

УДК 693.547:624.131

ОТОГРЕВ МЕРЗЛОГО ГРУНТА В ТЕХНОЛОГИИ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Голубева Д.Н.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), г. Новосибирск*

В рекомендациях [1] сказано, что промерзшее грунтовое или искусственное основание при зимнем бетонировании монолитных конструкций фундаментов, как правило, необходимо отопить на всю глубину промерзания до температуры 5–10°C. При большой толщине мерзлого грунтового основания необходимо оттаять его не менее чем на $\frac{3}{4}$ глубины промерзания и не менее чем на 500мм для связных и 300мм для несвязных грунтов. Размеры участков отогретого основания должны выступать за внешний обрез бетонируемых конструкций по всему периметру на двойную глубину оттаивания, но не менее чем на 1 м.

СНиП 3.03.01-87* п 2.56. [2] исключает возможность замерзания смеси в зоне контакта с основанием. Состояние основания, на которое укладывается бетонная смесь, а также температура основания и способ укладки должны исключать возможность замерзания смеси в зоне контакта с основанием.

Таким образом, в процессе практической реализации технологии зимнего бетонирования монолитных конструкций фундаментов зданий, для энергосбережения, оптимального использования тепла внесенного в грунтовой массив при его отоплении, а также выполнения требований и рекомендаций [1,2,3] необходим достоверный метод расчета прогноза температурного поля грунтового массива при его прогреве до оптимальной температуры обеспечивающей выполнения ряда технологических операций и набора бетона подошвы фундамента критической прочности.

Распространение тепла в грунтовой массиве осуществляется по закону Фурье $q = -\lambda \frac{dT}{dz}$ – количество тепла, переносимого через единицу площади в единицу времени q , прямо пропорционально теплопроводности грунта λ и градиенту температуры. Закон Фурье связывает поток с градиентом температуры через коэффициент пропорциональности - теплопроводность, λ [Вт²/(м·град.)].

Основное уравнение теплопроводности – уравнение, связывающее изменения температуры во времени с изменением температуры по расстоянию. Для динамики температуры это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Постановка задачи отопления и прогрева замороженного грунтового основания с плоским поверхностным нагревателем может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} 1. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= a_T \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \\ 2. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= a_M \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \\ 3. t(x, 0) &= f_1(x); \\ 4. \lambda \cdot \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} &= \alpha \cdot [t(0, \tau) - f_2(\tau)]; \\ 5. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} &= 0; \\ 6. t(x, \tau)|_{x=z-0} &= t(x, \tau)|_{x=z+0} = t_z; \\ 7. \lambda_M \cdot \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial x} - \lambda_T \cdot \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial x} &= W \cdot \frac{dz}{d\tau}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: 2.1 – дифференциальное уравнение теплопроводности в таловой зоне грунтового массива;

2.2 – дифференциальное уравнение теплопроводности в мерзлой зоне грунтового массива.

Величина $a_{M,T} = \frac{\lambda_{M,T}}{C_{M,T}}$, [м²/с] носит название «коэффициента температуропроводности» материала, характеризует способность среды выравнивать свою температуру.

2.3 – начальное условие;

2.4 – граничное условие III рода на поверхности грунтового основания;

2.5 – граничное условие I рода, задается закон распределения температуры на границе тела;

2.6 – условия на фазовой границе;

2.7 – классическое граничное условие Стефана на границе раздела фаз при замерзании (оттаивании) влаги, здесь $W = \varepsilon \rho_{\text{л}} \omega$, это скрытая теплота фазовых переходов по рассматриваемой оси, ε – удельная теплота плавления льда (334 кДж/кг).

Решение поставленной выше задачи можно осуществить при помощи комбинированного сеточного метода [4].

Суть комбинированного сеточного метода заключается в следующем. В узлах расчетной области, не смежных с фронтом фазового перехода, температура определяется из явной разностной схемы по формуле:

$$t_i^{j+1} = F_0 \cdot (t_{i+1}^j + t_{i-1}^j) + t_i^j \cdot (1 - 2 \cdot F_0), \quad (3)$$

где для обеспечения устойчивости конечно-разностной аппроксимации (2.1) и (2.2) вводятся ограничения по шагам численного интегрирования, соответственно сеточный критерий Фурье $F_0 = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} \leq 0,5$.

