

Для сплошных совмещенных покрытий необходимо дополнительно знать показатели затухания и запаздывания температурных колебаний в слое рубероида, которые можно принять примерно равными 1,05 и 5° соответственно.

Резюме. Использование предлагаемых графиков к теплотехническому расчету сплошных совмещенных покрытий и чердачных перекрытий жилых зданий позволяет свести расчет к механическому выбору вида и толщины утеплителя с тем, чтобы температурные колебания на поверхности потолка не превышали нормативных величин.

Л и т е р а т у р а

1. Строительные нормы и правила, гл. II-A, 7-71, М., 1972.
2. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. М.-Л., 1961 . 3. Кривобок Э.Н. Затухание и запаздывание температурных колебаний в замкнутых воздушных прослойках. - В сб.: Отопление, вентиляция и строительная теплофизика. Минск, 1973, вып.3.

УДК 625.731.1.042

Р.З. Порицкий (канд.техн.наук)

ВЛИЯНИЕ ОТТЕПЕЛИ НА ПРОЧНОСТЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Повышение транспортно-эксплуатационных качеств дорог в значительной мере зависит от прочности и устойчивости земляного полотна, подверженного действиям нагрузок и непрерывно изменяющихся погодных условий. Наиболее существенно влияют на устойчивость грунтов условия промерзания-оттаивания.

Отличительная особенность погодных условий на территории Белоруссии - это ежегодные зимние оттепели. Обработка данных наблюдений по станциям гидрометеослужбы БССР, имеющим наиболее длинные ряды наблюдений, показала, что количество дней с оттепелями в среднем колеблется от 65 до 100 за зиму (рис.1). Периоды оттепелей обычно связаны с общим повышением температуры, и воздух может прогреваться до 5 - 10°С.

Статистической обработкой данных наблюдений установлено, что в районах, где число дней с оттепелями равно 65-75, повторяемость дней с температурой воздуха выше 1°С составля-

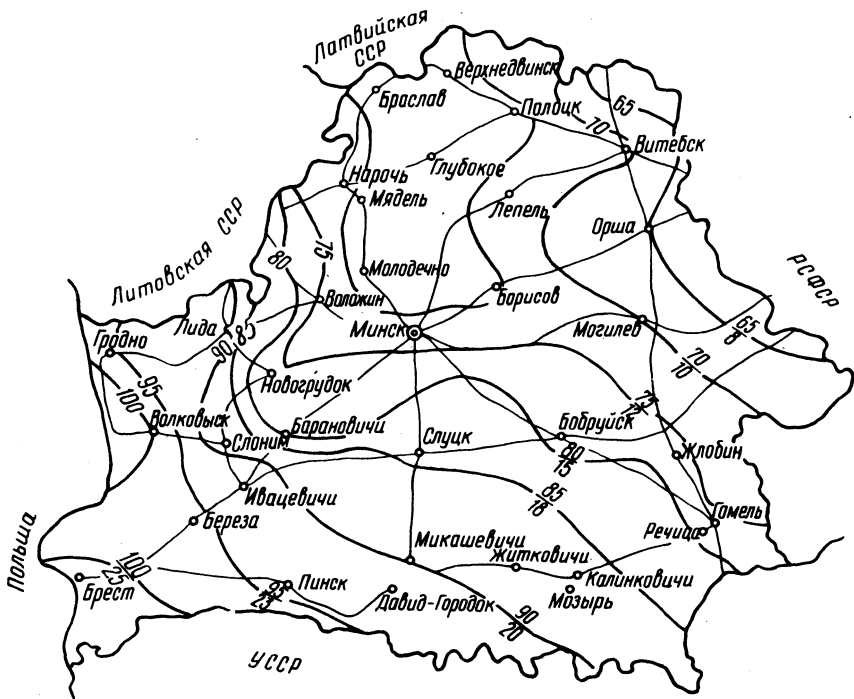


Рис.1. Схематическая карта распространения оттепелей на территории БССР: $\frac{100}{25}$ - в числителе общее количество дней с оттепелями за зимний период; в знаменателе - то же с температурой выше 1°C .

