



# Теплофизический расчет теплотерь подземной части зданий

А. Г. Сотников, доктор техн. наук, профессор



Среди современных зданий все больше встречаются такие, ограждения которых контактируют с грунтом и поэтому требуют использования соответствующих методик расчета теплопередачи и теплотерь в грунт. В первую очередь – это общественные здания, заглубленные в грунт, что позволяет экономить занимаемые территории, не превышать заданную высоту и соблюдать другие условия. Подобные расчеты теплотерь необходимы для объектов специального назначения, подземных магазинов, парковок, зимних и весенних теплиц, обогреваемых футбольных полей и др. В статье предлагается новая, достаточно строгая теплофизическая методика таких расчетов, основанная на исследованиях отечественных ученых.

Современные здания разного назначения все чаще «уходят» под землю, что позволяет решать ряд архитектурно-планировочных задач. Еще в 60-х годах XX века мы находим примеры подобных решений. Наиболее известен Кремлевский Дворец съездов, имеющий несколько этажей под землей.

Многочисленные коммуникации располагаются в грунте, который может быть использован как источник теплоты для испарителей водоохлаждающих машин, работающих зимой в режиме теплового насоса. Расчет потерь теплоты таких заглубленных зданий и инженерных сетей в грунтах, соответствующий физической природе передачи теплоты, применяется весьма ограниченно. По-прежнему ждет решения эта теплофизическая задача применительно к куль-

тивационным сооружениям – теплицам [1], зданиям в вечномёрзлых грунтах [2], обогреваемым футбольным полям [3] и подобным объектам.

Для всех них до сих пор актуально требование [1]: «...уделить больше внимания изучению температурного режима почвы в холодное (зимнее) время года, чтобы избежать недостатков в проектировании и расчете систем отопления...». Отрывочные опытные удельные величины затрачиваемой на подогрев почвы мощности были получены нами из статьи [3]:  $q_T = 200\text{--}300$  Вт/м<sup>2</sup> при  $t_H = -10$  °С,  $t_{H,\text{пов}} = 0$  °С,  $t_{\text{тр.пов}} = +15\text{...} +35$  °С, и указание, что в грунт поступает 15–20 % этой теплоты, позволяют только лишь оценить суммарный коэффициент теплоотдачи от грунта в атмосферу  $\alpha_K + \alpha_L = (0,8\text{...}0,85) (200\text{...}300) /$

/ (0 - (-10)) = 16...24 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Такой разброс объясним разными условиями теплообмена и переменной скоростью ветра.

Наиболее известна методика расчета теплопотерь заглубленных частей здания по зонам – полосам 2-метровой ширины по периметру здания и условным коэффициентам теплопередачи этих зон, отнесенным к наружной температуре. Такая методика применялась еще с 1930-х годов XX века, смысл ее понятен, но строгое теплофизическое обоснование отсутствует. В учебнике по отоплению Б. М. Аше [4] мы находим комментарий к этой методике, предложенной несколько ранее В. Д. Мачинским [5]. Обсуждая теплопотери через грунт, Б. М. Аше пишет: «Теоретическое разрешение вопроса теплопередачи в рассматриваемых случаях является крайне трудной и пока что исчерпывающе нерешенной задачей. Ряд исследователей подходили к решению этого вопроса, но практически приемлемого и в то же время научно и теоретически обоснованного метода «расчета» теплопотерь в неограниченное пространство грунта дать не удалось. Вопрос крайне усложнен еще и тем обстоятельством, что состав и влажность грунта являются величинами крайне изменчивыми... Поэтому технике отопления приходится довольствоваться методами, предложенными различными авторами, не расчета, а «определения» теплопотерь через полы и стены в грунт, оправдавшие себя на практике. Один из таких методов предложен В. Д. Мачинским...».