А для точек смежных узлов – из неявной:

$$t_k^{j+1} = \frac{t_k^j + F_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta_1}{1 + \Delta_1} \cdot t_m^{j+1} + \frac{2 \cdot \Delta_1^2}{1 + \Delta_1} \cdot t_z \right)}{1 + 2 \cdot F_0 \cdot \Delta_1} \quad (4)$$

для точки x_i : $k = i$, $F_0 = F_{0T}$, $m = i - 1$,

$$\Delta_1 = \frac{\Delta x}{z^{j+1} - x_i},$$

$$\Delta_1 = \frac{\Delta x}{x_{j+1} - z^{j+1}},$$

The technical drawing illustrates the calculation of frost penetration depth into the foundation of a furnace. It consists of three main parts:

- Top Graph:** A graph showing the relationship between the average air temperature outside the furnace ($t_{\text{вн}}^{\text{ср}}$) and the frost penetration depth ($H_{\text{з}}$). The y-axis represents the average air temperature in $^{\circ}\text{C}$, ranging from -35 to -15. The x-axis represents the frost penetration depth in meters (м), ranging from 0 to 1.6. Two sets of curves are shown: one for clay and silty foundations (Глинистые и суглинистые основания) and another for sandy and stony foundations (Песчаные и скальные основания).
- Bottom Graph:** A graph showing the relationship between the average heating temperature ($t_{\text{ср}}$) and the heating duration (τ). The y-axis represents the average heating temperature in $^{\circ}\text{C}$, ranging from +3 to +100. The x-axis represents the heating duration in hours (ч), ranging from 3 to 36. A series of curves are plotted for different average working temperatures ($t_{\text{ср.р.}}$), ranging from +3 to +100 $^{\circ}\text{C}$.
- Schematic Diagram:** A diagram of a furnace (Ключ) with a cross-section showing the furnace body and the foundation. The furnace is labeled with 'а' and 'б' at the top and 'н' and 'в' at the bottom. The foundation is labeled 'Т'.

Решение математической модели (2) и применение номограммы для нахождения времени отогрева промороженного грунтового основания основываются на том что известна температура нагревателя, в то время на практике известна только мощность нагревателя. Строителям крайне важно иметь решение приведенной выше задачи через заданную мощность нагревателя, через которую можно получить все другие теплотехнические параметры (глубина и время прогрева в зависимости от мощности, в зависимости от температуры наружного воздуха и начального распределения температур грунтового массива). Решению этой задачи была посвящена данная работа. Поэтому нами при помощи программного продукта ELCUT 5.7 профессиональная версия были построены номограммы для определения температуры поверхности нагревателя в зоне контакта с мерзлым грунтом и времени прогрева промороженного грунтового основания в зависимости от удельной мощности нагревателя и теплофизических характеристик грунта.

В качестве нагревателя использовался термоэлектромат, различной мощности. Термоэлектромат представляет собой гибкое электрическое изделие, имеющее нагревательный элемент, утеплитель и изолирующую оболочку.

