов.

**§ 6.4. Оценка критической толщины
слоя торфяных грунтов
в основаниях зданий и сооружений**

По особенностям строительства на торфах и заторфованных грунтах, как и на минеральных грунтах по принципу Ц, можно выделить следующие способы использования их в качестве оснований:

с допущением оттаивания в процессе эксплуатации зданий и сооружений;

с предпостроечным оттаиванием;

с предпостроечным оттаиванием и упрочнением.

Выбор того или иного способа производится на основании сравнения расчетных осадок оснований S_p с предельно допустимыми S_{np} : $S_p \leq S_{np}$.

В свою очередь

$$S_p = \delta_p h, \quad (6.6)$$

где h - толщина сжимаемого слоя; δ_p - относительная осадка при данном давлении.

Если подставить в формулу (6.6) величины предельных осадок зданий и сооружений и значения относительных осадок δ_p , то получим

$$h_{кр} = S_{np} / \delta_p. \quad (6.7)$$

Величина $h_{кр}$ представляет собой толщину слоя торфяного грунта, которая даст при данной нагрузке предельную величину осадки. Если толщина грунта, расположенного непосредственно под подошвой фундамента, меньше его критического значения $h_{кр}$ и ниже расположен плотный минеральный грунт, осадкой которого можно пренебречь, то возможен первый способ использования грунтов в качестве оснований (с оттаиванием их в процессе эксплуатации зданий и сооружений). Величина осадки при этом не превысит предельной и может быть определена в каждом конкретном случае расчетом. Значения критической толщины заторфованных грунтов при оттаивании под давлением для различной степени заторфованных песчаных и глинистых грунтов, рассчитанные в зависимости от вида грунта, предельной осадки и нагрузки, даны на графиках (рис. 37,а)

Если толщина торфяного слоя под подошвой фундамента больше его критического значения, рассчитанного для условия оттаивания под давлением, то осадки будут заведомо

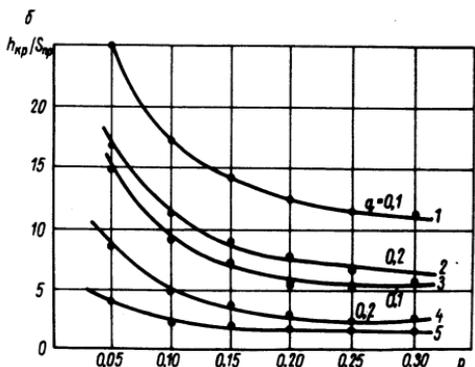
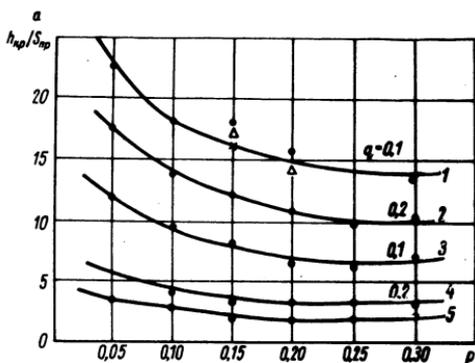


Рис. 37. Зависимость $h_{кр}/S_{пр}$ от давления при различной степени заторфованности грунтов

а - грунты, оттаивающие под давлением; б - предварительно оттаянные; 1, 2 - песчаные заторфованные; 3, 4 - глинистые заторфованные; 5 - торф

больше предельных и возможен только второй или третий способы использования грунтов в качестве оснований (с предпостроечным оттаиванием или с оттаиванием и упрочнением).

Чтобы при этом выявить возможность применения второго способа использования грунтов в качестве оснований (только с предварительным оттаиванием), вычислены значения критической толщины слоя предварительно оттаянных грунтов. Расчет производился по тем же формулам с исключением относительной осадки при оттаивании. Полученные результаты даны на графиках (рис. 37, б).

Таким образом, если толщина заторфованного слоя под подошвой фундаментов больше его критической величины при условии его оттаивания под давлением (см. рис. 37, а), но меньше критической величины при предварительном оттаивании, то возможно применение способа использования грунтов в качестве основания с предварительным оттаиванием. При величине слоя заторфованного грунта, превышающей его критическое значение для предварительно оттаянного грунта

(рис. 37,б), необходимо применять третий способ использования грунтов в качестве оснований.

Значение давления на графиках представляет среднюю величину уплотняющего давления в заторфованном слое p_{cp} . Если оттаивание грунтов оснований происходит в процессе строительства и эксплуатации зданий, то p_{cp} равно сумме природного и дополнительного давления. В этом случае допустимое давление под подошвой фундамента p_{ϕ} может быть рассчитано по формуле, выведенной на основании закона распределения давления в грунте:

$$p_{\phi} = \frac{p_{cp} - \gamma'_0 h_{\phi} (1-\alpha) - 0,5 \gamma'_T h_{кр}}{\alpha}, \quad (6.8)$$

где γ'_0 — объемная масса грунта, г/см³; h_{ϕ} — глубина заложения фундамента, см; γ'_T — объемная масса торфяного грунта, г/см³; α — коэффициент изменения давления в грунте, учитывающий форму подошвы фундамента и принимаемый по [64]; $h_{кр}$ — критическая толщина торфяного грунта (по графику рис. 37).

Если же оттаивание грунтов выполнено до начала строительства, то задание p_{cp} и расчет p_{ϕ} будут обусловлены степенью консолидации грунтов до момента возведения фундаментов.

Значения предельно допускаемой величины $S_{пр}$ при определении критической толщины торфяных грунтов в основаниях для зданий и сооружений, специально не приспособленных к повышенным неравномерным деформациям, не должны превышать величин, указанных в СНиП П-15-74; для зданий и сооружений, имеющих специальные усиления конструкций стен, — значений, приведенных в табл. 30 [64], а для сооружений и обустройств нефтедобывающей промышленности — в табл. 31 [65].

Все данные по определению характеристик сжимаемости и оценке критической толщины торфяных грунтов в основаниях приведены для случая стабилизированных, конечных осадков. Осадка торфа во времени S_T оценивается в зависимости от коэффициента консолидации, средняя величина которого может быть принята для слаборазложившегося торфа равной 10, для среднеразложившегося — 5, для сильноразложившегося — 1 см²/год [66]:

$$S_T = \kappa S, \quad (6.9)$$

Таблица 30

Предельные деформации оснований, зданий и сооружений с конструктивным усилением стен

Несущие конструкции	Предельная осадка, см	Предельная скорость осадки, см/год	Крен, тысячные доли от длины стены	Относительный прогиб, тысячные доли от длины стены
Стальные рамные и армокаменные	25,0	8,0	4,0	2,5
Кирпичные стены, армированные железобетонными поясами	12	3,5	2,4	1,2

Таблица 31

Предельные деформации оснований сооружений и обустройств нефтедобывающей промышленности

Сооружения и обустройства	Предельная осадка, см	Крен, тысячные доли единицы
---------------------------	-----------------------	-----------------------------

I. Центральный товарный парк (ЦТП)

- | | | |
|---|----|---|
| 1. Стальные цилиндрические вертикальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью до 10 тыс. м ³ | 25 | 8 |
|---|----|---|

II. Опорный пункт бурения нефтяных скважин

- | | | |
|---|----|----|
| 1. Буровая установка БУ-80 или БУ-75 на участке 10x10 м на песчаной подушке; буровая установка, совмещенная с насосным агрегатом, а также склад труб на участке 20x10 м | 30 | 10 |
| 2. Насосный агрегат к буровой установке БУ-80 или БУ-75 на участке 14x10 м | 25 | 10 |
| 3. Резервуар вместимостью до 50 м ³ на участке 8x3 м | 25 | 8 |