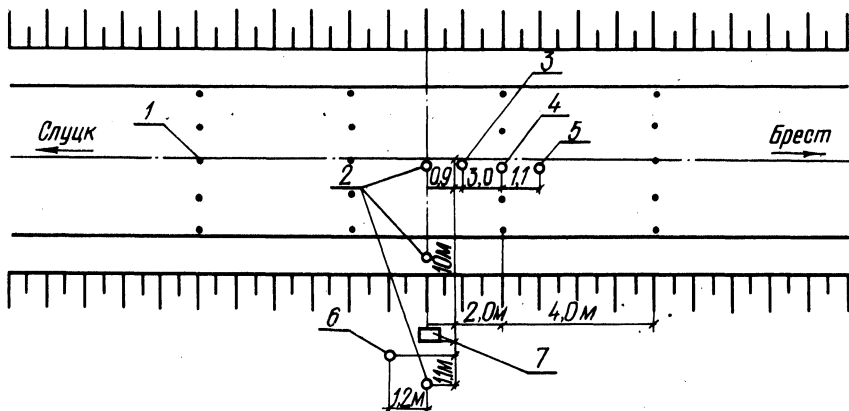


Рис.2. План размещения приборов на наблюдательном посту: 1 - нивелировочные марки; 2 - места закладки датчиков температуры и влажности; 3 - винилплатовая труба для измерения влажности и плотности радиоизотопными приборами; 4 - мерзлотомер; 5 - пьезометр для измерения уровня воды в дорожной одежде; 6 - репер; 7 - пункт наблюдения.

ет 73%; в районах, где оттепелей 80 – 100 дней в году, эта позоряемость составляет 79,5%.

Промерзание грунтов начинается после устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C . Наиболее интенсивно грунты промерзают при температуре ниже 5°C . На замедление промерзания и повышение температуры грунтов влияют оттепели с температурой выше 1°C . Количество дней с такой температурой составляет в среднем 30% от общего числа дней с оттепелями для северо-востока республики и 35% для юго-запада. Таким образом, количество дней с оттепелями, которые следует учитывать при расчетах промерзания грунтов и зимнего влагонакопления в них, колеблется для Белоруссии от 19 до 35, или около 40%, за период с устойчивой отрицательной температурой воздуха.

Влияние оттепелей на величину зимнего влагонакопителя грунтовых оснований и потерю ими несущей способности весной не нашло отражения в существующих расчетных схемах и нормативных документах, что привело к ежегодным значительным разрушениям, наблюдающимся на дорогах республики.

Влияние природно-климатических условий на прочность и устойчивость автомобильных дорог Белоруссии изучали на специально организованных наблюдательных постах по исследованию работы дорожных конструкций. Здесь исследовали тепловой режим дорожных конструкций, используя при этом датчики температуры, изготовленные в БелдорНИИ и укомплектованные мостом постоянного тока Р-333 с переключателями типа ПМТ-12, а также мерзлотомерами АМ-21.

Влажностный режим грунтов земляного полотна изучали при помощи электрических влагомеров АМ-11, укомплектованных мегомметром типа М-1101, радиометрическим прибором НИВ-1 и термостатно-весовым методом.

Исследовали также причины деформаций дорожных конструкций и оснований. При этом наблюдали за пучением и осадкой грунтов нивелированием специальных марок, закрепленных в покрытии, относительно глубинного мерзлотного репера; за плотностью грунтов – с помощью радиометрического прибора типа ГП-1 и методом режущего кольца; за ровностью покрытия – измерением просветов под трехметровой рейкой; возникновением и развитием трещин на покрытии.

Вели наблюдения за динамикой грунтовых вод в гидрологических колодцах и поверхностными водами путем нивелирования зеркала воды по отношению к поверхности покрытия.