В этой ситуации можно вполне согласиться с авторами статьи [6] в том, что «...в настоящее время отсутствуют достоверные методы расчета потерь теплоты через полы и заглубленные части стен, учитывающие особенности формирования теплового режима этих конструкций, а также грунтового массива основания здания. Методика расчета, приведенная в СНиП 2.04.05-86(91), основана на закономерностях стационарной теплопередачи, справедливость которых в рассматриваемой расчетной области трудно предсказуема. Кроме того, не учитываются такие важные параметры, как теплофизические свойства грунтов, геометрические характеристики здания». Одновременно заметим, что методика, предложенная в цитируемой статье [6], нам представляется малопонятной, не связанной с теплофизикой и сложной в расчетах.

Принципиально другой подход к теплофизическим расчетам теплопотерь разных конструкций зданий и коммуникаций, по-разному расположенных в грунте, при их разной геометрической форме

- Центральное отопление работает нестабильно
- Батареи в комнате еле теплые, а температура на улице опускается до -30°C



г.Павловский Посад  
Московской области.

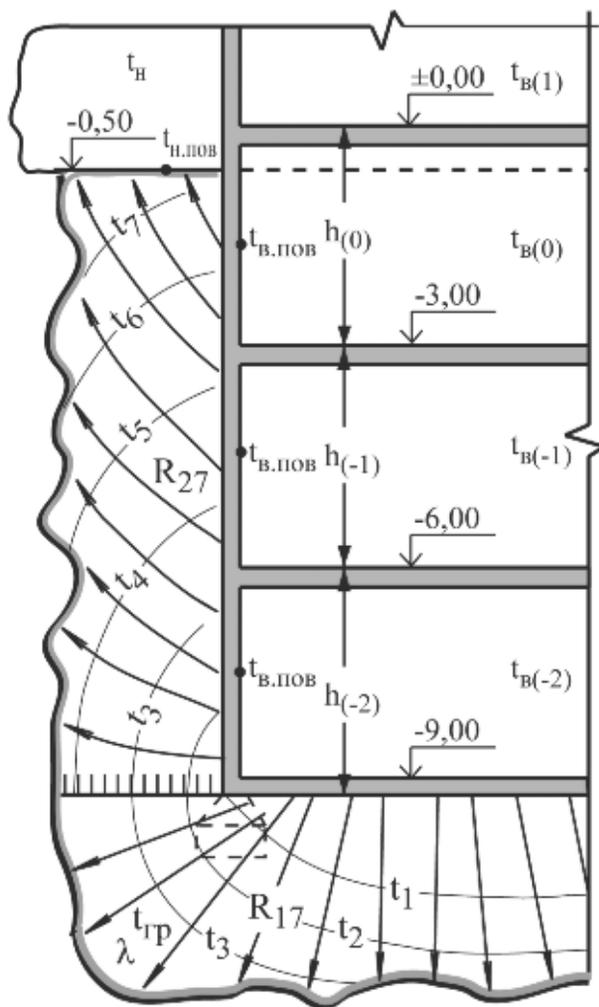
В комнате тепло и уютно.  
Счет за электричество в январе почти  
не отличается от счета в июне

**ОН РАБОТАЕТ!**

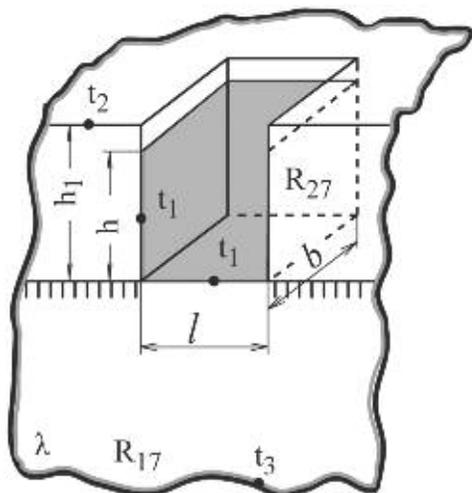
**ZUBADAN**

[www.zubadan.ru](http://www.zubadan.ru)