Сооружения и обустройства	Предельная осадка, см	Крен, тысячные доли единицы
Ш. Дожимная насосная станция (ДНС)		
1. Аварийные стальные цилиндрические вертикальные резервуары вместимостью до 10 тыс. м ³	30	8
2. Буферные горизонтальные стальные резервуары вместимостью 100 м ³ на площадке 24x32 м	25	8
3. Блоки насосов распределительных греbenок, сепараторов - возбуждителей распределительных устройств	10	6
4. Блоки трансформаторной подстанции	8	8
IX. Линии электропередачи		
1. Опора для линий электропередачи напряжением 6, 35 и 110 кВ	35	10
2. Опора для линий электропередачи напряжением 220 кВ	25	5

где k - безразмерный коэффициент, зависящий от комплекса τ_c/H^2 (τ_c - время после приложения нагрузки, годы; H - мощность торфяной залежи, м):

$\tau_c/H^2 \dots$	0,030	0,074	0,098	0,197	0,288	0,403	0,569	0,852
$k \dots$	0,20	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Следует отметить, что все расчеты, относящиеся к выбору способов использования грунтов в качестве оснований по критическому значению толщины торфяного слоя, являются приближенными и могут быть использованы только в том случае, если торфяной слой подстилается практически несжимаемыми минеральными грунтами. Если же подстилающие грунты имеют повышенную льдистость или сильно сжимаемы и величина сжимаемой толши превышает критическую толщину заторфованного грунта, то в каждом конкретном случае не-

обходимо рассчитывать возможную осадку и в зависимости от ее величины выбирать способ использования грунтов в качестве оснований.

ГЛАВА 7 ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

§ 7.1. Повышение несущей способности грунтовых оснований при использовании их по принципу 1

В гл. 1 показано, что среднегодовую температуру грунта приближенно можно представить как алгебраическую сумму среднегодовой температуры воздуха и приращений к ней за счет отепляющего воздействия солнечной радиации (Δt_p) = $(B - LE) / \alpha$ и снежного покрова ($\Delta t_c = 0,07A\sqrt{R_c}$). При строительстве зданий и сооружений отепляющее воздействие солнечной радиации и снежного покрова исключается, в результате чего создается объективная тенденция к понижению температуры грунта. Она реализуется под неотапливаемыми зданиями в любом случае, а под отапливаемыми тогда, когда температура у поверхности грунта под зданием ниже, чем у поверхности грунта под снегом в естественных условиях.

Расчеты показывают, что величины Δt_p и Δt_c в рассматриваемом районе довольно велики. Приращение к среднегодовой температуре воздуха за счет солнечной радиации Δt_p составляет 2–3°C, то же, к среднегодовой — 1 ÷ 1,5°C (большие значения Δt_p характеризуют южную границу района). Величина Δt_c при движении с севера на юг изменяется от 1,5 – 2 до 4°C.

Эти цифры характеризуют максимальные возможности охлаждения грунта при строительстве. Под отапливаемыми зданиями они меньше из-за тепловыделений зданий. Характер изменения температуры грунта под зданиями с организационным съемом их тепловыделений (путем устройства холодных подполий) иллюстрируется рис. 22.

Как видно из этого рисунка, температуры грунта под зданиями с холодными подпольями понижаются до момента установления нового стационарного (предельного) состояния, соответствующего условиям на поверхности грунта застраиваемой территории (главным образом, отсутствию снега под зданиями и затенению), который наступает примерно через 2-4 года после начала строительства.

Использовать постепенное понижение температуры грунта под зданиями для повышения несущей способности их оснований можно, во-первых, путем предпостроечного охлаждения основания до температур, отвечающих предельному тепловому режиму, устанавливаемому в результате застройки, если задавать нагрузку на основание в соответствии с этими температурами; во-вторых, - нагрузку на основание задавать по предельному температурному режиму, но не сразу, а постепенно, по мере понижения температуры и набора грунтом расчетной прочности. Первый путь связан с выбором эффективных и экономичных способов охлаждения грунта.

Можно выделить две большие группы способов охлаждения. Первая группа включает способы охлаждения грунта с помощью различного рода холодильных машин (компрессионных, адсорбционных, вихревых, турбодетандерных и т.д.). Сюда же относится и охлаждение грунта за счет испарения с его поверхности веществ с низкими температурами испарения (жидкого азота, сухой углекислоты). Отличительной чертой перечисленных способов первой группы является то, что они никак не связаны с естественными (географическими) ресурсами охлаждения. Эти способы широко используются во многих отраслях народного хозяйства и широко известны из литературы. Опыт применения их для охлаждения грунта у нас и за рубежом освещается, например, в книге Н.Г. Трупака [67].

Вторая группа включает способы, базирующиеся на использовании естественных факторов: холодного воздуха в качестве хладоносителя, ветра как источника энергии, естественного перепада между температурами грунта и воздуха и т.д. Эти способы более экономичны, так как для их осуществления не требуется (или почти не требуется) энергии извне. Их недостаток - сезонность - может быть устранен соответствующим распределением работ нулевого цикла. Основные способы этой группы приведены в табл. 32.

Способы охлаждения грунта с использованием естественных факторов

А. Способы прямого воздействия	Б. Способы косвенного воздействия
<p>1. Охлаждение грунта естественным холодным воздухом через скважины: с использованием вентиляторов; за счет тепловой конвекции и энергии ветра</p> <p>2. Охлаждение грунта автономными охлаждающими устройствами: жидкостными; парожидкостными</p>	<p>1. Изменение составляющих теплового баланса путем: затенения поверхности; увеличения альбедо (окраска поверхности в светлые тона, уменьшение шероховатости и т.д.)</p> <p>2. Изменение теплоизоляционных свойств поверхности путем: удаления снежного покрова; удаления торфяного покрова; теплоизоляционного покрытия поверхности грунта в летний период</p> <p>3. Комплексные приемы: устройство проветриваемых подполий или холодных первых этажей; устройство вентилируемых в зимний период года подсыпок</p>

Способы А действуют непосредственно на температуру грунта, а способы Б — косвенно, за счет изменения внешних по отношению к грунту условий, поэтому они менее эффективны в том смысле, что результат их воздействия сказывается через большой промежуток времени по сравнению со способами серии А.

Такое подразделение способов охлаждения отвечает и различному назначению охлаждающих устройств. Повышение

несущей способности мерзлых оснований связано с работой двух типов охлаждающих устройств. Первые предназначены для разового предварительного охлаждения до определенной температуры, вторые — для сохранения этого пониженного значения температуры в течение всего срока эксплуатационной службы здания или сооружения (постоянное охлаждение).

К первому типу относятся охлаждающие устройства, позволяющие охладить грунт до заданной температуры в течение времени, сопоставимого со сроками возведения фундаментов и выстаивания их незагруженными, составляющего не более 1 — 1,5 месяцев. Практика показывает, что для этой цели подходят с особы серии А. Для постоянного охлаждения целесообразно применять способы серии Б, при которых длительность работы не связана с дополнительными материальными затратами — устройством проветриваемых подполий, подсыпок с каналами и т.п. Если продолжительность предварительного охлаждения не лимитируется сроками, то для него могут быть использованы также способы косвенного воздействия.

Остановимся на наиболее распространенных способах этой серии подробнее.

Способ А.1 (вентиляция грунта холодным воздухом) широко применяется в северном строительстве для восстановления расчетного температурного режима, нарушенного буровыми работами, для создания мерзлых завес в земляных плотинах, охлаждения пластично-мерзлых грунтов (М.В. Ким и др., 1970; В.М. Придорогин, 1970; Г.Н. Максимов, 1968; А.А. Коновалов, 1969 и др.) и привлекает своей простотой и дешевизной. Наиболее часто применяемая конструкция охлаждающего устройства — система из двух концентрических труб (вместо наружной трубы может быть использована скважина). Во внутреннюю трубу с помощью вентилятора нагнетается холодный воздух, который затем поступает в кольцевую полость между наружной и внутренней трубой, где забирает тепло из окружающего грунта. Система может работать также по режиму "разрежение", когда воздух отсасывается через внутреннюю трубу. Недостаток таких устройств заключается в ощутимых затратах на электроэнергию и в необходимости наличия источника электроэнергии.

Исследования, проведенные в Красноярском Промстройниипроекте, показали, что при достаточном возвышении внутренней трубы над устьем скважины Δh и больших перепа-

дах температур грунта и воздуха ΔT можно обойтись без вентиляторов.

