

УДК 621.1.016

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОПOTЕРЬ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЙ

А. Г. Сотников, д-р техн. наук, проф., НП «АВОК-С-З»

*Современные здания разнообразного назначения все чаще «уходят» под землю, что позволяет решить ряд архитектурно-планировочных задач – сэкономить территориально, не превысить заданную высоту и т. д. Подземные ограждения таких зданий контактируют с грунтом, и поэтому требуется определять их теплопотери в грунт. Подобные расчеты необходимы и при строительстве специальных объектов, подземных магазинов и парковок, зимних и весенних теплиц, обогреваемых футбольных полей и др.*

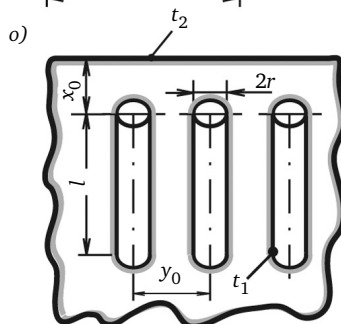
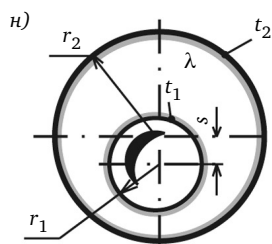
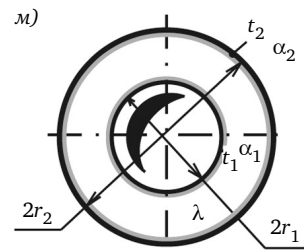
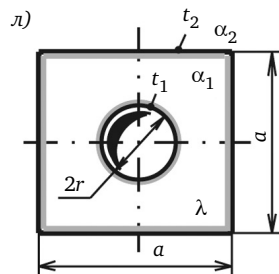
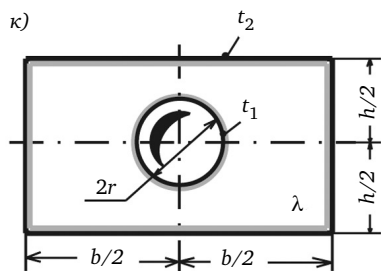
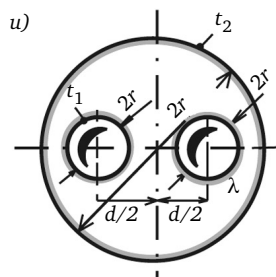
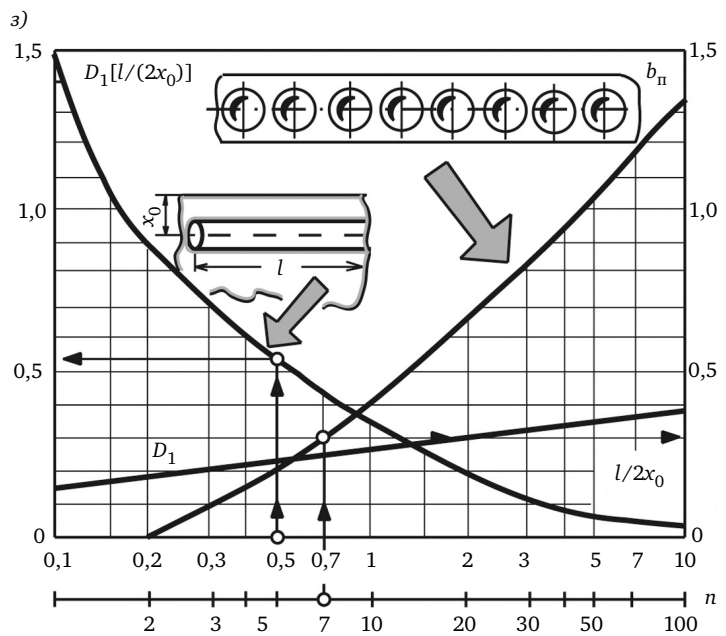
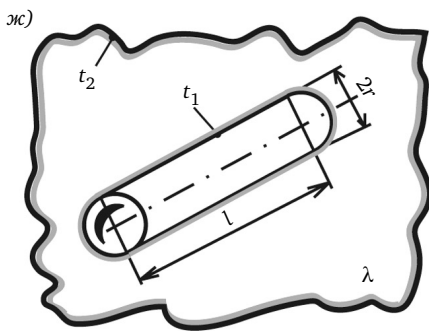
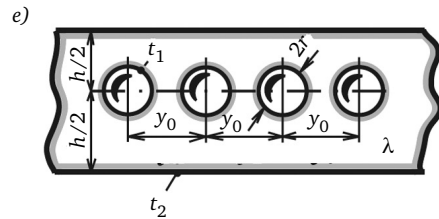
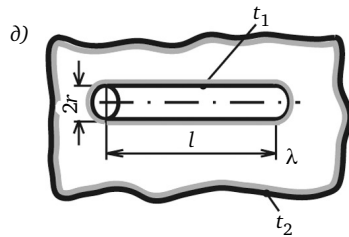
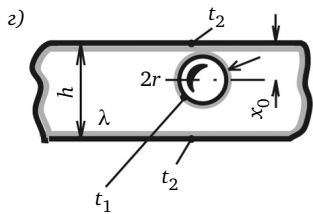
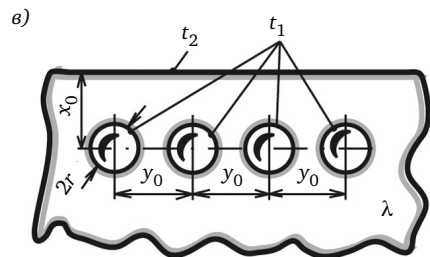
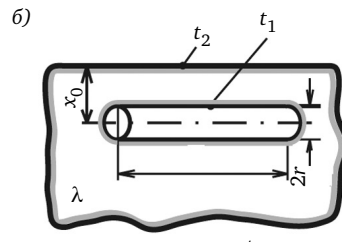
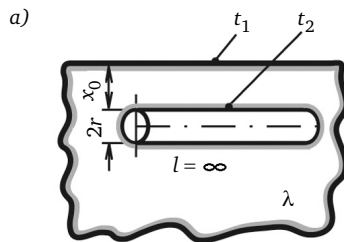
*Предложена новая теплофизическая методика таких расчетов, основанная на исследованиях российских ученых.*