■ Рис. 2. Расчетная схема подземной трехэтажной части здания, разделенная согласно рис. 3, 4 на две части – бесконечную пластину и полуограниченный массив с указанием потока тепла от ограждений в грунт  $R_{17}$  и в атмосферу  $R_{27}$



■ Рис. 1. Расчетная схема подземной части здания, разделенная согласно рис. 3, 4 на две части – бесконечную пластину и полуограниченный массив

(пластина, цилиндр и др.), при разном описании формы грунта (бесконечный или полуограниченный массив, бесконечная пластина или их сочетание), можно реализовать, если использовать данные ряда авторов, в первую очередь А. И. Пеховича и В. М. Жидких [7], С. С. Кутателадзе [8] и др.

Для произвольно расположенных тел – по сути грунта, при заданных температурах  $t_1$  и  $t_2$  изотермической поверхности стены, пола, трубы, грунта и его поверхности, вводится понятие «тепловое сопротивление тела» – массива конструкции, ограниченной двумя изотермическими поверхностями с температурой  $t_1$  и  $t_2$ . Это значение вычисляют по формулам, приводимым, например, в разделе В–2 «Тепловые сопротивления тел» [7]. Температуру грунта задают в зависимости от его глубины или определяют по данным климатологов в части 2 раздела 2 «Температура почвы» справочника [9].

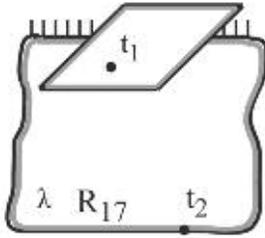
В общем случае, для ограждений подземной части здания (стена, пол) учитывают все слои конструкции, кроме  $1/\alpha_H$  для пола. Тогда общее термическое сопротивление,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , отнесенное к температуре наружного и внутреннего воздуха, равно:

$$R_{\text{орг}} = \frac{(t_B - t_H)F}{Q} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{\text{гр}} + \frac{1}{\alpha_H}. \quad (1)$$

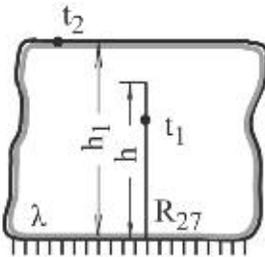
Сложность заключается в том, что для данной задачи надо выбрать ту соответствующую конструкцию или их группу, которая позволит найти искомое термическое сопротивление и теплопотери. Подземная часть здания (рис. 1, 2) может быть представлена в виде воздушного объема – параллелепипеда размерами  $l \times b$ , заглубленного в грунт на глубину  $h_1$  и имеющего определенную конструкцию стен и пола, а значит, величины  $\lambda_i$  и  $\delta_i$  ее слоев. Термическое сопротивление грунта в такой конструкции (рис. 1) и соответствующие теплопотери рассчитывают отдельно для горизонтальной части размером  $l \times b$ , расположенной в полуограниченном массиве с теплопроводностью  $\lambda$  термическим сопротивлением  $R_{17}$  (рис. 3) при известной температуре грунта  $t_2$ , определяемым по формуле:

$$R_{17} = \frac{t_1 - t_2}{q} = \frac{1}{4\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{lb}} \quad (2)$$

и термическим сопротивлением грунта между стеной и атмосферой в форме пластины  $R_{27}$ , погруженной в грунт на глубину  $h_1$  (рис. 4) при известной температуре поверхности  $t_2$ , определяемым по формуле:



■ Рис. 3. Расчетная схема пола подземной части здания, заглубленного в грунт, – полубесконечный массив, ограниченный сверху адиабатической поверхностью



■ Рис. 4. Расчетная схема подземной части стены высотой  $h$ , заглубленной в грунт в виде бесконечной пластины высотой  $h_1$  и ограниченной снизу адиабатической поверхностью (без теплообмена с остальной частью грунта)

$$R_{27} = \frac{t_1 - t_2}{q} \approx \frac{\delta_{\text{усл}}}{2\lambda} = \frac{K(\cos \pi h / 2h_1)}{K(\sin \pi h / 2h_1)} = f\left(\frac{h}{h_1}\right), \quad (3)$$