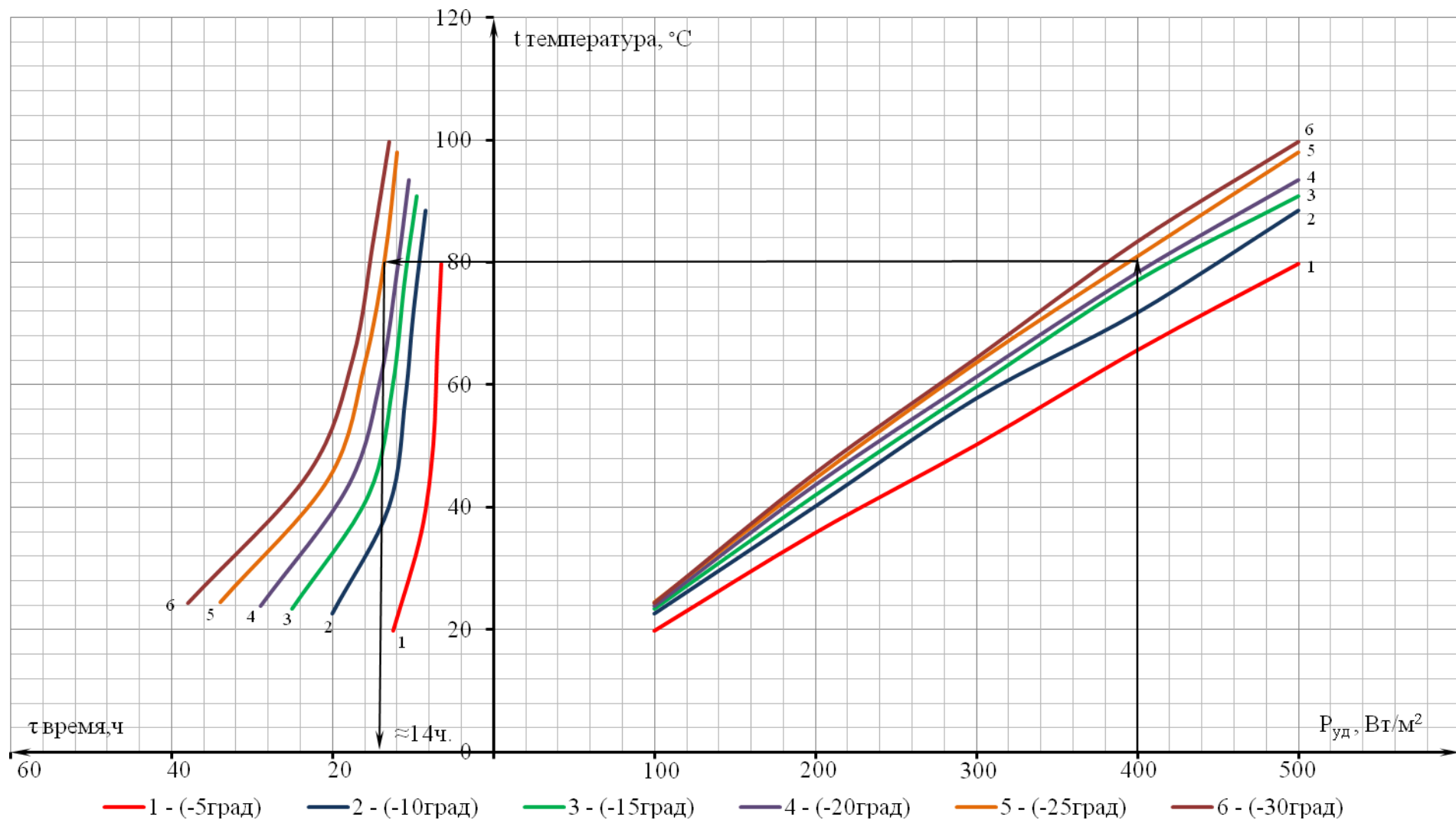


Рис. 2. Номограммы для определения температуры поверхности термоэлектромата и времени прогрева песка разной крупности на глубину 30см до 0°C в зависимости от удельной мощности термоэлектромата, при температуре поверхности грунтового массива -5°C , -10°C , -15°C , -20°C , -25°C , -30°C , толщине утеплителя - вспененного полиэтилена $\delta=0,01\text{м}$, $K_{\text{пр}}= 3,4 [\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})]$, $R=0,29(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт})$

Ключ к номограмме представленной на рисунке 2: при удельной мощности термоэлектромата 400 Вт/м^2 , время прогрева грунта до 0°C на глубину 30см , составит примерно 14 часов, температура поверхности термоэлектромата на этот момент времени - 80°C .