Еще в 60-х годах XX века мы находим примеры строительства подземных сооружений — наиболее известен Кремлевский Дворец съездов, имевший несколько этажей под землей. Сегодня, как правило, различные коммуникации располагают 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, применяют весьма ограниченно. По-прежнему ждет решения эта теплофизическая задача применительно к культивационным сооружениям — теплицам [3], зданиям в вечномерзлых грунтах [10], обогреваемым футбольным полям [9] и др. Требуется [3]: «...уделить больше внимания изучению температурного режима почвы в холодное (зимнее) время года, чтобы избежать недостатков в проектировании и расчете систем отопления...». Отрывочные опытные удельные значения мощности, затрачиваемой на подогрев почвы, которые получены нами из статьи [9]:  $q_T = 200...300 \text{ Вт/м}^2$  при  $t_H = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{H, \text{пов}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{тр. пов}} = 15...35 \text{ }^\circ\text{C}$  — указание, что в грунт поступает 15...20 % этой теплоты, позволяют только оценить суммарный коэффициент теплоотдачи от грунта в атмосферу:  $\alpha_K + \alpha_D = (0,8...0,85) \times (200...300)/[0 - (-10)] = 16...24 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ . Такой разброс объясним неодинаковыми условиями теплообмена и разными переменными скоростями 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 в 30-х годах XX века, смысл ее понятен, но строгое теплофизиче-

ское обоснование отсутствует. В учебнике по отоплению Б. М. Аше [1] мы находим комментарий к этой методике, предложенной несколько ранее В. Д. Мачинским [6]. 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 подходил к решению этого вопроса, но практически приемлемого и в то же время научно 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, оправдавшими себя на практике. Один из таких методов предложен В. Д. Мачинским...».

