

2. Investment casting and experimental testing of heat sinks designed by topology optimization / T. Lei [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127 – P. 396–412.

3. Zhou, T. Study of the Performance of a Novel Radiator with Three Inlets and One Outlet Based on Topology Optimization / T. Zhou, B. Chen, H. Liu // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, № 6. – P. 594.

4. Concurrent optimization of the internal flow channel, inlets, and outlets in forced convection heat sinks / J. Zhao [et al.] // Struct Multidisc Optim. – 2021. – Vol. 63, № 1. – P. 121–136.

5. Othmer, C. Implementation of a Continuous Adjoint for Topology Optimization of Ducted Flows / C. Othmer, E. de Villiers, H. Weller // 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. – Miami: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

6. Manuel, M. C. E. Optimal duct layout for HVAC using topology optimization / M. C. E. Manuel, P. T. Lin, M. Chang // Science and Technology for the Built Environment. – 2018. – Vol. 24, № 3. – P. 212–219.

7. Dühring, M. B. Acoustic design by topology optimization / M. B. Dühring, J. S. Jensen, O. Sigmund // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Vol. 317, № 3–5. – P. 557–575.

УДК 697.3.4

### **Теплопередача через ограждающие конструкции тоннельных сооружений метрополитенов**

Сизов В. Д.<sup>1</sup>, Кононов Д. А.<sup>1</sup>, Белениник О. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет,

<sup>2</sup> ОАО «Минскметропроект»

Минск, Республика Беларусь

*В работе рассмотрены основные понятия и уравнения теплопередачи через ограждающие конструкции тоннельных сооружений. Способы определения теплофизических характеристик грунтов и ограждающих конструкций, коэффициента теплоотдачи, определения температуры грунтов и определение постоянного теплового потока в грунт из тоннельных сооружений.*

При работе метрополитена тепло, выделяемое в тоннелях, ассимилируется вентиляционным воздухом и частично поступает через ограждающие конструкции тоннелей в окружающий грунт. Теплопередача в грунты происходит при нестационарном режиме, так как температурное поле грунтов

меняется во времени. Не стационарность теплового процесса обуславливается изменением теплосодержания ограждающих конструкций тоннеля и грунтов при изменении их температуры во времени и всегда связана с процессом нагрева или охлаждения.

Если в тоннеле появятся тепловыделения, то сразу же, между воздухом тоннеля и ограждающими его конструкциями, и грунтом возникнет процесс теплопередачи, сопровождающийся прогревом конструкции тоннеля и грунтов. Сначала будут нагреваться поверхностные слои, но постепенно процесс прогрева распространится в глубь грунта. Естественно, что при постоянной величине тепловыделений в тоннеле, а, следовательно, постоянном тепловом потоке, увеличение прогретой толщи грунта и его теплосодержания влечет за собой непрерывное повышение температуры воздуха в тоннеле. И наоборот, если стремиться поддерживать постоянной температуру воздуха в тоннеле, то в связи с увеличением во времени прогреваемой толщи грунта возникает необходимость соответствующего снижения во времени теплового потока в грунты и вследствие этого снижения тепловыделений в тоннелях.

Различают три вида теплопередачи, имеющие место также и в тоннелях метрополитена: излучение, конвекцию и теплопроводность (кондукцию). В соответствии с законом Стефана-Больцмана [7] количество тепла  $Q$ , излучаемого с  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела в течение  $1 \text{ ч}$ , определяется по формуле

$$Q = C_0 \left[ \frac{T}{100} \right]^4, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч},$$

для случая, когда одна поверхность со всех сторон окружена другой поверхностью, не имеющей входящих углов (2)

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left[ \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0} \right]} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 + \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \text{ кал/ч},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты излучения поверхностей,  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot (\text{К}/100)^4$ ;  $C_0 = 4,96$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot (\text{К}/100)^4$ ;  $F_1$  и  $F_2$  – значения поверхностей взаимно облучаемых тел,  $\text{м}^2$ ;  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры взаимно облучаемых поверхностей,  $\text{К}$ .

В тоннелях метрополитена теплопередача излучением происходит от более нагретых поверхностей периодически проходящего по тоннелю подвижного состава, расположенного в тоннелях оборудования, приборов

освещения, кабельных линий и других источников тепловыделений, расположенных на поверхности ограждающих конструкций тоннелей, и составляет незначительную величину (примерно 3–5 % суммарного теплового потока).

В тоннелях метрополитена теплопередача на поверхности ограждающих конструкций тоннелей от нагретого тепловыделениями воздуха осуществляется в основном конвекцией, составляющей примерно 95–97 % общего теплового потока на эти поверхности.