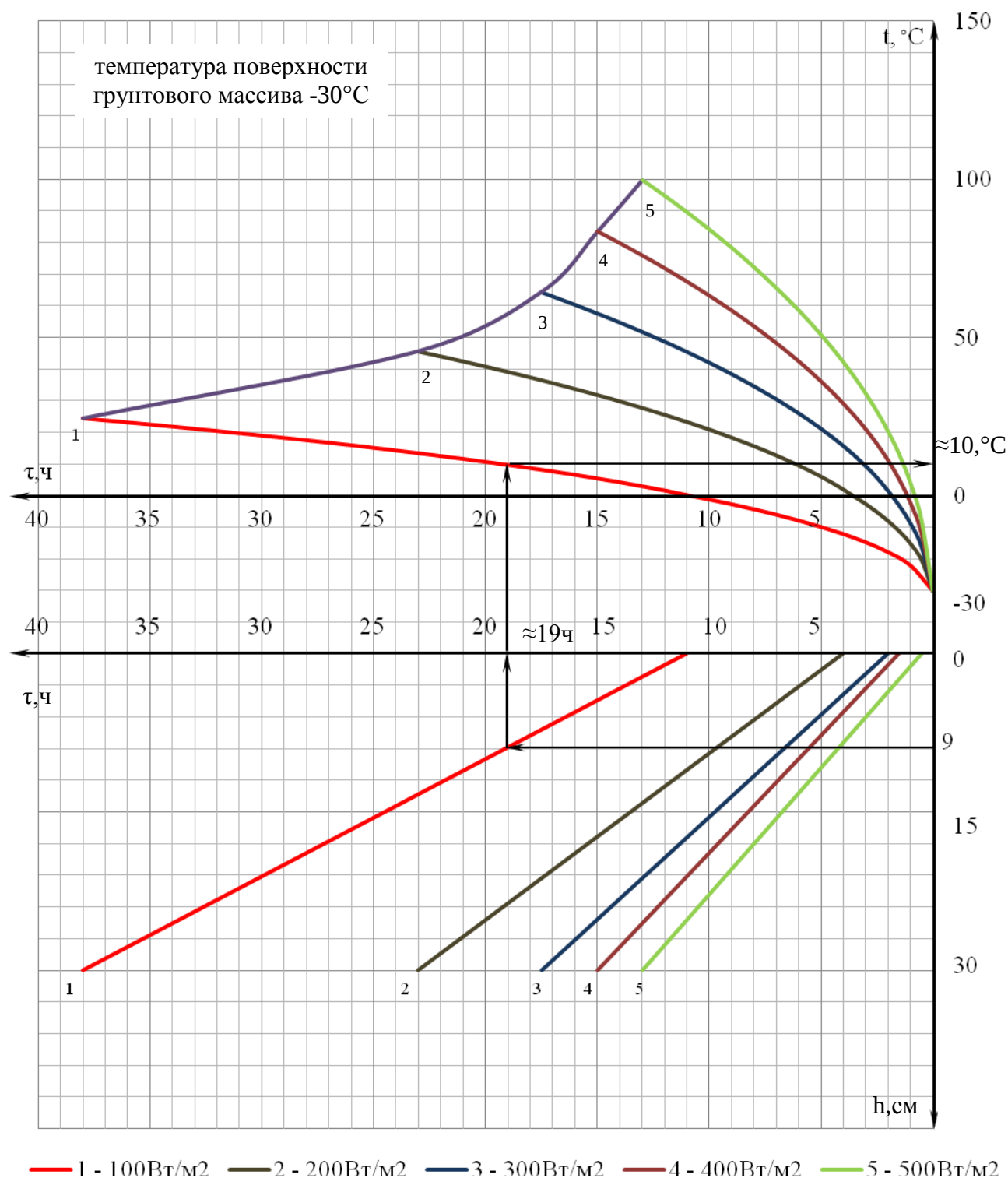


Рис. 3. Номограммы для определения времени прогрева *песка разной крупности* на различную глубину до 0°C в зависимости от удельной мощности термоэлектромата, при температуре поверхности грунтового массива -30°C , толщине утеплителя - вспененного полиэтилена $\delta=0,01\text{м}$, $K_{\text{пр}}=3,4 \text{ [Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)]}$, $R=0,29(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт})$

Ключ к номограмме представленной на рисунке 3: если необходимо прогреть грунт на глубину 9см, при этом удельная мощность термоэлектромата - 100 Вт/м^2 , тогда время прогрева грунта составит примерно 19 часов и температура поверхности термоэлектромата на этот момент времени составит 10°C .

Следует отметить, что приведенные номограммы (рис. 2, 3) были построены в предположении, что между поверхностью нагревателя и промороженного грунтового основания имеется 100% тепловой контакт, которого в реальных условиях достичь очень сложно, поэтому эти номограммы требуют уточнения в практике реального применения.

Литература

1. Рекомендации по электрообогреву монолитного бетона и железобетона нагревательными проводами / ЦНИИОМТП Госстроя СССР.-М.: Изд-во ЦНИИОМТП. 1989.-67с.
2. СНиП 3.03.01-87*. Несущие и ограждающие конструкции. – М. : ЦИПТ Госстроя СССР, 1988. – 192 с.
3. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР.-М.: Строй издат, 1982.-213с.
4. Доленко П.Д. Обогрев мерзлых массивов при бетонировании гидротехнических сооружений в зимних условиях: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 5.23.07 / П.Д. Доленко – Новосибирск, 1988.-156с.