тюхов, Б. М. Хрусталев [и др.] // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: материалы XXII Международной конференции, г. Брест, 31 окт.–2 нояб. 2024 г. – Брест, 2024. – С. 262–269.

6. Об утверждении Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь : постановление СМ РБ от 23.12.2015 № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=11031&p0=C21501084 (дата обращения: 12.04.2025).

УДК 697.3/.4

Интерпретирование методики Кулжинского, для определения теплопотерь подземных сооружений метрополитена мелкого заложения

Кононов Д. А.[1, 2], Белениник О. И.[1, 2] Сизов В. Д.[1]
[1]Белорусский национальный технический университет
[2] ОАО «Минскметропроект»
Минск, Республика Беларусь

В работе изложена интерпретация методики Клинского по определению коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций и теплопотерь помещений станционного комплекса метрополитена мелкого заложения.

Методика Кулжинскго «Определение теплопотерь через ограждающие конструкции подземных сооружений» разработана в 1960 г. на базе ВИА имени В. В. Куйбышева и применяется для закрытых подземных сооружений. Метрополитен является подземным сооружением со сквозным проветриванием большего объема в эксплуатационном режиме.

Целями расчета по интерпретированной методики является: определить коэффициенты теплопередачи наружных и внутренних ограждающих конструкций; определить теплопотери в расчетных помещениях; необходимость установки отопительных приборов с учетом теплового баланса помещений**.**

Расчетные параметры наружного воздуха. Расчетные параметры наружного воздуха для городов принимаем в соответствии с [1– 3] для теплого периода по параметрам А, для холодного – по параметрам Б. Продолжительность суток периода со средней суточной температурой воздуха ≤ 8 ºС, $z_{от.пер.}$ = 198 суток (4752 ч).

Расчетные параметры внутреннего воздуха Расчетные температуры воздуха и кратность воздухообмена для подземных помещений станции

приняты по [3]. Температуру в коридорах и лестницах принимать по температуре тоннельного воздуха. Температура в пешеходном переходе для холодного периода года –3,0 °С, в тоннеле и на платформе для холодного периода года +10,0°С, в кассовом зале холодного периода года +5,0 °С. Температуру в пешеходном переходе в зоне лестничных сходов павильонов для холодного периода года необходимо принимать по наружной температуре региона строительства. Относительную влажность в помещениях станции принимаем φ = 55 %. В методике Кулжинского принято принимать среднюю температуру по сооружению для определения теплопотерь. Однако помещения метрополитена имеют жесткие санитарные и технологические параметры температуры воздуха, поэтому при определении теплопотерь мы рассчитываем каждое помещение отдельно на требуемую температуру.

Расчет коэффициентов теплопередачи наружных ограждающих конструкций. При расчете коэффициентов теплопередачи наружных ограждающих конструкций станций метрополитена (наружных стен со стороны грунта и покрытия) по методике Ю. И. Кулжинского, для заглубленного здания выделяется два расчетных случая. Первый, когда толщина покрытия (с учетом толщины грунта) больше, чем расчетная толщина прогретого массива, т. е. $h_1 > \delta_{р.гр.}$ см. рис. 1. И второй, когда толщина покрытия меньше, чем толщина прогретого массива, т. е. $h_1 < \delta_{р.\,гр.}$ см. рис. 1.

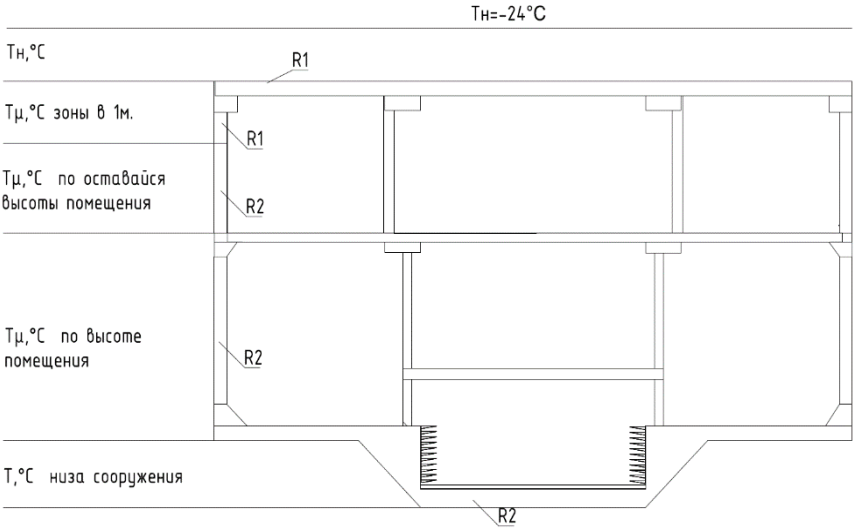

Рис. 1. Схема расположения расчетных зон и принятых температур

В первом случае, коэффициент теплопередачи определяется как для одной зоны, распространяющейся по всей высоте заглубленного сооружения либо части сооружения и вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{гр}} + \frac{\delta_{изол}}{\beta_{изол}\lambda_{изол}} + \frac{\delta_{р.гр.}}{\beta\lambda}\left(1 - \frac{\delta_{изол}}{\delta_{р.изол}}\right)},$$