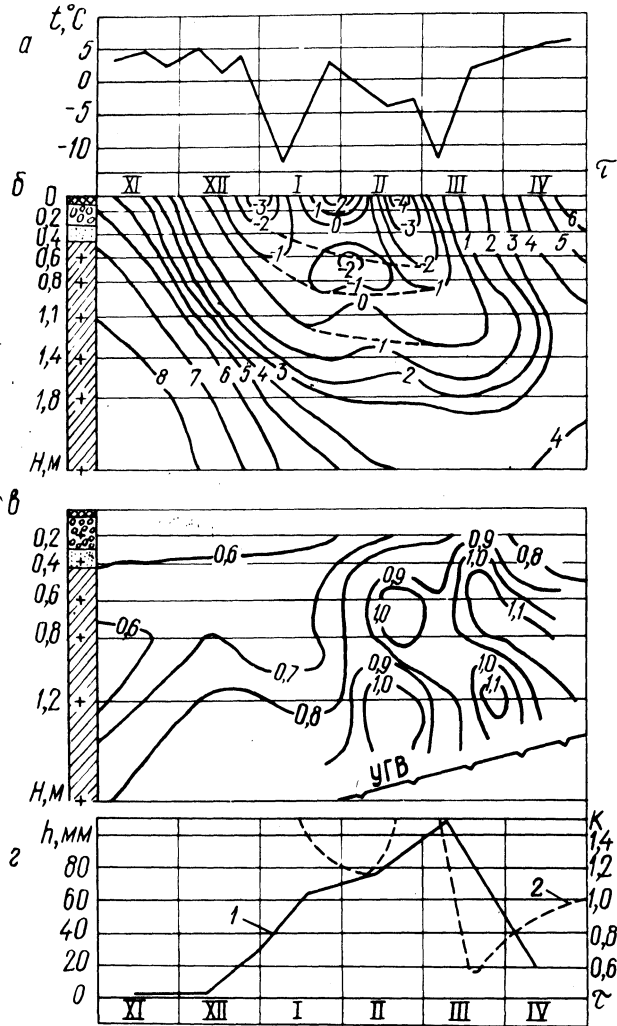


Рис. 3. Изменение расчетных показателей грунтов при промерзании - оттаивании: а - изменение средней декадной температуры воздуха; б - изменение температуры по глубине и времени; в - то же влажности; г - величина пучения грунтов и прочности: 1 - пучение; 2 - коэффициент запаса прочности; + - места установки датчиков температуры и влажности.

Прочность грунтов и дорожных одежд определяли при помощи дорожного пресса ХАДИ с послойным вскрытием одежды, а также колесом автомобиля МАЗ-500, используя рычажный прогибомер.

Состав, интенсивность движения и метеорологические условия выбирали по данным наблюдений ближайших к постам учетных пунктов движения и метеорологических станций. Наблюдения вели по специально разработанным методикам, которые предусматривают ежемесячные измерения на постах в летний и зимний периоды и один раз в 10 дней весной.

Наблюдательные посты оборудованы типовыми приборами по единой схеме, приведенной на рис.2.

Следует отметить, что наиболее характерной за последние 10 лет является зима 1970 - 1971 гг.

На рис.3 представлены фактические данные наблюдений за температурой воздуха и дорожной конструкцией, влажностью и пучением грунтов, изменением деформационных характеристик на посту № 8 за зимне-весенний период 1970 - 1971 гг.

Анализ данных наблюдений (рис.3) показывает, что распространение температуры в слоях дорожной конструкции повторяет изменения температуры воздуха, но в сглаженной форме и с некоторым запаздыванием во времени [1].

Резкое понижение температуры в декабре вызвало промерзание грунтов до глубины 1,15 см. Минимальная температура грунтов в этот период достигала -3°C . Продолжительные январские оттепели вызывали повышение температуры грунтов и оттаивание верхних слоев дорожной конструкции. Наиболее холодными (-2°C) в этот период оказались участки, находящиеся в середине промерзшего слоя. Снизу и сверху наблюдалось повышение температуры и оттаивание грунта.

Таким образом, отличительной особенностью теплового режима дорожной конструкции при наличии оттепелей зимой является прекращение в этот период промерзания и повышение температуры грунтов, оттаивание сверху и снизу и образование наиболее холодной зоны внутри промерзшего слоя.

В районах, где не наблюдается действие оттепелей, ход промерзания грунтов характеризуется плавным очертанием термоизоплет (см.рис.3, пунктирные линии), которые обуславливают постепенное понижение температуры [2] и вызывают определенный единичный поток влаги в зону промерзания.

Этот процесс хорошо виден в первый период промерзания грунтов (см.рис.3, график изменения влажности), при котором было зафиксировано увеличение влажности с 0,6 до 0,8 W_T

(W_T - влажность грунта на границе текучести). В этот период на границе раздела фаз (талый - мерзлый грунт) нарушается равновесие влажностей, установившихся в осенний период. Свободная вода и ее часть, связанная с грунтовыми частицами, замерзают. Возникает градиент влажности по жидкой фазе, обуславливающий движение влаги из талой зоны в зону промерзания для восстановления нарушенного равновесия.