Основными параметрами, характеризующими работу охлаждающих устройств, представляющих собой систему из двух концентрических труб, заполненную хладоносителем (и автономных и потребляющих электроэнергию), являются средняя температура хладоносителя (в данном случае – воздуха) $\bar{t}_{ш}$ и скорость его движения $v_{ш}$ в кольцевой щели между стенками труб. По этим показателям затем определяется, как это будет показано ниже, температура поверхности заглубленной части охлаждающего устройства t_n (или, что то же, температура стенок скважины), а в зависимости от t_n по методике, изложенной в гл. 3, – температурные поля грунта, формирующиеся под воздействием охлаждающих устройств.

Анализ экспериментальных данных по охлаждению грунта холодным воздухом через буровые скважины как с использованием вентиляторов, так и без них показывает, что температура воздуха в кольцевой щели зависит, главным образом, от температуры наружного воздуха t_g ; влияние прочих факторов – размеров охлаждающего устройства, начальной температуры грунта, скорости движения воздуха – прослеживается незначительно. Причем зависимость $\bar{t}_{ш}$ от t_g линейна:

$$\bar{t}_{ш} = \alpha t_g, \quad (7.1)$$

где α – коэффициент, отражающий влияние на $\bar{t}_{ш}$ других факторов, прежде всего расходов воздуха в скважине Q . В наиболее вероятном диапазоне изменения размеров труб и скважин и скоростей движения воздуха в кольцевой щели не менее 0,5 м/с величина α изменяется в пределах от 0,7 до 0,86.

Найдем аналитическое выражение для средней температуры воздуха в кольцевой щели между стенками скважины и трубы. На основании экспериментальных данных можно принять, что при режиме нагнетания температура на дне скважины равна t_g (что особенно близко к действительности при хорошей теплоизоляции внутренней трубы). Тогда уравнение теплового баланса для поверхности скважины будет записано в виде

$$\int_0^F \frac{dt}{dz} \Big|_{z=0} \cdot \lambda (t - t_0) dF = \int_{t_g}^{\bar{t}_{ш}} c_g Q dt, \quad (7.2)$$

где, кроме известных обозначений, F — площадь стенок скважины; c_g — объемная теплоемкость воздуха; $c_g = 0,31$ ккал/(м³·ч); $\frac{dt}{t} = f(F)$.

Производная $\frac{d \ln t}{dz}$ определяется из уравнения (3.17). Величина $1/1,8 F_0 \frac{d \ln t}{dz}$ сравнительно мало изменяется во времени (в пределах 0,4–0,6) в диапазоне наиболее вероятных сроков продолжительности охлаждения скважины (5–30 суток). Примем ее равной 0,5. Тогда после преобразования зависимости (7.2) получим

$$\bar{t}_{щ} = t_0 + (t_g - t_0) \exp\left(-\frac{0,5 \lambda F}{c_g Q z_c}\right). \quad (7.3)$$

Крайние значения Q в экспериментах равнялись 400 и 70 м³/ч. При этих величинах Q значения прочих переменных, входящих в (7.3), составляли:

при $Q = 400$ м³/ч $t_0 = 3^\circ\text{C}$, $\lambda = 1$ ккал/(м·ч·°C),
 $F = 5,2$ м², $z_c = 0,15$ м;

при $Q = 70$ м³/ч $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $\lambda = 0,9$ ккал/(м·ч·°C),
 $F = 2,3$ м², $z_c = 0,1$ м.

Подставив эти значения в формулу (7.3), получаем

при $Q = 400$ м³/ч

$$\bar{t}_{щ} = 0,89 t_g + 0,33;$$

при $Q = 70$ м³/ч

$$\bar{t}_{щ} = 0,7 t_g.$$

Значения $\bar{t}_{щ}$, найденные по предлагаемой аналитической формуле, соответствуют экспериментальным данным.

Другой определяющий параметр — скорость движения воздуха в кольцевой щели при использовании вентиляторов зависит от производительности последних. Рассмотрим особенности циркуляции воздуха в автономных системах, в дальнейшем для краткости именуемых ВКО (воздушные конвективные охладители).

Циркуляция воздуха в ВКО вызывается тепловой конвекцией и ветром. Если открытые поверхности скважины и внутренней трубы были расположены на одном уровне, то причиной циркуляции воздуха в скважине в холодный период года является тепловая конвекция, возникающая в результате отрицательного перепада температуры воздуха в верхней и нижней частях скважины. Тепловая конвекция имеет место и в пустой скважине. При этом периферийные слои воздуха, как

более разогретые стенками скважины, поднимаются вверх, а более холодный воздух в центральной части опускается вниз. Однако ввиду перемешивания холодного и теплого потоков воздуха скорости их в вертикальном направлении невелики и часто не улавливаются анемометрами обычного типа. Внутренняя труба разделяет потоки и тем самым увеличивает скорость циркуляции. При этом возможны два направления тока воздуха: 1) вниз по внутренней трубе (холодный воздух) и вверх по кольцевой щели (теплый воздух); 2) вниз по кольцевой щели (холодный воздух) и вверх по внутренней трубе (теплый воздух). Конкретно направление тока воздуха определяют следующие тенденции:

вследствие отепляющего воздействия стенок скважины воздух стремится двигаться в направлении "внутренняя труба - кольцевая щель";

воздух стремится двигаться в том из двух направлений, сопротивление движению в котором (гидравлическое сопротивление) меньше.

Расчеты по известным [69] формулам для гидравлических сопротивлений в системах каналов различного сечения показали, что в системе из двух концентрических труб общее гидравлическое сопротивление, во-первых, всегда меньше при токе хладоносителя в направлении 1; во-вторых, имеет минимум при отношении диаметра скважины к диаметру внутренней трубы d_c/d_r в реальном диапазоне изменения длин применяемых на практике труб, равном 1,4-2,1; в-третьих, разницей между гидравлическими сопротивлениями в направлениях 1 и 2 можно пренебречь при $(d_c/d_r) < 2$, т.е. в результате тепловой конвекции ток воздуха всегда, это подтверждается и экспериментальными данными, имеет направление 1.

Ветер существенно усложняет характер циркуляции воздуха в скважине с внутренней трубой. В результате повышения его скорости с высотой любое возвышение внутренней трубы над верхом скважины Δh вызовет падение давления над верхом трубы и тенденцию тока воздуха в направлении 2. Для иллюстрации характера зависимости $v_{щ}$ от Δh приведем значения $v_{щ}$, наблюдаемые в Красноярске при температуре воздуха -23°C , скорости ветра 2 м/с и следующих геометрических размерах параметров ВКО; глубине скважины $h_c = 5,5$ м, диаметре внутренней трубы $d_r = 0,15$ м, глубине зазора между дном скважины и низом трубы $\Delta H = 1$ м:

$\Delta h, \text{м} \dots$	0,13	0,33	0,99	1,75
$v_{щ}, \text{м/с} \dots$	0,26	0,34	0,37	0,41

Циркуляция воздуха в скважине при этих наблюдениях осуществлялась в направлении 2.

Из изложенного следует, что тепловая конвекция в скважине и ветер, обуславливающие естественную циркуляцию воздуха в ВКО, определяют в общем противоположные направления тока воздуха. Совместное их использование, резко увеличивающее производительность ВКО, возможно только при $(d_c/d_r) < 2$; при этом воздух в ВКО движется в направлении 2. По этой причине, а также вследствие увеличения гидравлического сопротивления применение ВКО с $(d_c/d_r) > 2$ и $(d_c/d_r) < 1,4$ нецелесообразно. Указанный оптимум $1,4 < (d_c/d_r) < 2$ имеет значение и при использовании для охлаждения грунта вентиляторов; в указанных пределах обеспечивается наименьший расход электроэнергии.