В этой ситуации можно вполне согласиться с авторами статьи [4], 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 предсказать. Кроме того, не учитываются такие важные параметры, как теплофизические свойства грунтов, геометрические характеристики здания». Одновременно заметим, что методика, предложенная в цитируемой статье [4], нам представляется малопонятной, не связанной с теплофизикой и сложной в расчетах.



Принципиально другой подход к теплофизическим расчетам теплопотерь зданий и коммуникаций различных конструкций, по-разному расположенных в грунте, разных геометрических форм (пластина, цилиндр и др.), при разных формах грунта (бесконечный или полуограниченный массив, бесконечная пластина или их сочетание) можно реализовать, если использовать данные некоторых авторов, в первую очередь А. И. Пеховича и В. М. Жидких [8], С. С. Кутателадзе [5] и др. Примеры взаимного расположения этих тел разной геометрии, наиболее важные в подобных инженерных задачах, показаны на рис. 1.

Для этих произвольно расположенных тел — по сути грунта — при заданных температурах  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 1) изотермической поверхности стены, пола, трубы, грунта и его поверхности вводится понятие *тепловое сопротивление тела* — массива конструкции, ограниченной двумя изотермическими поверхностями с температурами  $t_1$  и  $t_2$ . Это значение вычисляют по формулам, приводимым, например, в разделе V-2 работы [8]. Температурой грунта задаются в зависимости от его глубины или определяют по данным климатологов раздела 2 части 2 справочника [7].

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

$$R_{\text{огр}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) F / Q = 1/\alpha_{\text{в}} + \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i + R_{\text{тр}} + 1/\alpha_{\text{н}}. \quad (1)$$

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. 2, в, д) 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. 2, в) и соответствующие теплопотери рассчитывают отдельно для горизонтальной части размерами  $l \times b$ , расположенной в полуограниченном массиве с теплопроводностью  $\lambda$ , термическим сопротивлением  $R_{17}$  (рис. 2, б) при известной температуре грунта  $t_2$ , определяемым по формуле