В районах, где отсутствуют оттепели, процесс миграции влаги в зону промерзания на этой стадии практически прекращается.

В условиях БССР в период оттепелей возникает дополнительный поток влаги в средние слои промерзшего грунта за счет влаги грунтов, перешедшей из мерзлого состояния в талое [3] из верхних и нижних слоев грунта с более высокой температурой. Величины миграции в этот период значительны, так как восполнение мигрирующей влаги происходит как за счет оттаявшего снега на проезжей части дороги, так и грунтовых вод, которые в этот период начинают интенсивно подниматься к поверхности земли (см.рис.3, кривая уровня грунтовых вод УГВ). В результате оттепели в январе 1971 (см.рис.3) на посту № 8 влажность грунтов достигла $0,9 - 1,0W_T$.

При последующем промерзании вновь начинается T миграция влаги в зону повторного промерзания. За счет этого потока холода влажность грунтов на участке увеличилась до $1,0 - 1,1W_T$ (см.рис.3).

Можно считать, что за счет продолжительных зимних оттепелей влажность грунтов земляного полотна увеличивается на $0,2 - 0,3W_T$. Это значительное повышение влажности грунтов не учитывается при расчетах дорожных конструкций.

В соответствии с изложенной картиной изменения влажности грунтов в процессе промерзания происходит их пучение, обусловленное увеличением объема воды при переходе ее из талого в мерзлое состояние.

На рис.3 приведен график, характеризующий процесс пучения грунтов в зимний период.

При первом промерзании происходит интенсивное пучение, достигающее 65 мм. В период оттепелей скорость пучения замедляется, так как увеличение объема компенсируется оттаявшими верхними слоями грунта. При повторном промерзании скорость и величина пучения вновь возрастают. Общая величина пучения на участке достигает 110 мм. На покрытии были зафиксированы трещины, бугристость.

При промерзшем состоянии грунта прочность дорожной конструкции намного превышала требуемую (см. рис. 3, где требуемая прочность соответствует коэффициенту запаса прочности, равному 1,0). С оттаиванием грунта прочность конструкции резко падает и при глубине оттаивания 0,7 - 0,8 м достигает минимума 0,55 К. В это время участок дороги начал интенсивно разрушаться и только принятие срочных мер позволило предотвратить его полное разрушение. В дальнейшем по мере оттаивания прочность поднималась и достигла требуемой к 10 апреля.

С целью учета действия изложенных выше процессов при проектировании дорог сделана попытка их аналитического описания.

Математическая формулировка задачи переноса тепла и влаги для промерзающих грунтов с учетом наличия зимних оттепелей принята в следующем виде (рис. 4):

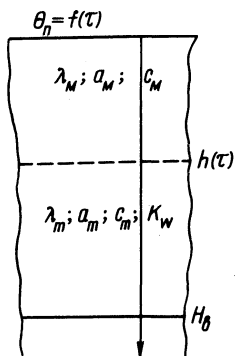


Рис. 4. Расчетная схема определения поля температур и влажности грунтовых оснований.

$$\frac{\partial \theta_M}{\partial \tau} = a_M \frac{\partial^2 \theta_M}{\partial x^2}; \quad 0 \leq x < h(\tau); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 \theta_T}{\partial x^2}; \quad h(\tau) \leq x < H_B; \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_W \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_W \delta_g \frac{\partial \theta}{\partial x} \right); \quad 0 \leq x < H_B. \quad (3)$$

Начальные и граничные условия

$$\theta(0, \tau) = \theta_0 + \theta_{\min} \sin \omega \tau; \quad (4) \quad \theta_M(h, \tau) = \theta_T(h, \tau) = \theta_{кр}; \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (6) \quad W_T(x, 0) = W_0; \quad (7) \quad W_T(h, \tau) = W_h; \quad (8)$$

$$W_{x=H_B} = W_{пв}; \quad (9) \quad \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (10) \quad K_W = a + b x^n; \quad (11)$$

$$\lambda_M \left. \frac{\partial \theta_M}{\partial x} \right|_{h_\tau} - \lambda_T \left. \frac{\partial \theta_T}{\partial x} \right|_{h_x} = \gamma P(W_{h+\Delta W}) \frac{dh}{d\tau}; \quad (12)$$

$$\Delta W = \frac{K_W \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=h}}{\frac{dh}{d\tau}}, \quad (13)$$