где $\alpha_{гр}$ – коэффициент теплоотдачи грунта, Вт/(м^2°С); $\delta_{изол}$ – толщина теплоизоляционного слоя, м; $\beta_{изол}$ – формфактор, который учитывает влияние на коэффициент теплопередачи размеров тепловой изоляции, формы изолируемой поверхности, а также теплотехнических свойств изолирующего материала. Формфактор зависит от формы выработки [4]. Для выработки в форме параллелепипеда, рассчитывается по формуле:

$$\beta_{изол} = 1 + 3,54\sqrt{\frac{\alpha_{изол.} z}{F_{изол.}}},$$

где $\alpha_{изол}$ – коэффициент температуропроводности изоляции, м^2/ч; z – время натопа, ч, в данном случае принимается равным периоду отопительного периода; $F_{изол.}$ – площадь покрывного слоя изоляции, м^2; $\lambda_{изол.}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м °С); $\delta_{р.гр}$ – расчетная глубина прогретого массива, определяемая по формуле:

$$\delta_{р.гр} = 1,13\sqrt{\alpha\ z},$$

где α – коэффициент температуропроводности грунта, м^2/ч; β – формфактор, который учитывает влияние на коэффициент теплопередачи размеров сооружения и его формы изолируемой поверхности, а также теплотехнических свойств ограждающего массива. Формфактор зависит от формы выработки [4]. Для выработки в форме параллелепипеда рассчитывается по формуле:

$$\beta = 1 + 3,54\sqrt{\frac{\alpha z}{F}},$$

где F – площадь поверхности рассматриваемой выработки, м^2, то есть заглубленного здания либо части здания λ – коэффициент теплопроводности

грунта, Вт/(м °С); $\delta_{р.изол.}$ – расчетная глубина прогретого массива, м, определяемая по формуле:

$$\delta_{р.изол.} = 1{,}13\sqrt{\alpha_{изол.} z},$$

Коэффициент температуропроводности определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м °С); ρ – плотность материала, кг/м^3; c – коэффициент теплоемкости, Вт/(кг °С).

Во втором случае определяют коэффициенты теплопередачи для четырех зон: I – покрытия (с учетом тепловой изоляции); II – верхней части стены от покрытия до отметки $\delta_{р.гр.}$; III – нижней части стены от отметки $\delta_{р.гр.}$ до пола; IV – пола. Для первой зоны коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{гр}} + \frac{\delta_{изол}}{\beta_{изол}\lambda_{изол}} + \frac{h_1}{\beta\lambda}\left(1 - \frac{\delta_{изол}}{\delta_{р.изол}}\right)},$$

где h_1 – расчетная глубина залегания от поверхности земли до внутренней поверхности покрытия, мм, что можно выразить следующим выражением:

$$h_1 = h_{покр} + h,$$

где $h_{покр}$ – толщина покрытия заглубленного сооружения, мм, представляющая сумму толщин всех слоев; h – действительная глубина залегания сооружения, мм, от поверхности земли до наружной поверхности покрытия.

Для второй зоны формула для определения коэффициента теплопередачи имеет вид:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{гр}} + \frac{2h_1 + \delta_{р.гр}}{3\beta\lambda}}.$$

Для третьей и четвертой зон коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{гр}} + \frac{\delta_{р.гр}}{\beta\lambda}}.$$

Определение расчетного заглубления для определения температуры грунта. Для последующего определения теплопотерь через наружные ограждающие конструкции, граничащие с грунтом, необходимо знать отметки, на которых следует определить температуру грунта. Первая отметка, на которой определяется температура – поверхность земли, для которой справедлива запись $H_1 = 0$ м. Для первого расчетного случая выделяют следующие расчетные заглубления при $h_1 > \delta_{р.гр}$:

$$H_2 = \delta_{р.\,гр},$$

$$H_3 = h_1 + \frac{1}{3}h_2,$$

$$H_4 = h_1 + h_2.$$

Для второго расчетного случая выделяют следующие расчетные заглубления $h_1 < \delta_{р.\,гр}$:

$$H_2 = h_1 + \frac{1}{3}\left(\delta_{р.гр} - h_1\right),$$

$$H_3 = \delta_{р.\,гр} + \frac{1}{3}\left(h_1 + h_2 - \delta_{р.гр}\right).$$

Определение расчетной температуры грунта. Расчетная температура грунта на любой отметке определяется по формуле

$$t_{гр} = t^{ср}_{год.\,возд} + \Delta t + \frac{H}{30} \pm \frac{A_0}{2{,}72^{\frac{H}{3}}},$$