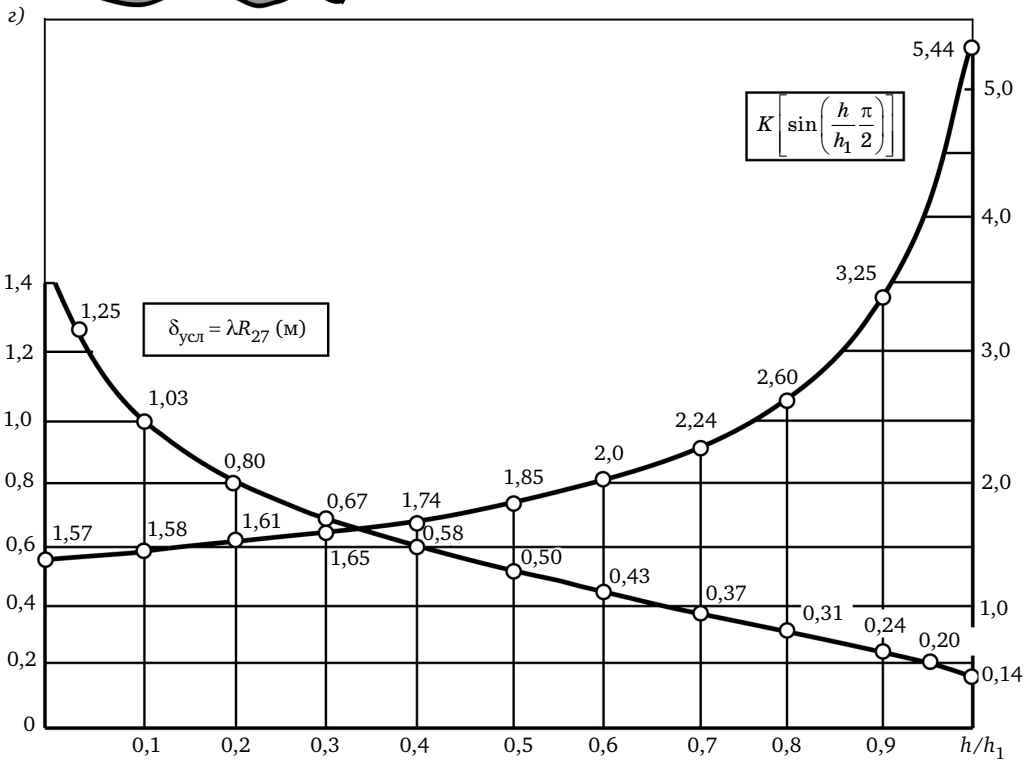
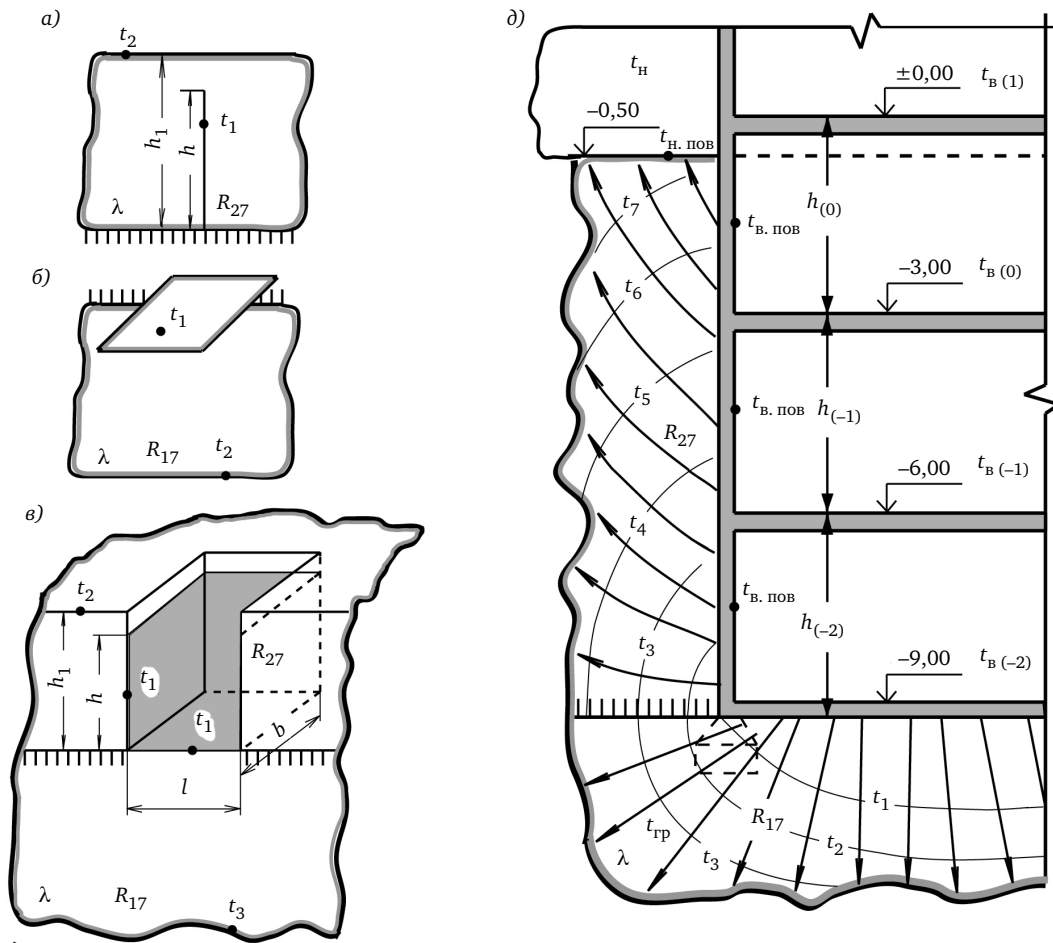
$$R_{17} = \frac{t_1 - t_2}{q} = \frac{1}{4\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{bl}}, \quad (2)$$

и термическим сопротивлением грунта между стеной и атмосферой в форме пластины  $R_{27}$ , погруженной в грунт на глубину  $h_1$  (рис. 2, а) при известной температуре поверхности  $t_2$ , определяемым по формуле