где согласно [8] выражение  $K(\sin a)$  есть полный эллиптический интеграл, величину которого можно найти по таблицам специальных функций, например табл. 1.1.2.4.3, с. 88 [10]. Для упрощения расчетов по этой формуле на рис. 5 приводится график, из которого легко найти условную глубину грунта  $\delta_{\text{усл}} = \lambda_{\text{гр}} R_{27}$ , для расчета теплотерьер данного подземного этажа здания в зависимости от относительного заглубления стены в пределах этажа  $h/h_1$ . Например, при четырехэтажной подземной части здания и равной высоте этажей для (-3) этажа  $h/h_1 \approx 0,25$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,73$  м, для (-2) этажа  $h/h_1 = 0,33$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,62$  м, для (-1) этажа  $h/h_1 = 0,5$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,5$  м, для (0) этажа  $h/h_1 = 1$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,14$  м.

Индексы в обозначениях  $R_{17}$  и  $R_{27}$  соответствуют номерам задач в книге [7]. В случае большого заглубления, если  $h/h_1 \ll 1$ , термическое сопротивление грунта  $R_{27} = \ln(8h_1 / \pi h) / 2\pi\lambda$ . К вычисленным по формулам (2) и (3) термическим сопротивлениям грунта прибавляют собственные термические сопротивления слоев конструкции стены или пола.

## Легкое проектирование узлов любой сложности



Реклама

## 27 фитингов – более 300 решений

С новой системой модульных фитингов Uponor MLC Riser System стало возможным осуществлять любые соединения труб Uponor MLC в диаметрах 25-110 мм.

Благодаря модульной концепции система работает как детский конструктор: всего 27 фитингов позволяют реализовать более 300 различных комбинаций тройников, угольников, редукторов и более крупных сборочных узлов.

■ Посетите наш сайт [www.uponor.ru](http://www.uponor.ru)