Для расчета $v_{щ}$ в ВКО при любом направлении тока воздуха предлагается следующая формула, полученная путем обобщения натуральных наблюдений в Норильске и Красноярске:

$$v_{щ} = 1,27 \cdot 10^{-4} (3,03 - B) v (1 - e^{-\Delta h})^4 \Delta T^3, \quad (7.4)$$

где v — скорость ветра по данным метеостанций; $B = \frac{d_c}{d_r}$

Эффективность ВКО можно увеличить путем использования различного рода приспособлений (дефлекторов) для понижения давления на выходе или повышения его на входе в ВКО.

Способ А.2 предполагает использование жидкостного и парожидкостного устройства (термосвай), работающих в холодный период года по замкнутому циклу под действием гравитационных сил, постоянно возобновляемых вследствие охлаждения верхней части термосвай, причем во втором случае перемещение хладоносителя вверх и вниз сопровождается его фазовыми превращениями.

Идея использования подобных автономных охлаждающих устройств в жидкостном варианте для укрепления грунтовых оснований и первый опыт их практического применения принадлежат С.И. Галееву. Жидкостная термосвая конструкции С.И. Галеева представляет собой замкнутую систему из од-

ной, двух и более труб разного диаметра с циркулирующим в ней керосином, нижняя часть которой заглублена в грунт.

Наблюдения за работой однотрубных жидкостных термосвай разных, но близких к применяемым на практике размеров в Сургуте, Красноярске, Усть-Илимске показали, что средняя по глубине температура хладоносителя в них, так же как и в аналогичных воздушных охладителях, зависит прежде всего от температуры воздуха. Эту зависимость для практических расчетов можно представить в виде $\bar{t}_x \approx 0,4 t_f$.

Для более детального анализа и подбора элементов жидкостной термосвай, включая состав хладоносителя, рекомендуется следующая эмпирическая формула:

$$\bar{t}_x = 20 \left\{ 1 - \exp 0,02 \left[1 - \frac{c \Delta T \sqrt{\frac{\nu}{\alpha}} (j + 0,4)}{100 R} \right] \right\}, \quad (7.5)$$

где j — отношение площади поверхности надземной части термосвай к подземной; ν и α — коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$; c — удельная теплоемкость хладоносителя, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; R — отношение объема термосвай к площади ее поверхности, м .

Предложено устройство для повышения эффективности работы жидкостных термосвай, представляющее собой струераспределительную трубу, на внешней и наружной поверхностях которой имеются противоположно направленные лопасти, выполненную с возможностью вращения и размещаемую внутри корпуса термосвай на одном валу с трех-четырехчашечной вертушкой, служащей приемником ветрового напора.

В термосвае с описанным устройством энергия ветра преобразуется в энергию вращательного движения хладоносителя, в результате чего скорость циркуляции последнего увеличивается по сравнению с циркуляцией, обусловленной только тепловой конвекцией, и, как показывают расчеты, понижается температура. В такой термосвае скорость циркуляции является функцией в первую очередь скорости ветра и конструкции вертушки, т.е., по существу, заданной величиной. Это облегчает количественный анализ температуры хладоносителя и вывод для этого случая ее аналитического выражения, хотя бы в приближенном виде.

Как и при воздушном охлаждении, примем, что температура хладоносителя во внутренней трубе $t_{в.т}$ постоянна по

глубине (что вполне допустимо при ее хорошей теплоизоляции). Тогда для средней температуры хладоносителя в кольцевой щели $\bar{t}_{щ.1}$ справедлива формула (7.3) при подстановке в нее $t_{\beta, \tau}$ вместо t_{β} . Чтобы найти $t_{\beta, \tau}$, рассмотрим уравнение теплового баланса на поверхности подземной части термосвай (толщиной стенок пренебрегаем). Примем, что в верхней части термосвай средние температуры хладоносителя во внутренней трубе и в кольцевой щели равны. Тогда

$$\int_0^{F_H} \alpha (t_{\beta} - t) dF = \int_{\bar{t}_{щ.1}}^{t_{\beta, \tau}} c_{ж} Q dt, \quad (7.6)$$

где F_H — площадь стенок наземной части термосвай, м²; α — коэффициент конвективного теплообмена; $c_{ж}$ — объемная теплоемкость жидкого хладоносителя.

После интегрирования имеем

$$t_{\beta, \tau} = t_{\beta} + (\bar{t}_{щ.1} - t_{\beta}) \exp\left(-\frac{\alpha F_H}{c_{ж} Q}\right). \quad (7.7)$$

Совместное решение уравнений (7.7) с (7.3) дает окончательное решение для приближенных расчетов $\bar{t}_{щ.1}$:

$$\bar{t}_{щ.1} = \frac{1-B}{1-BA} t_0 + \frac{B-BA}{1-BA} t_{\beta}, \quad (7.8)$$

где

$$A = \exp\left(-\frac{\alpha F_H}{c_{ж} Q}\right), \quad B = \exp\left(-\frac{0,5 \lambda F}{c_{ж} Q z_c}\right).$$

Экспоненциальный характер зависимости $\bar{t}_{щ.1}$ от геометрических размеров, расхода, теплофизических констант, а также многократное превышение теплоемкости хладоносителя над величинами других показателей, входящих в комплексы А и В, приводят к тому, что последние практически не изменяются даже при трех- и четырехкратном изменении размеров термосвай или расхода хладоносителя (практически А и В изменяются в диапазоне 0,9–1), т.е. из формулы (7.8) следует, что средняя температура в кольцевой щели в жидкостных термосваях со струераспределителем также зависит в основном от температуры воздуха, причем в диапазоне изменения величин, входящих в комплексы А и В, наиболее близком к реальному, величина множителя перед t_0 в формуле (7.8) равна нулю, а перед $t_{\beta} = 0,6 \div 0,85$ (меньшим значениям второго множителя соответствуют меньшие геометрические размеры термосвай — главным образом их меньшая высота).

Из сравнения формул для температуры хладоносителя в воздушных и жидкостных охлаждающих устройствах видно, что в воздушных охлаждающих устройствах она во всяком случае не выше, чем в жидкостных. Однако окончательное суждение о преимуществе воздушного или жидкостного охлаждения можно сделать из сравнения температур на поверхности охладителя (на стенках скважины), в величинах которых отражены затраты тепла на конвективный теплообмен хладоносителя со стенками скважины.

Коэффициент конвективного теплообмена α зависит от физических свойств хладоносителя, его скорости, определяющей характер движения (турбулентный или ламинарный), и от геометрических размеров системы [68].

Расчеты показывают, что при охлаждении грунта вентилированием скважин холодным воздухом даже при естественной конвекции (при скорости хладоносителя 0,2–0,5 м/с) характер движения турбулентный. Скорость циркуляции жидкости в термосваях – трудноопределимый параметр (за исключением термосвай предлагаемой конструкции, в которых циркуляция хладоносителя осуществляется за счет энергии ветра). Судя по отдельным замерам, порядок ее величин для жидких нефтепродуктов следующий: 0,1±0,3 м/с – в однотрубных термосваях со струераспределителем [69]; 0,02 – 0,05 м/с – в двухтрубных установках [70]. При диаметрах труб 0,2–0,3 м первый диапазон скоростей соответствует турбулентному движению, второй – ламинарному. Причем, по-видимому, от того, что режим движения при этих параметрах близок к переходному, результаты расчетов по формулам для обоих видов движения дают примерно одинаковые значения α .

Известная формула для α в кольцевой полости [68] после несложных преобразований принимает вид

$$\alpha = M(d_1/d_2)^{0,25} \nu^{0,8} (d_2 - d_1)^{-0,2}, \quad (7.9)$$

где d_2 , d_1 – диаметры скважины и внутренней трубы; M – коэффициент, зависящий от состава хладоносителя, при ν , м/с, равный: для воздуха – 3, для 30%-ного раствора CaCl_2 – 309, для керосина – 166 Вт/(м²·°С).

Несложные преобразования и инженерная аппроксимация также известного выражения для температуры поверхности трубы t_n радиусом r_n с движущимся хладоносителем [68] дает

$$t_n = t_x + (t_r - t_x) \exp(-1,2\sqrt{Bi}), \quad (7.10)$$

где t_r — начальная температура грунта; $Bi = \frac{\alpha r}{\lambda_r}$ — критерий Био; λ_r — коэффициент теплопроводности грунта.