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

где согласно [8] выражение  $K \sin \alpha$  есть полный эллиптический интеграл, значение которого можно найти по таблицам специальных функций, например табл. 1.1.2.4.3 в работе [2]. Для упрощения расчетов по этой формуле на рис. 2, з приводится график, из которого легко найти *условную глубину грунта*  $\delta_{\text{усл}} = \lambda_{\text{гр}} R_{27}$  для расчета теплопотери данного подземного этажа здания в зависимости от его относительного заглубления стены в пределах этажа  $h/h_1$ . Например, при 4-этажной подземной части здания и равной высоте этажей для -3-го этажа  $h/h_1 \approx 0,25$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,73$  м, для -2-го этажа  $h/h_1 = 0,33$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,62$  м, для -1-го этажа  $h/h_1 = 0,5$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,5$  м, для 0-го этажа  $h/h_1 = 1$ ,  $\delta_{\text{усл}} \approx 0,14$  м.

Рис. 1. Основные варианты теплообмена протяженных тел — трубопроводов и воздухопроводов большой длины, ограждений здания, погруженных в полуограниченный массив (грунт), бесконечную пластину или другую бесконечную среду, в тело или канал, имеющий в сечении прямоугольник, круг или квадрат: а — бесконечно длинный цилиндр радиусом  $r$  расположен на расстоянии  $x_0$  параллельно изотермической поверхности полуограниченного тела; б — цилиндр конечной длины  $l$  радиусом  $r$  расположен на расстоянии  $x_0$  параллельно изотермической поверхности полуограниченного тела; в — группа одинаковых  $n$  цилиндров длиной  $l$  радиусом  $r$ , расположенных на расстоянии  $x_0$  параллельно изотермической поверхности полуограниченного тела, расстояние между цилиндрами одинаково и равно  $y_0$ ; г — бесконечно длинный цилиндр радиусом  $r$  расположен в неограниченной пластине толщиной  $h$ ; д — цилиндр конечной длины  $l$  радиусом  $r$  расположен на расстоянии  $x_0$  в неограниченном теле; е — группа из  $n$  бесконечно длинных цилиндрических теплоизолированных полостей радиусом  $r$ , расположенных в одной плоскости симметрично на расстоянии  $h/2$  от края в неограниченной пластине, расстояние между цилиндрами одинаково и равно  $y_0$ ; ж — полый тонкостенный цилиндр конечной длины  $l$  и радиусом  $r$  находится в неограниченном теле; з — вспомогательный график для расчета; и — два бесконечно длинных одинаковых цилиндра радиусом  $r$  расположены внутри третьего цилиндра радиусом  $r$  симметрично относительно его оси; к — бесконечно длинный цилиндр радиусом  $r$  расположен симметрично внутри стержня прямоугольного сечения размерами  $b \times h$ ; л — бесконечно длинный цилиндр радиусом  $r$  расположен симметрично внутри стержня квадратного сечения размерами  $a \times a$ ; м — цилиндр длиной  $l$  радиусом  $r_1$  расположен симметрично в изолированном цилиндре радиусом  $r_2$  толщиной изоляции  $r_2 - r_1$ ; н — цилиндр длиной  $l$  радиусом  $r_1$  расположен эксцентрично в изолированном цилиндре радиусом  $r_2$  с расстоянием между осями  $s$ ; о — вертикальные цилиндры в количестве  $n$  конечной длины  $l$  расположены на глубине  $x_0$  перпендикулярно к поверхности полуограниченного тела



Индексы в обозначениях  $R_{17}$  и  $R_{27}$  соответствуют номерам задач в книге [8]. В случае большого заглубления, если  $h/h_1 > 1$ , 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.