где $t^{ср}_{год.возд}$ – средняя годовая температура воздуха, °С, принимается по [3, табл. 3.3]; Δt – превышение средней годовой температуры, °С, принимается по климатической зоне; H – расчетное заглубление, м, для различных зон заглубленного сооружения либо части сооружения; A_0 – амплитуда годового колебания температур, °С, принимается по климатической зоне.

Для г. Минска, согласно методике Кулжинского, амплитуда годового колебания температур по климатической зоне A_0 принимается равной 10,6 °С, превышение средней годовой температуры Δt = 1,5 °С.

Подставляя перед последним слагаемым в формуле знак «плюс», получаем максимально возможную на данной глубине температуру, а подставляя знак «минус» – минимально возможную. Так как температура грунта нам необходима для расчета теплопотерь заглубленного сооружения, в формуле будет применяться знак «минус» при последнем слагаемом.

Определение коэффициентов теплопередачи внутренних ограждающих конструкций. Коэффициенты теплопередачи внутренних ограждающих конструкций станции определяются как обратная величина сопротивлений теплопередачи, методика расчета которых изложена в [1]. Значения нормируемых сопротивлений теплопередачи, принимаются по табл. 7.1 [6], где n – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху, согласно [1, табл. 6.2] принимаем равным 1; $t_в$ – расчетная температура внутреннего воздуха, °С, принимаем равной +18,0 °С; $t_н$ – расчетная температура наружного воздуха, °С, для помещений входов принимаем –3,0 °С, для помещений станционного комплекса принимаем +5,0 °С; $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м °С), табл. 2.1; $\Delta t_в$ – расчетный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С, согласно [1, табл. 6.5] для производственных зданий с нормальным режимом определяется по формуле (но не более 8) $\Delta t_в = t_в - t_р$, где $t_р$ – температура точки росы, °С. Точка росы определяется по [1, прил. Е]. За исходные данные принимаем расчетную температуру внутреннего воздуха $t_в$ = +18 °С, и относительную влажность φ = 55 %. В итоге получим $t_р$ = 8,83 °С. Согласно [1] приведенное сопротивление теплопередаче наружных дверей должно быть не менее 0,6 значения минимального сопротивления теплопередаче наружных стен $R_{т.min}$. Таким образом получим приведенное сопротивление теплопередачи наружных дверей для входов и станции. Согласно [1; 7] приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций $R_{пр}$ должно быть не менее нормативного приведенного $R_{т.норм.}$, указанного в [5; 7]. В нормативных нормах Республики Беларусь отсутствуют требование к нормативному приведенному сопротивлению теплопередачи ограждающих конструкций, граничащих с пешеходной зоной метрополитена и грунтом. Поэтому принимаем сопротивления как для производственных зданий.

Определение коэффициента теплоотдачи. Коэффициент $\alpha_л$ может быть определен по выведенной на основании равенства формуле [8]:

$$\alpha_{л} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \frac{\left[\frac{t_1 + 273}{100}\right]^4 - \left[\frac{t_2 + 273}{100}\right]^4}{t_1 - t_2},$$

где t_1 и t_2 – температуры излучаемых поверхностей, °С; C_1 и C_2 – коэффициент излучения поверхностей; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, ккал/м^2·ч·(K/100)^4.

Коэффициент теплоотдачи в расчетистые помещения принимаем нормативным, а для поверхностей в пешеходная зона высчитываться согласно скорости движения воздуха и вида ограждающей конструкции.

Определение теплопотерь помещений под лестничными сходами павильонов на входах станции. Так как помещения под лестничными маршами павильонов на половину граничат с грунтом, а на половину воздухом перехода, это под подает под методику Кулжинскго. В этом случае правильнее определять теплопотери по зонам. Для для неутепленных полов на грунте и стен ниже уровня земли с коэффициентом теплопроводности $\lambda \geq 1{,}2$ Вт/(м^2°С) по зонам шириной 2 м, см. рис. 2, параллельным наружным стенам, принимая Rc, м^2°С/Вт, равным: 2,1 – для первой зоны; 4,3 – для второй зоны; 8,6 – для третьей зоны; 14,2 – для четвертой оставшейся площади пола °С/Вт.