Расчеты по формуле (7.6) показывают, что разница между температурой стенок скважины и хладагента, например, равная 9%, обеспечивается при $Bi = 4$, что соответствует при $z_n = 0,1 \div 0,3$ м значениям $V = 8 \div 10$ м/с для воздуха и $V = 0,008 \div 0,01$ м/с — для керосина.

Из приведенного примера видно, что даже при таких малых скоростях циркуляции (меньших наблюдаемых в натуре в 4–5 раз) разница между температурами жидкости и стенок трубы невелика. Практически можно принимать, что они равны, и определять величину t_n для жидкостных термосвай по формуле (7.3) или (7.4). Расчеты температур поверхности скважины при работе воздушных охладителей и термосвай по изложенной методике показывают, что при $Bi > 0,5$ (при $d = 0,1 \div 0,3$ м это соответствует скоростям воздуха в кольцевой щели примерно 2–3 м/с) величины t_n при воздушном охлаждении грунта ниже, чем при охлаждении его термосваями. При больших скоростях движения воздуха воздушное охлаждение эффективней.

Из способов серии Б (см. табл. 32) наиболее эффективными являются уборка снежного покрова и затенение поверхности. Способы серии Б.3 (см. табл. 32) позволяют комплексно использовать оба этих приема. Методика расчетов соответствующих устройств (подполий, подсыпок) известна из литературы [31].

Обе серии способов различаются геометрической формой охладителей. В серии А охладители имеют форму заглубленного цилиндра, в серии Б — форму четырехугольника или полосы на поверхности грунта. Решения для температурных полей грунта, создаваемых источниками такой конфигурации при известной температуре их поверхности, рассмотрены в гл. 3.

Указанного расчетного аппарата достаточно для осуществления обоих путей (методов) повышения несущей способности вечномерзлого грунта: 1) комбинированного охлаждения, заключающегося в предварительном охлаждении основания и сохранения пониженной температуры в течение всего срока эксплуатационной службы сооружения; 2) постепенной загрузки оснований.

Оба этих метода позволяют задавать нагрузки на основания практически независимо от температуры грунта в естественных условиях, руководствуясь только технико-экономическими и конструктивными соображениями (естественный фактор, ограничивающий возможности комбинированного охлаждения, только один — среднегодовая температура наружного воздуха, ниже которой температура у поверхности грунта в подпольном пространстве не может быть). В соответствии с этим порядок расчета вечномерзлых грунтовых оснований значительно отличается от существующего. Несущая способность не определяется, а задается из условия ее равенства нагрузке ($\Phi = N$) от сооружения. Затем из формулы главы СНиП П-18-76 для Φ определяются расчетные t_p и среднегодовые температуры вечномерзлого грунта, которые обеспечивают заданную несущую способность. Зная среднегодовую температуру грунта, по формулам для стационарного (предельного) температурного режима можно найти (обратная задача) среднегодовую температуру у поверхности грунта в подпольном пространстве и рассчитать необходимый для ее поддержания режим воздухообмена — площадь продухов.

После этого приступают ко второй части расчета. При комбинированном охлаждении на этой стадии определяется продолжительность работы систем предварительного охлаждения грунтового основания, необходимая для установления в нем расчетного температурного режима (при котором температуры не превышают значения t_p). Методика расчета комбинированного охлаждения, в том числе первого этапа расчета, общего для обоих методов, подробно изложена в "Рекомендациях по проектированию систем воздушного охлаждения для упрочнения вечномерзлых грунтовых оснований зданий" (Красноярск, 1971 г.), разработанных авторами.

Эти рекомендации использованы в проектах ремонтно-механических мастерских в Игарке и завода ЖБИ в Якутске. Стоимость фундаментов благодаря применению предварительного охлаждения пластично-мерзлых оснований этих зданий сократилась в первом случае на 175 тыс. руб. и во втором — на 169 тыс. руб. по сравнению с другим возможным вариантом — сохранением естественного температурного режима, но с большим количеством свай.

§ 7.2. Рациональные типы фундаментов
и оснований при строительстве
по принципу I

При строительстве в северных районах с сохранением вечномерзлого состояния грунтов оснований повсеместное применение находят свайные фундаменты.

В отношении технологии устройства таких фундаментов в условиях северной части Западной Сибири следует отметить, что в районах с глинистыми заторфованными грунтами, находящимися в пластично-мерзлом состоянии, возможна забивка свай непосредственно в мерзлый грунт или в предварительно пробуренные лидерные скважины с диаметром, меньшим, чем диагональ сечения свай. Это обеспечивает возможность их загрузки сразу после установки и в ряде случаев способствует повышению их несущей способности.

Установку свай в оттаянный паром грунт или в предварительно пробуренные скважины, заполняемые песчано-известковым раствором, целесообразно производить с помощью вибропогружателя. Пробное погружение свай с вибронаконечником, выполненное ЦНИИСКом и НИИОСПом, показало возможность уменьшения при этом объема оттаиваемого грунта в 2 раза, что ведет к сокращению сроков смерзания свай. В процессе вибропогружения плотность грунта, окружающего сваю, увеличивается и несущая способность ее повышается. Хорошие результаты дает также вибрирование песчано-известкового раствора вокруг свай с помощью глубинных вибраторов, способствующих его уплотнению и увеличению сил смерзания [72].

Наименьший расход материалов достигается в том случае когда несущие способности свай по грунту и по материалу будут близки между собой. Из условия экономии материалов и уменьшения веса целесообразно применять сваи большей длины и меньшей площади поперечного сечения [72]. Оптимальное соотношение рабочей длины свай l и стороны поперечного (квадратного) сечения a имеет вид

$$\frac{l}{a} = \frac{17,2 - 0,96R^H}{3,2R_{сн}^H},$$

где R^H - нормативное сопротивление грунта нормальному давлению, МПа; $R_{сн}^H$ - среднее по длине заделки свай в мерзлый грунт нормативное сопротивление грунта сдвигу по боковой поверхности свай, МПа.

Конструктивные мероприятия по увеличению несущей способности вмороженных свай можно разделить на две группы, первая из которых направлена на развитие площади боковой поверхности, вторая – на увеличение площади опоры. К первой группе относятся сваи с выступами по боковой поверхности, крестообразные, с шероховатой боковой поверхностью и т.д.

По данным Е.П. Шушериной [73] и А.С. Герасимова [74], создание шероховатости по боковой поверхности увеличивает сопротивление сдвигу в 1,3 раза. В результате улучшения контакта с грунтом и шероховатости поверхности увеличивается несущая способность буронабивных свай по сравнению с обычными. Исследованиями, выполненными Институтом мерзлотоведения СО АН СССР, установлено, что при температуре вечномерзлых грунтов, равной или выше минус 2°C, и подогреве бетона перед укладкой до 30–40°C для его схватывания и твердения нет необходимости в дополнительном электроподогреве. Период набора прочности смерзания свай с мерзлым грунтом и восстановления температурного режима грунта при этих условиях не превышает одного месяца. Учитывая отдаленность многих районов от баз стройиндустрии, буронабивные сваи могут оказаться эффективными в условиях северной части Западной Сибири.

Увеличение площади опирания сваи на вечномерзлый грунт достигается устройством термоуширенной пяты. Внедрению таких свай предшествовали исследования по технологии устройства и выявлению несущей способности [75]. Разработка механическими уширителями и камуфлетирование мерзлого грунта затруднены, поэтому уширение скважины предлагается создавать путем выдержки горелки бурового агрегата в течение 30–70 мин на нижней отметке скважины. Получаемый таким образом диаметр уширения составлял 90 – 135 см. После установки железобетонной сваи уширение и зазоры между свайей и стенками скважины бетонировались раздельным способом – засыпкой щебнем и цементацией под давлением до 5 ат.