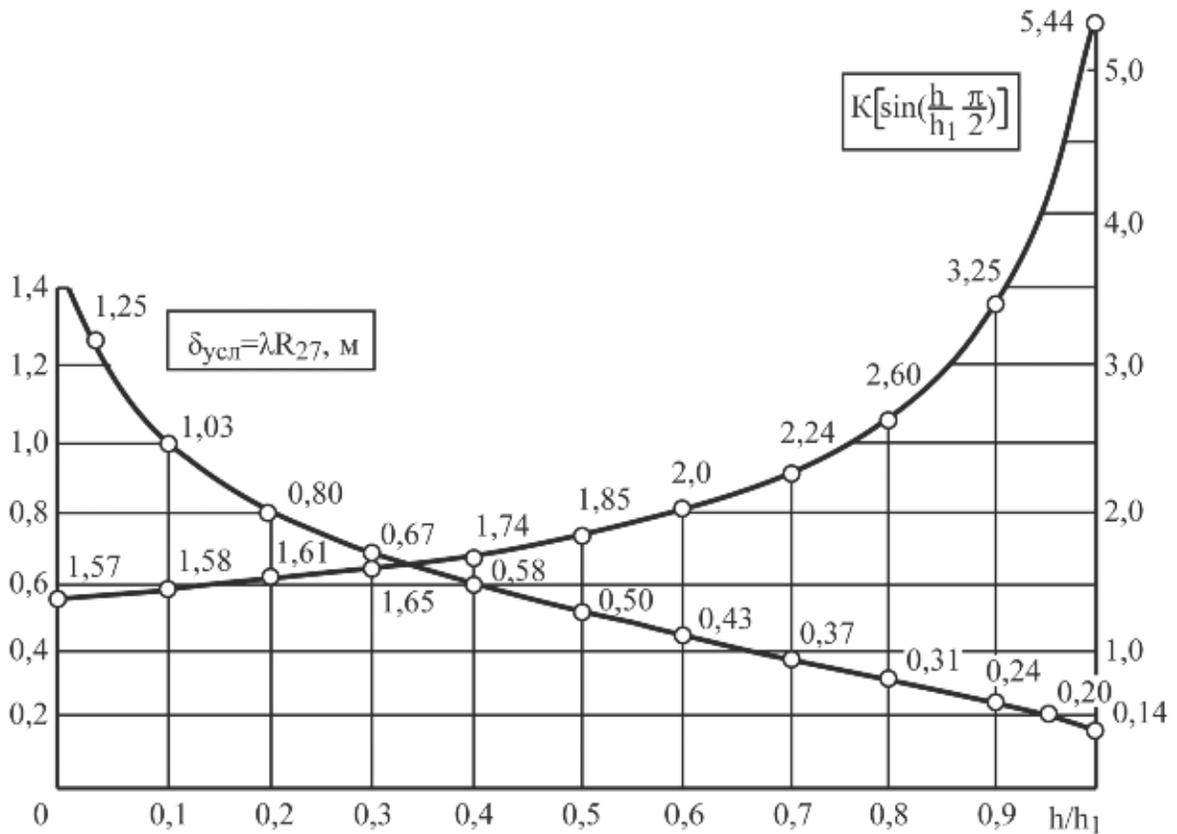


Рис. 5. График для определения условной толщины грунта для вычисления термического сопротивления  $R_{27}$  по формуле (3) и график зависимости полного эллиптического интеграла  $K(\sin...)$  от величины заглубления  $h/h_1$  стены данного этажа в грунт

Поясним примером предлагаемую методику расчета теплопотерь заглубленной части здания.

### Пример

Подземная часть здания имеет в плане размеры  $20 \times 20$  м, ее периметр  $P = 4 \times 20 = 80$  м, она заглублена в песчаный грунт с температурой  $t_2 = +8$  °С, коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{гр} = 2$  Вт/(м·°С) на расстояние  $h_1 = 6$  м,  $h = 5,5$  м (рис. 1). Термическое сопротивление стен и пола заглубленной части здания  $R_{ст} = 2(\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ , температура воздуха в подвале  $t_B = +16$  °С, наружного воздуха  $t_H = -20$  °С. Оценить термическое сопротивление грунта и определить потери теплоты в подземной части здания. Сравнить вычисленные величины с теми, которые определяют по известной методике, принятой в отоплении для расчета теплопотерь в грунт по зонам.

Термическое сопротивление полуограниченного объема грунта в основании здания по формуле (2) равно:  $R_{17} = 1(\pi/20 \cdot 20)^{0,5}/4 \cdot 2 \approx 0$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ , то есть пренебрежимо мало по сравнению с собственным

термическим сопротивлением пола в подвале. Поэтому теплопотери пола подземной части здания будут равны:  $Q_{т.п} = lb(t_1 - t_2)/(R_{пл} + R_{17} + 1/\alpha_B) = 20 \cdot 20(16 - 8) \cdot 10^{-3}/(2 + 1/8,7) = 1,5$  кВт. Термическое сопротивление грунта по графику рис. 5 при  $h/h_1 = 5,5/6 \approx 0,91$  равно:  $R_{27} = \delta_{\text{усл}}/\lambda_{гр} = 0,23/2 = 0,115$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ . Общее термическое сопротивление стен подвала и грунта по формуле (1) равно:  $R = 1/8,7 + 2 + 0,115 + 1/23 = 2,24$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ . В результате теплопотери стен подземной части здания будут равны:  $Q_{т.п} = (Ph/2)(t_1 - t_3)/R = 80 \cdot 5,5(16 - (-20)) \cdot 10^{-3}/2,24 = 7,1$  кВт. Сравнивая результаты расчета, делаем вывод, что теплопотери стен, заглубленных в грунт в подземной части здания, существенно больше, чем пола, обращенного в полуограниченный массив грунта, при близких значениях площади этих ограждений. Этот факт объясняется, прежде всего, различием температур заглубленного грунта и поверхности земли в холодное время года.