где θ_M и θ_T - температура мерзлого и талого грунта, $^{\circ}\text{C}$; W - влажность, кг/кг; $\theta_{п}$ - температура поверхности грунта; θ_0 и W_0 - начальные условия; θ_h и W_h - температура и влажность на границе льдовыделения ($x=h$); $W_{пв}$ - влажность полной влагоемкости грунта, кг/кг; ΔW - изменение влажности вследствие миграции влаги в зону отрицательных температур; W_h - влажность грунта по жидкой фазе при отрицательной температуре; P - теплота кристаллизации льда (80 ккал/кг); γ - объемный вес скелета грунта, кг/м³; a_M и a_T - коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта, м²/ч; λ_M и λ_T - коэффициенты теплопроводности, ккал/ч·м· $^{\circ}\text{C}$; τ - время промерзания, ч.

Уравнения (1), (2) при граничных условиях (4) - (6) соответствуют традиционной формулировке задачи Стефана с той лишь разницей, что температура на поверхности грунта задана функцией (4). При $\theta(0, \tau) = \theta_{п} = \text{const}$ решение уравнений (1), (2) имеют вид

$$\theta_M(x, \tau) = \theta_{п} + (\theta_h - \theta_{п}) \frac{\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_M \tau}}}{\text{erf} \frac{\mathcal{L}}{2\sqrt{a_M}}}; \quad (14)$$

$$\theta_T(x, \tau) = \theta_0 - \frac{(\theta_0 - \theta_{п}) \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T \tau}}}{\text{erfc} \frac{\mathcal{L}}{\sqrt{a_T}}}, \quad (15)$$

где \mathcal{L} - характеристика скорости промерзания, равная $\mathcal{L} = \frac{h}{\sqrt{\tau}}$. Величина \mathcal{L} определяется из условия (12).

Определение температурного поля земляного полотна производили по зависимости (14), (15), при этом значения θ подставляли из зависимости (4) для конкретных условий района

строительства и года наблюдений, причем за θ_{00} принимали температуру начала устойчивого перехода через 0°C , а θ_{\min} - минимальную температуру за зимний период.

Уравнение (3) описывает перенос влаги под действием градиентов влажности и температуры. Перенос влаги за счет влагопроводности обусловлен миграцией влаги из талой зоны в зону промерзания, где свободная и часть рыхлосвязанной воды замерзают при температуре θ_h . Оставшаяся W_h по жидкой фазе меньше W_0 ; возникающие градиенты являются причиной миграции, причем интенсивность последней зависит от K_W , обусловленного изменением влажности и температуры грунта по зависимости (11).

Перенос влаги за счет температурных градиентов учитывали для каждого вида грунта, его влажности, глубины промерзания и диапазона температур, при которых происходит влагоперенос по условию

$$\frac{\bar{K}_W \bar{W}}{H_B^2} \sim \bar{K}_W \delta_g \frac{\Delta \theta}{H_B^2}, \quad (16)$$

где \bar{K}_W - среднее значение коэффициента влагопроводности; \bar{W} - то же влажности; δ_g - коэффициент термодиффузии; $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ - диапазон температур, при котором происходит влагоперенос; H_B - глубина залегания грунтовых вод.

После преобразований получаем

$$\frac{\bar{W}}{\delta_g \Delta \theta} \sim A. \quad (17)$$

При условии, когда $A \sim 1$, миграцию влаги за счет температурных градиентов учитывали, при $A \gg 1$ - не учитывали.