Несущая способность таких свай в высокотемпературных вечномерзлых и талых песчаных грунтах оказалась в 5–8 раз выше несущей способности обычных железобетонных свай, работающих в аналогичных мерзлотно-грунтовых условиях [75]. Работа вечномерзлого грунта на сжатие более полно используется сваями с наклонной боковой поверхностью (конусными, пирамидальными), которые комплексно передают нагрузку на мерзлый грунт, обеспечивая как сопротивление

сдвигу, так частично и сопротивление нормальному давлению по всей боковой поверхности.

В талых грунтах результаты исследований работы свай с наклонной боковой поверхностью доведены до практического применения: разработана методика расчета и внедрены в практику строительства пирамидальные сваи, несущая способность которых в 1,5–2 раза выше по сравнению с несущей способностью призматических свай того же объема [76]. В мерзлых грунтах установлено также увеличение несущей способности свай с наклонными гранями.

Лабораторные испытания работы конусных моделей свай показали, что несущая способность их увеличивается с увеличением угла конусности и, кроме того, зависит от вида грунта. Так, в песчаном грунте несущая способность свай с углом конусности 3° увеличилась по сравнению с несущей способностью цилиндрической сваи в 3 раза, в глинистом грунте – в 1,3 раза.

На площадках, сложенных сильнольдистыми грунтами, подземными льдами, торфом, эффективным может оказаться применение песчаной подушки при устройстве столбчатых и песчаной рубашки – при устройстве свайных фундаментов. Толщина подушки назначается на условия предотвращения предельных деформаций оснований.

При устройстве песчаной рубашки вокруг свай нельзя допускать чрезмерного увлажнения песка, которое может привести к образованию ледяной пленки по боковой поверхности.

При неблагоприятных мерзлотно-грунтовых условиях перспективными являются фундаменты с развитой площадью опоры, которые с целью сохранения естественного сложения грунтов и противотермокарстовой защиты устраиваются в слое подсыпки (плитные фундаменты в зданиях с проветриваемым подпольем, фундаменты-оболочки, профиль поперечного сечения которых позволяет устроить вентилируемые каналы и т.д.).

§ 7.3. Повышение несущей способности грунтовых оснований при использовании их по принципу П

На широко распространенных в северной части Западной Сибири обводненных и сильнольдистых участках, территориях, сложенных слабыми заиленными и заторфованными грун-

тами, обычно предпостроечное оттаивание является недостаточной мерой для обеспечения необходимой несущей способности оснований и они нуждаются в дополнительном упрочнении. Упрочнения можно подразделить на механические (трамбование, виброуплотнение), физические (уплотнение пригрузкой, дренированием), электрохимические (электроосмос с инъекцией закрепляющего реагента).

В водонасыщенных грунтах механические методы не приводят к желаемым результатам без отвода грунтовых вод. Электроосмос может быть рекомендован для глинистых грунтов с малым коэффициентом фильтрации. Воздействие постоянного тока на грунтовую влагу приводит к обезвоживанию грунта и уплотнению его скелета.

В торфяных грунтах наиболее применимы физические методы, например предпостроечное уплотнение пригрузкой и дренированием с доведением осадки до предельной величины, ожидаемой в результате нагрузки от здания или сооружения. Сущность этого способа заключается в приложении на оттаянный грунт давления, равного или большего, чем расчетное, и выдержке его до полной стабилизации осадки. В качестве пригрузки удобно использовать песчаный слой, укладываемый методом намыва или отсыпки. Консолидация оттаянных торфяных грунтов может быть ускорена путем устройства вертикальных песчаных дрен в зимний период до начала оттаивания.

Протекание осадки оттаянной торфяной залежи во времени при пригрузке песчаным слоем и наличии вертикальных дрен определится по формуле [77]

$$S_t = \theta_{zv} S_\infty, \quad (7.11)$$

где θ_{zv} — степень консолидации при работе дрен и пригрузочного слоя; S_∞ — конечная осадка торфяного слоя только от пригрузки без учета влияния песчаных дрен.

Значение θ_{zv} определяется в зависимости от составляющих степени консолидации, обусловленных дренами θ_z (табл. 33) и пригрузочным слоем θ_v :

$$\theta_{zv} = \theta_v + \theta_z (1 - \theta_v). \quad (7.12)$$

Зависимость степени консолидации торфа θ_v при уплотнении его пригрузочным слоем от фактора времени T_v приведена ниже:

$T_v \dots$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\theta_v \dots$	0,36	0,50	0,61	0,70	0,76	0,82	0,86
$T_v \dots$	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$\theta_v \dots$	0,89	0,91	0,93	0,96	0,97	0,98	0,99

Факторы времени и параметры \checkmark , рассчитываются по формулам

$$T_z = c_z \tau / d_e^2, \quad T_v = c_v \tau / H^2, \quad \checkmark = d_e / d_w,$$

где c_z - коэффициент консолидации торфа при работе дрен. Среднее значение c_z может быть принято равным $10 \text{ м}^2/\text{год}$ [77]; d_e - диаметр зоны влияния дрен, м; d_w - диаметр дрены, м; τ - время консолидации, годы; H - толщина торфяного слоя, м; c_v - коэффициент консолидации торфа при одностороннем дренировании с помощью пригрузочного слоя.

Т а б л и ц а 33
Значения степени консолидации торфа θ_z при наличии песчаных вертикальных дрен

θ_z	T_z при значениях \checkmark , равных					
	3	5	10	15	20	25
0,1	0,007	0,012	0,021	0,026	0,030	0,033
0,2	0,014	0,026	0,040	0,055	0,063	0,069
0,3	0,023	0,042	0,070	0,088	0,101	0,110
0,4	0,033	0,060	0,101	0,126	0,144	0,158
0,5	0,045	0,081	0,137	0,171	0,195	0,214
0,6	0,059	0,107	0,181	0,226	0,258	0,283
0,7	0,077	0,141	0,238	0,297	0,339	0,372
0,8	0,103	0,188	0,318	0,397	0,454	0,498
0,9	0,148	0,270	0,454	0,567	0,649	0,712
0,99	0,296	0,539	0,909	1,135	1,298	1,424

Значение C_v для верхового торфа при степенях разложения R , равных 5-20, 20-30, 30-40 и более 40% соответственно равны 10, 5, 2, 1 м²/год; для низинного торфа - при R , равных 5-25, 25-40 и более 40% - соответственно 5, 2 и 1 м²/год.

Величина S_∞ может быть определена по формуле [77]

$$S_\infty = \rho H / (E_0 + 1,3\rho), \quad (7.13)$$

где ρ - давление от песчаной насыпи на поверхность торфа, МПа; E_0 - модуль деформации при полной влагоемкости, МПа.

Следует отметить, что метод предпостроечной пригрузки торфа значительно дешевле выторфовки. Такой способ упрочнения торфяных грунтов по нашему предложению имел место при строительстве причала Сургутской ГРЭС.

Усредненный геологический разрез строительной площадки в районе строительства был следующий: растительный слой - 0,0±0,2 м, верховой торф со степенью разложения 20-40% - 0,2±1,2 м, низинный торф сильноразложившийся - 1,2 ÷ 1,8 м, глина заторфованная - 1,8 ÷ 2,3 м, глина - 2,3 ÷ 2,8 м, песок - 2, 8 ÷ 10 м. По первоначальному проекту предусматривалась замена торфа песком, а затем намыв слоя песка высотой 2,5 м для предотвращения затопления паводковыми водами.

Расчет величин и скорости осадок торфяного слоя, по данным экспериментальных определений характеристик сжимаемости (см. гл. 2), показал, что уплотнение от намытого слоя песка составляет при намыве на мерзлый торф с допущением последующего оттаивания 45-47 см, при намыве на талый торф - 20 см. Время полной консолидации наступает через 280 суток. Так как основная часть территории занята складом строительных материалов и конструкций, давление от которых составляет не более 0,05 МПа, то дополнительное давление фундамента распределяется в слое намытого песка и не вызывает осадок. Это позволяет отказаться от выторфовки, пригрузив талый торф слоем намытого песка. Принятое решение дает экономический эффект и сокращает сроки строительства. Десятилетняя эксплуатация сооружений причала подтвердила надежность такого способа инженерной подготовки заторфованных участков.