Сравнительный расчет теплопотерь подземной части выполним по известной в отоплении методике, когда вся площадь разделена на зоны 2-метровой

ширины. При известных условных коэффициентах теплопередачи этих зон без утепляющих слоев искомые теплотери будут равны:

$$Q_{т.п} = (t_{в} - t_{н}) \sum_{i=1}^{i=4} k_{усл.и} F_i \cdot 10^{-3} = (16 - (-20)) (0,46 \cdot 80 \cdot 1,5 + 0,23 \cdot 80 \cdot 2,0 + 0,116 \cdot 80 \cdot 2,0 + 0,07 \cdot 20 \cdot 20) \cdot 10^{-3} \approx 5 \text{ кВт},$$

а для утепленных – еще меньше. Сравнивая результаты расчетов теплотерь подземной части здания, делаем вывод, что строгий теплофизический расчет указывает на существенно бóльшие теплотери, чем приближенный расчет, принятый в отоплении (в 1,7 раза). Различие будет тем больше, чем больше заглубление здания и меньше площадь его пола. Проверка этой методики на условие, что теплота от стены будет распространяться не только через грунт в атмосферу, но и в нижний полуограниченный массив сопротивлением  $R_{24}$  [7], показала, что последним можно пренебречь. Более подробно эта методика расчета теплотерь заглубленных частей здания описана в [7].

## Выводы

1. Предложенная методика отличается от общепринятой более строгим теплофизическим обоснованием, она учитывает как реальное сопротивление конструкции, так и дополнительное сопротивление грунта.

2. В общем термическом сопротивлении стены и пола собственно грунт составляет меньшую часть, и поэтому дальнейшее уточнение этой методики нецелесообразно.

3. Предлагаемая методика учитывает конструкцию и термическое сопротивление стен и пола, а также теплопроводность грунта. Для более плотного и влажного грунта его теплопроводность и теплотери растут, при этом влияние грунта становится более заметным. ■

## Литература

1. Вишняк Н. Н. Исследование систем отопления почвы и субстрата зимних и весенних теплиц // Водоснабжение и санитарная техника. – 1970. – № 11.
2. Щукин О. Г. Расчет теплотерь подвалов, заглубленных в вечномерзлый грунт // Водоснабжение и санитарная техника. – 1965. – № 8.
3. Тарабанов М. Г., Сергеев В. Ф., Буров С. В. Система подогрева футбольных полей // АВОК. – 2003. – № 7.

4. Аше Б. М. Отопление и вентиляция. Т. 1: Общие сведения. Системы отопления // Учебник для вузов. Изд. 1-е. Госстройиздат, М.-Л. 1934; Изд. 2-е. Госстройиздат, М.-Л. 1939.
5. Мачинский В. Д. Теплотехнические основы гражданского строительства. М. : Госстройиздат, 1933.
6. Дячек П. И., Макаревич С. А. Расчет потерь теплоты заглубленных частей здания // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 8.
7. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л. : Энергия, 1968. Изд. 2-е. Л. : Энергия, 1976.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 4-е. Новосибирск : Наука, 1970. Изд. 5-е, перераб. и доп. М. : Атомиздат, 1979.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Ч. 1–6. Вып. 1–35. Л. : Гидрометеоиздат, 1990–1999.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М. : Наука, 1980.

**ПЕТЕРБУРГСКИЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР**  
 профессиональный информационно-выставочный комплекс



Генеральный директор ПСЦ  
Ирина Белинская



**Нам 15 лет**  
**Уверенно ведем к успеху**

**В нашем арсенале:**

- Выставка строительных материалов;
- Проведение презентаций, конференций и других мероприятий;
- Организация профессиональных конкурсов;
- Издание журнала, буклетов и каталогов;
- Виртуальная выставка строительных материалов.

\*07342 Санкт-Петербург, ул. Тоожковская, 5, (812) 324 9997, (812) 496 6214, (15), (16), adm@infstroy.ru, www.infstroy.ru

Реклама