Так как $\Delta \theta$ весьма мало (см.рис.3), в большинстве случаев оказывалось, что $A \gg 1$; тогда уравнение (3) имеет решение, сходное с уравнением (2), а именно

$$W_T = W_0 - \frac{W_0 - W_h}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{K_W \tau}}\right)} \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{K_W \tau}}\right). \quad (18)$$

Для нахождения величины изменения влажности на границе льдовыделения использованы уравнения (13), (18) и характеристика скорости промерзания $h = \alpha \sqrt{\tau}$. Решение имеет следующий вид [2]:

Таблица 1. Сравнение фактических величин влажности и температуры с теоретическими

Дата и глубина измерения, м	Распределение температуры		Распределение влажности	
	по уравнениям (14) и (15)	фактическая температура дорожной конструкции, °С	по уравнениям (18) и (19)	фактическая влажность земляного полотна
1 марта				
0,6	-2,8	-2,3	0,9	0,9
0,8	-2,0	-1,5	0,95	1,0
1,1	-0,9	-0,5	0,98	0,9
1,4	0,2	0,3	1,0	0,95
1,8	1,9	2,5	1,05	1,0

$$\Delta W = \frac{2\sqrt{K_W}}{\sqrt{\pi \alpha}} (W_0 - W_h) \frac{\exp\left(-\frac{\alpha^2}{4K_W}\right)}{\operatorname{erfc} \frac{\alpha}{2\sqrt{K_W}}} \quad (19)$$

Теплофизические характеристики грунтов вычислялись по методике [4] на основании фактических данных наблюдений за температурой дорожных конструкций.

Как видно из приведенного описания задачи переноса тепла и влаги при условии наличия оттепелей, получение численных значений представляет значительные трудности, поэтому задача была запрограммирована и решена на ЭВМ "Минск-32". В табл. 1 приведены значения температуры и влажности грунтов, полученные по предложенным зависимостям, и сравнение их с натурными данными.

Удовлетворительная сходимость результатов позволяет использовать эту методику для прогноза прочности дорожных конструкций в условиях Белоруссии.

Резюме. Предлагаемая методика прогноза прочности дорожных конструкций в условиях БССР в осенне-зимний период дает удовлетворительную сходимость с натурными данными, что позволяет использовать ее для практических расчетов.

Л и т е р а т у р а

1. Порицкий Р.З. Расчетная влажность грунта земляного полотна автомобильных дорог. - "Труды СоюздорНИИ", вып.15. М., 1966.
2. Золотарь И.А. Прогноз влажности грунта земляного полотна. - В сб.: Химическое укрепление переувлажненных грунтов. Л., 1964.
3. Нерсесова З.А. Фазовый состав во-

ды в грунтах при замерзании и оттаивании. - "Мат-лы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов", № 1, М., 1953. 4. Федорович Д.И. Определение теплофизических характеристик промерзающих и протаивающих грунтов по анализу естественного температурного поля. - В кн.: Методы определения тепловых свойств горных пород. М., 1970.

УДК 697.317.44

А.Ф. Строй (канд. техн. наук)

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЧВЕННОГО ОБОГРЕВА ТЕПЛИЦ

При проектировании почвенного обогрева необходимо определить: глубину заложения труб h , шаг между трубами a , диаметр d закладываемых в почву труб t_T , а также температуру теплоносителя t_T , подаваемого в систему почвенного обогрева. Основное требование к почвенному обогреву - равномерно поддерживать необходимую температуру в корнеобитаемом слое $\delta = 0 - 0,3$ м (рис.1).

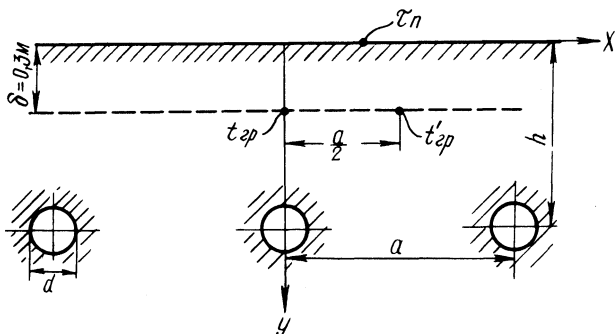


Рис. 1. Основные параметры почвенного обогрева.

Температурное поле в полуограниченном массиве с внутренними цилиндрическими источниками тепла описывается уравнением [1]:

$$\theta = \frac{t_{xy} - \tau_n}{t_T - \tau_n} = \frac{\ln \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a}(y_0 + y) - \cos \frac{2\pi}{a}x}{\operatorname{ch} \frac{2\pi}{a}(y_0 - y) - \cos \frac{2\pi}{a}x}}{2 \ln \left(\frac{2a}{\pi d} \operatorname{sh} \frac{2\pi h}{a} \right)}$$