Низкие среднегодовые температуры воздуха, большая продолжительность холодного периода в северной части Запад-

ной Сибири обуславливают глубокое сезонное промерзание грунтов и образование перелетков на таликах. В связи с этим при строительстве по принципу П необходимо предусмотреть меры борьбы с выпучиванием грунтов оснований. Одним из эффективных средств защиты фундаментов от выпучивания для этого района может быть предложено устройство торфяной изоляции фундаментов. Вследствие большой гигроскопичности и малой теплопроводности торф существенно сдерживает интенсивность сезонного промерзания. Кроме того, он обладает незначительными силами пучения.

Выполненные авторами исследования пучинистых свойств торфа с помощью пучиномера системы Паталева — Алаева показали, что в условиях заполнения торфом шурфа или траншеи, вырытых в минеральном грунте, выпучивание торфа полностью отсутствовало [78]. Сформировавшаяся влажность торфа не превышала 2,3%. Расчетами установлено, что для предотвращения выпучивания достаточно заполнить торфом пазухи котлованов и траншей, крутизна откосов которых обусловлена устройчивостью их стенок [79]. Для засыпки предпочтительно использовать средне- и слаборазложившийся торф с влажностью не более 2–3%, укладку производить слоями 15–20 см с тщательным по слойным уплотнением. Уплотненный торф может выдержать нагрузку 0,05 – 0,08 МПа и служить основанием отмостки и тротуара. Для заполнения 1 м пазух траншей высотой 2 м необходимо около 4 м³ торфа. Поверхность торфяной засыпки должна быть покрыта слоем щебня и заасфальтирована. Требования к гидроизоляции фундаментов и других подземных частей зданий остаются такими же, как и при засыпке пазух обычными минеральными грунтами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Западная Сибирь. М., 1964.
2. Практическое руководство по производству тепловых расчетов оснований в районах с вечномерзлыми грунтами. Красноярск, 1976 (Красноярский Промстройиниипроект).
3. Б у д ы к о Н. И. Тепловой баланс поверхности Земли. Л., Гидрометеиздат, 1956.
4. П а в л о в А. В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965.
5. Справочник по климату СССР. Л., Гидрометеиздат, 1966. Вып. 17, ч. I–V.

6. Константинов Р. А. Испарение в природе. Л., Гидрометеиздат, 1963.
7. Орлова В. А. Западная Сибирь. Климат СССР. М., 1962. Вып. 4.
8. Лукьянов В. С., Головкин М. Д. Расчет глубины промерзания. М., Трансжелдориздат, 1957.
9. Баулин В. В. и др. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М., Наука, 1967.
10. Лазуков Г. И. Четвертичные отложения северо-запада Западно-Сибирской низменности. Труды ВНИГРИ, № 158, 1960.
11. Кац Н. Я. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распределение. М., Географгиз, 1948.
12. Инструкция по инженерно-геологическим исследованиям и проектированию оснований и фундаментов в условиях Среднего Приобья. ВН 19-76. Тюмень, 1976.
13. Пичугин А. В. Торфяные месторождения. М., Высшая школа, 1967.
14. Сергеев А. И. Методика инженерно-геологического изучения торфяных массивов. М., Наука, 1974.
15. Амарьян Л. С. Структурно-механические свойства торфяных залежей. Дисс. на соиск. уч. степ. д.-ра техн. наук. Калинин, 1967.
16. СНиП Ц-15-74. Основания зданий и сооружений. М., Стройиздат, 1975.
17. Ушкалов В. П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений. М., Изд-во АН СССР, 1962.
18. Кулаков Н. Н. Введение в физику торфа. М., Госэнергоиздат, 1947.
19. Мазуров Г. П. Физико-механические свойства мерзлых грунтов. Л., Стройиздат, 1975.
20. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., Недра, 1975.
21. Основы геокриологии (мерзлотоведение). М., Изд-во АН СССР, 1959. Ч. I и II.
22. Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. Изд-во МГУ, 1967.
23. Коновалов А. А., Наумова Л. А. О возможности определения количества незамерзшей воды по зависимости температуры фазовых переходов промерзающего грунта от влажности. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1977, вып. 38.

24. Д е р о в А. Ф. Теплозащита торфяных грунтов от промерзания. — Основания, фундаменты и механика грунтов, 1968, № 6.

25. П а в л о в а К. К. Тепловые свойства деятельного слоя болот. Труды ГГИ. Гидрометеоиздат, 1969. Вып. 177.

26. Ц ы т о в и ч Н. А. и др. О физических явлениях и процессах в промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтах. Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Вып. 2. М., Изд-во АН СССР, 1957.

27. Н е р с е с о в а З. А. Фазовый состав воды в грунтах при замерзании и оттаивании. Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1953. Вып. 1.

28. А н д р и а н о в П. И. Температуры замерзания грунтов. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1936.

29. К а р п у н и н а А. А. К вопросу о прочностных свойствах засоленных мерзлых грунтов Якутска. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1972. Вып. 23.

30. И в а н о в Н. С., Г а в р и л ь е в Р. И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. М., Наука, 1965.

31. П о р х а е в Г. В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М., Наука, 1970.

32. М и р о л ю б о в Н. Н. и др. Методы расчета электростатических полей. М., Высшая школа, 1963.

33. К о н ю ш е н к о А. Г., К о н о в а л о в А. А. К расчету стационарных температурных полей в основаниях заглубленных сооружений. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1973. Вып. 26.

34. L a c h e n b r u c h A. H. Thermal effects of the ocean on permafrost. Bull. of the Geol. Society of America. V. 68, Nov., 1957.

35. L a c h e n b r u c h A. H. Three-dimensional heat conduction in permafrost beneath heated Buildings. Geological Survey Bull. № 1052-b, Washington, 1957.

36. Л ы к о в А. В. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967.

37. Д о к у ч а е в В. В. Расчет фундаментов на вечномерзлых грунтах по предельным состояниям. Л., Стройиздат, 1968.

38. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Л., Стройиздат, 1977.

39. Алабышева Н. В. и др. Расчетные показатели теплопроводности льдистых грунтов. Материалы У1 совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Красноярск, 1970. Т. У. Вып. 5.

40. Велли Ю. Я. Устойчивость зданий и сооружений в Арктике. Л., Стройиздат, 1973.

41. Бойко И. В. и др. Термический режим проветриваемых подполий в условиях Воркутинского района. Материалы У1 совещания-семинара по строительству в суровых климатических условиях. Красноярск, 1970. Т. У. Вып. 3.

42. Иванов В. Н. Вентилируемые подполья отапливаемых зданий на вечномерзлых грунтах. Л., Стройиздат, 1972.

43. Вялов С. С. Длительное разрушение мерзлого грунта как термоактивированный процесс. Материалы II Международной конференции по мерзлотоведению. Якутск, 1973. Вып. 4.

44. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974.

45. Пекарская А. К. К вопросу о временном сопротивлении мерзлых грунтов одноосному сжатию и растяжению. Материалы УШ Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии. Якутск, 1966. Вып. 5.

46. Шущерина Е. П. Сопротивление мерзлых дисперсных пород и льда разрыву в области низких температур (по -60°C). Мерзлотные исследования. Изд-во МГУ, 1974. Вып. 14.

47. Березанцев В. Г. Сопротивление грунтов местной нагрузке при постоянной отрицательной температуре. - В кн.: Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1953. Вып. 1

48. Вялов С. С., Гмошинский В. Г., Городецкий С. Э. и др. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты льдогрунтовых ограждений. М., Изд-во АН СССР, 1962.

49. Коновалов А. А. К учету изменения температуры вечномерзлого грунта во времени при определении его длительной прочности. - В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1974, вып. 29.

50. Коновалов А. А., Роман Л. Т. Определение параметров в уравнении длительной прочности вечномерзлых грунтов. Тезисы докладов научно-технического совещания

по основаниям и фундаментам. Воркута, М., 1975.