**Поясним примером предлагаемую методику расчета теплопотерь заглубленной части здания.**

Подземная часть здания имеет в плане размеры  $20 \times 20$  м, периметр  $P = 4 \times 20 = 80$  м и 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. 2, в). Термическое сопротивление стен и пола заглубленной части здания  $R_{ст} = 2$  м<sup>2</sup> · °С/Вт, температура воздуха в подвале  $t_в = 16$  °С, наружного воздуха —  $t_н = -20$  °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)

$$R_{17} = 1[\pi/(20 \cdot 20)]^{0,5}/(4 \cdot 2) \approx 0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт,}$$

т. е. пренебрежимо мало по сравнению с собственным термическим сопротивлением пола в подвале. Поэтому теплопотери пола подземной части здания будут

$$Q_{т. п} = lb(t_1 - t_2)/(R_{пл} + R_{17} + 1/\alpha_в) = \\ = 20 \cdot 20(16 - 8) \cdot 10^{-3}/(2 + 1/8,7) = 1,5 \text{ кВт.}$$

Термическое сопротивление грунта по графику рис. 2, з при  $h/h_1 = 5,5/6 \approx 0,91$

$$R_{27} = \delta_{усл}/\lambda_{гр} = 0,23/2 = 0,115 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт.}$$

Общее термическое сопротивление стен подвала и грунта по формуле (1)

$$R = 1/8,7 + 2 + 0,115 + 1/23 = 2,24 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт.}$$

В результате теплопотери стен подземной части здания

$$Q_{т. п} = (Ph/2)(t_1 - t_3)/R = \\ = 80 \cdot 5,5[16 - (-20)] 10^{-3}/2,24 = 7,1 \text{ кВт.}$$

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. Такой 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 теплопотери

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

а для утепленных они будут еще меньше.

Сравнивая результаты расчетов теплопотерь подземной части здания, делаем вывод, что строгий теплофизический расчет указывает на существенно большие теплопотери, 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  $R_{24}$  [8], показала, что последним можно пренебречь. Более подробно эта методика расчета теплопотерь заглубленных частей здания описана в работе [8].

#### В ы в о д ы

1. Предложенная методика отличается от общепринятой более строгим теплофизическим

Рис. 2. Расчетные схемы и график определения термического сопротивления грунта  $R_{27}$  и теплопотерь стен подземной части зданий и сооружений по методике [8]: а — 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); б — расчетная схема пола подземной части здания, заглубленного в грунт — полубесконечный массив, ограниченный сверху адиабатической поверхностью; в — расчетная схема подземной части здания, разделенная согласно рис. 2, а, б на две части — бесконечную пластину и полуограниченный массив; г — график определения условной толщины грунта для вычисления термического сопротивления  $R_{27}$  по формуле (3) и график зависимости полного эллиптического интеграла  $K(\sin \dots)$  от заглубления  $h/h_1$  стены данного этажа в грунт; д — расчетная схема подземной 3-этажной части здания, разделенная согласно рис. 2, а, б на две части; бесконечную пластину и полуограниченный массив с указанием потока тепла от ограждений в грунт  $R_{17}$  и атмосферу  $R_{27}$

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 теплопотери растут, при этом влияние грунта становится более заметным.

#### *Литература*

1. *Аше Б. М.* Отопление и вентиляция: учебник. Т. 1: Общие сведения. Системы отопления. М.; Л.: Госстройиздат, 1939. 614 с.
2. *Бронштейн И. Н., Семдяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 974 с.
3. *Вишняк Н. Н.* Исследование систем отопления почвы и субстрата зимних и весенних теплиц // Водоснабжение и санитарная техника. 1970. № 11. С. 31–34.
4. *Дячек П. И., Макаревич С. А.* Расчет потерь теплоты заглубленных частей здания // Водоснабжение и санитарная техника. 1992. № 8. С. 22–23.
5. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. Изд. 4-е. Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.; изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
6. *Мачинский В. Д.* Теплотехнические основы гражданского строительства. М.: Госстройиздат, 1933.
7. *Научно-прикладной справочник по климату СССР.* Сер. 3. Ч. 1–6. Вып. 1–35. Л.: Гидрометеоздат, 1990–1999.
8. *Пехович А. И., Жидких В. М.* Расчеты теплового режима твердых тел. Изд. 2-е. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
9. *Тарабанов М. Г., Сергеев В. Ф., Буров С. В.* Система подогрева футбольных полей // АВОК. 2003. №7. С. 54–57.
10. *Щукин О. Г.* Расчет теплопотерь подвалов, заглубленных в вечномерзлый грунт // Водоснабжение и санитарная техника. 1965. № 8. С. 5–8.