Расчет потерь теплоты через ограждающие конструкции станции. Тепловой баланс помещения. Расчет потерь теплоты через ограждающие конструкции станции согласно [2, прил. Д]. При составлении теплового баланса помещения стоит учитывать теплопоступления из соседних помещений. Они учитываются, однако со знаком «минус». При возложении на систему отопления нагрева приточного воздуха, необходимое количество теплоты согласно [2, прил. Е]. В помещениях, в которых теплопоступления превалируют над теплопотерями, отопительные приборы не предусматриваются. Необходима понимать, что для расчета покрытия по методики Кулжинского применяется температура под слоем снега около –3 °С. Но покрытия метрополитена располагаться в крупных городах в основном под парковками, площадями, проезжими частями и вредом случаи под зелеными зонами, во всех этих случаях снеговой покров либо убирается, либо оттаивается реагентами. Поэтому применение температуры под снежным парковом для метрополитенов ошибочно и необходимо применять температуру наружного воздуха.

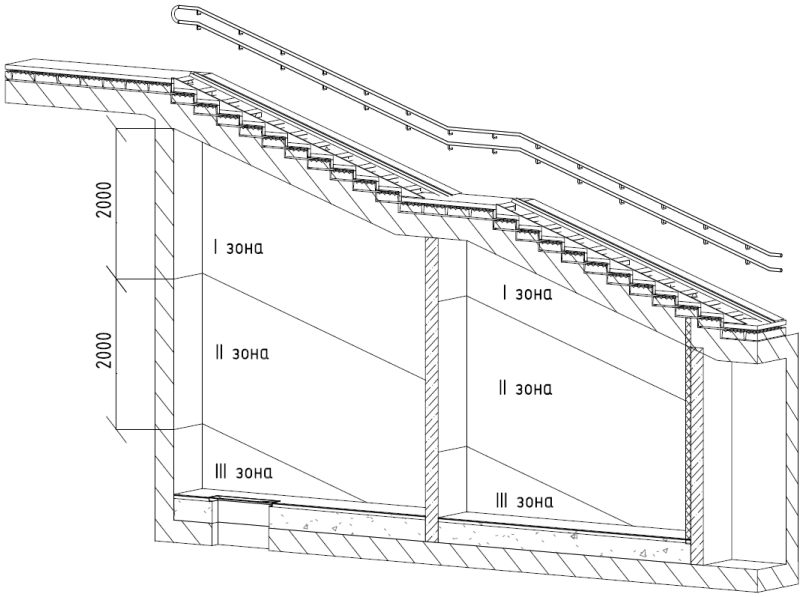

Рис. 2. Схема расположения расчетных зон в помещениях
под лестничным маршем

Выводы

Описав выше перечисленное можно сказать что методика Кулжинского верна для определения сопротивлений теплопередачи для о ограждающих контракций, граничащих с грунтом. Но подход к определению теплопотерь и граничных условий теплопередачи необходимо принимать по типу подземного сооружения. В отличии от методики Кулжинского нужно принимать температуры помещения по нормативным или расчетным данным, для повышения точности высчитывать тепловой баланс помещения. Так же необходимо устранить пробел в отсутствии нормативного сопротивления теплопередачи для стен и покрытия граничащих с гонтом.

Литература

1. Строительная теплотехника : СП 2.04.01-2020. – Взамен ТКП 45-2.04-43-2006 (02250) ; введ. 20.01.2021. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2021. – 77 с.

2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : СН 4.02.03-2019. – Взамен СНБ 4.02.01-03 ; введ. 16.12.2019. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2020. – 73 с.

3. Метрополитены : СН 3.03.05-2022. – Введ. 16.11.2020. – Минск: РУП Стройтехнорм, 2022. – 99 с.

4. Кулжинский, Ю. И. Определение теплопотерь через ограждающие конструкции подземных сооружений / Ю. И. Кулжинский. – М. : ВИА, 1960. – 54 с.

5. Внутренние санитарно-технические устройства: справочник проектировщика: в 3 ч. / редкол.: В. М. Спиридонов (гл. ред.) [и др.]. – М. : Стройиздат, 1992. – Ч. 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха / Б. В. Баркалов, Н. Н. Павлов, С. С. Амирджанов [и др.]. – 1992. – 145 с.

6. Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000. – Введ. 07.12.2000. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2007. – 40 с.

7. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность : СН 2.04.02-2020. – Введ. 12.11.2020. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2021. – 29 с.

8. Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов издание втрое, переработанное и дополненное / В. Я. Цодиков. – М. : НЕДРА, 1975. – 568 с.