51. Вялов С. С. Геологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1959.

52. Велли Ю. Я., Карпов В. И., Иванов В. Н. Результаты полевых и лабораторных исследований сил смерзания мерзлых грунтов. Труды 1У совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Красноярск, 1966.

53. Кардымон А. П. О влиянии геометрически простой формы поперечного сечения вмороженных моделей свай на удельное сопротивление сдвигу по боковой поверхности. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1966, № 10.

54. Вялов С. С. Геологические основы механики грунтов. М., Высшая школа, 1978.

55. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М., Высшая школа, 1973.

56. Вотяков И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. СО АН СССР, Новосибирск, 1975.

57. Цытович Н. А. Механика грунтов. М., Стройиздат, 1963.

58. Дубейковский С. Г., Николаев А. М., Чайкин А. А. Определение деформаций оттаивающих оснований. Тезисы докладов научного семинара "Методика инженерно-геологических исследований и картирование области вечной мерзлоты". Якутск, 1977. Вып. 3.

59. Водозазкин В. М. Результаты полевых экспериментов по исследованию сжимаемости крупносkeletalных грунтов при оттаивании горячим штампом. — В кн.: Строительство на вечномерзлых грунтах. Красноярск, 1968. Т. VI, вып. 5.

60. Золотарь А. И. Исследование работы основания конечных размеров, нагруженного круглым гибким штампом. — В кн.: Фундаменты на сильнольдистых и засоленных вечномерзлых грунтах. Л., 1977.

61. Бакулин Ф. Г., Жуков В. Ф. Деформации мерзлых дисперсных пород при их оттаивании. Изд-во АН СССР, ОТН № 7, 1955.

62. К и с е л е в М. Ф. Способ определения относительного сжатия мерзлых грунтов при оттаивании их под нагрузками по простейшим физическим характеристикам. - В кн.: Деформации оснований при замерзании и оттаивании грунтов. М., Госстройиздат, 1952. Вып. 19.

63. СНиП Ц-15-74. Основания и фундаменты. Нормы проектирования. М., Стройиздат, 1974.

64. Мосенкис Ю. М. Исследование деформаций зданий на вечномерзлых грунтах в условиях Забайкальской железной дороги и разработка мероприятий по обеспечению их устойчивости. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд.техн. наук. Владивосток, 1971.

65. Рекомендации по проектированию оснований и фундаментов нефтепромысловых сооружений на заторфованных территориях Среднего Приобья. Тюмень, 1972.

66. Инструкция по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на заторфованных территориях. СН 475-75. М., Стройиздат, 1976.

67. Трупаков Н. Г. Замораживание грунтов в строительстве. М., Стройиздат, 1970.

68. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. Л.-М., Госэнергоиздат, 1959.

69. Биянов Г. Ф., Макаров В. И., Молочников А. Д. Жидкостные охлаждающие устройства для замораживания талых и охлаждения пластично-мерзлых грунтов при строительстве в районах с суровым климатом. Материалы II Международной конференции по мерзлотоведению. Якутск, 1973. Вып. 7.

70. Гапеев С. И. Укрепление мерзлых оснований охлаждением. Л., Стройиздат, 1969.

71. Максимов Г. Н. Несущая способность вмороженных свай, погруженных с виброуплотнением окружающего грунта. Труды совещания-семинара по обмену опытом строительства на вечномерзлых грунтах. Красноярск, 1962.

72. Агарышева Г. И. Оптимальные размеры свай в мерзлых грунтах. - В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1975. Вып. 35.

73. Шущерина Е. П. и др. О методике определения

сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания с материалами. Вып. 3. Тезисы докладов научного семинара. Методика инженерно-геологических исследований и нормирования области вечной мерзлоты. Якутск, 1977.

74. Герасимов А. С. Определение сопротивления сдвигу мерзлых грунтов по боковым поверхностям свай с учетом их шероховатости. Тезисы докладов научного семинара. Методика инженерно-геологических исследований и картирования области вечной мерзлоты. Якутск, 1977. Вып. 3.

75. Ким М. В., Теплов В. Н. Фундамент со сваями с термоуширенной пятой на вечномерзлых грунтах. — На стройках России, 1970, № 11.

76. Рекомендации по расчету свайных фундаментов на вертикальную и горизонтальную нагрузки. М., 1971.

77. Указания по проектированию оснований жилых и общественных зданий, возводимых в Архангельске. ВСН 5-71. М., Госгражданстрой, 1971.

78. Роман Л. Т., Пахомова Г. М. Исследование противопучинных свойств торфяной изоляции. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1974. Вып. 29.

79. Коновалов А. А., Роман Л. Т. Противопучинная торфяная изоляция фундаментов зданий. — В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1972. Вып. 23.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	1
Г л а в а 1. Природные условия севера Западной Сибири	5
§ 1.1. Общая климатическая характеристика, количественная оценка элементов теплового баланса	5
§ 1.2. Геологическое строение, рельеф, покровные образования	14
§ 1.3. Геокриологические условия	19
§ 1.4. Закономерности изменения температурного режима в слое с сезонными колебаниями температуры и методика расчета его параметров	22
Г л а в а 2. Физические свойства заторфованных и засоленных грунтов	33
§ 2.1. Основные показатели физических свойств	33
§ 2.2. Незамерзшая вода в мерзлых грунтах	42
§ 2.3. Теплофизические характеристики	48
Г л а в а 3. Температурный режим грунта в основаниях зданий и сооружений	52
§ 3.1. Систематизация тепловых задач	52
§ 3.2. Стационарные температурные поля (СТП) ...	56
§ 3.3. Нестационарные температурные поля (НТП)	61
§ 3.4. Температурные поля при наличии фазовых переходов грунтовой влаги	69
Г л а в а 4. Принципы использования грунтов как оснований	85
§ 4.1. О выборе принципа использования грунтов как оснований	85
§ 4.2. Определение толщины деятельного слоя	87
§ 4.3. Способы сохранения проектного температурного режима оснований	98

Г л а в а 5. Прочностные свойства грунтов оснований ..	103
§ 5.1. Параметры в уравнении длительной прочности мерзлых грунтов	103
§ 5.2. Сопротивление сдвигу мерзлых грунтов по боковой поверхности фундаментов	111
§ 5.3. Сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению	113
Г л а в а 6. Деформативные свойства грунтов оснований	119
§ 6.1. Температурная граница пластично-мерзлого и твердомерзлого состояния грунтов	119
§ 6.2. Расчет осадок оснований, сложенных талыми и пластично-мерзлыми грунтами по естественной пористости грунтов	121
§ 6.3. Зависимость характеристик сжимаемости оттаивающих грунтов от физических свойств	133
§ 6.4. Оценка критической толщины слоя торфяных грунтов в основаниях зданий и сооружений	135
Г л а в а 7. Повышение несущей способности грунтов оснований	140
§ 7.1. Повышение несущей способности грунтовых оснований при использовании их по принципу I	140
§ 7.2. Рациональные типы фундаментов и оснований при строительстве по принципу I	153
§ 7.3. Повышение несущей способности грунтовых оснований при использовании их по принципу II	155
Список литературы	159

Александр Александрович Коновалов
Лиция Тарасовна Роман

Особенности проектирования фундаментов в
нефтепромысловых районах Западной Сибири

Редактор Л.В. Партизенкова
Обложка художника А.С. Орлова
Технический редактор Н. Н. Аксенова.
Корректор Н. А. Беляева
ИБ № 1237

Подписано в печать 11. 11. 80 М-33492
Формат 60x90/16 Набор машинописный Печать офсетная
Бумага офсетная 80г/м² Печ. л. 10, 5 Уч. - изд. л. 8, 7
Тираж 1760 экз. Изд. № 1987Л Заказ № 998 Цена 45 коп.

Стройиздат, Ленинградское отделение
191011, Ленинград, пл. Островского, 6

Тулская типография Союзполиграфпрома при государственном Комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
г. Тула, пр. Ленина, 109.