Количество тепла, передаваемого при конвективном теплообмене между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела, определяется по формуле [7]

$$Q = \alpha_k F(t_{B1} - t_{II}), \text{ ккал/ч,}$$

где  $F$  – поверхность твердого тела,  $\text{м}^2$ ;  $t_{B1}$  – температура жидкости или газа,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{II}$  – средняя по площади температура данной поверхности,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_k$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи конвекцией,  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Однако в теплотехнических расчетах с целью упрощения задачи принимается, что распространение тепла происходит только по законам теплопроводности. В тоннелях этим законам (при условии отсутствия движения грунтовых вод) подчиняется теплопередача от внутренней поверхности ограждающих их конструкций вглубь толщи грунта и обратно в процессе охлаждения прогретой толщи.

Можно получить дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного движения тепла, т. е. только в направлении одной из осей координат.

Интегрируя дифференциальное уравнение можно решить задачи, связанные с передачей тепла теплопроводностью при предварительном установлении крайних условий процессов. Краевые условия разделяются на временные и пространственные. Временные состоят в задании распределения температуры для момента времени  $z = 0$ . Пространственные крайние условия относятся к поверхностям, ограничивающим данную среду. Они разделяются на три рода. Краевое поверхностное условие I рода (наиболее простое и редко встречающееся) состоит в задании распределения температуры на поверхности, ограничивающей данную среду, и ее изменения во времени.

Краевое поверхностное условие II рода состоит в задании величины теплового потока через поверхность, ограничивающую данную среду, и его изменения во времени. Краевое поверхностное условие III рода состоит в за-

дании температуры среды (воздух или жидкость), окружающей поверхность, и законов теплообмена между поверхностью, окружающей средой и потоком тепла внутри тела. Искомой величиной является величина теплового потока. Это крайнее условие наиболее распространено в практике и является самым сложным при аналитическом решении задачи теплопередачи.

При стационарном тепловом режиме температурная кривая внутри стенки переходит в постоянную прямую с постоянным углом наклона в направлении потока тепла. Если выделить внутри такой стенки бесконечно тонкий слой толщиной  $dx$ , в котором соблюдается постоянная во времени разница температур  $dt$ , что соответствует стационарному тепловому потоку  $Q$  (проходящему через  $1 \text{ м}^2$  этого слоя в течение 1 ч), который согласно закону Фурье, выражается в виде

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx}.$$

Отношение  $dt/dx$  называется градиентом температуры ( $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ). Знак минус в правой части уравнения означает, что движение тепла происходит в направлении понижения температуры.

Для цилиндрической кольцевой стенки величина  $Q$  определяется по формуле

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr},$$

где  $dr$  – бесконечно тонкий кольцевой слой с радиусом  $r$ .

### **Теплофизическая характеристика грунтов и ограждающих конструкций тоннелей.**

Точность расчетов теплопередачи в значительной степени зависит от правильного определения теплофизических характеристик грунтов, окружающих тоннели, и их ограждающих конструкций.

Плотность  $\gamma$  – это масса  $1 \text{ м}^3$  материала ( $\text{кг}/\text{м}^3$  или  $\text{т}/\text{м}^3$ ). Удельный вес  $\gamma_{\text{уд}}$  – это отношение веса объема частиц материала к массе такого же объема воды.

Пористость материала  $P$  – это отношение объема пор в материале к объему всего материала. Плотность  $P_1$  материала является обратной величиной пористости. Она характеризует степень заполнения материала веществом. Влажность характеризуется наличием в материале свободной (химически несвязанной) воды. Теплопроводность – это способность материала в той

или иной степени проводить тепло. Теплоемкость – это свойство материалов поглощать тепло при повышении температуры. Температуропроводность материала, характеризуемая коэффициентом температуропроводности  $a$ , показывает поведение материала при прохождении через него потока тепла при нестационарном режиме, т. е. с какой скоростью происходит передача температуры от одной плоскости к другой или ее выравнивание.

**Определение температуры грунтов.** Для обеспечения наибольшей точности при теплотехнических расчетах теплопередачи в грунт следует пользоваться данными температуры грунтов, полученными на основании многолетних натуральных измерений. Амплитуда колебаний температуры грунтов на глубину до 4 м от поверхности для всех периодов года хорошо изучена на основании длительных наблюдений во многих городах СНГ [7].

Амплитуда годового колебания температуры поверхности земли  $A_0$ , зависящая главным образом от климата составленной Ю. И. Кулжинским [5].

Отношение амплитуды колебания температуры на поверхности земли  $A_0$  к амплитуде колебания температуры грунта  $A$  на глубине  $H$ , т. е. затухание амплитуды колебания температур при проникновении тепловой волны в массив грунта приближенно может быть определено по формуле

$$\frac{A_0}{A_H} = e^{H \sqrt{\frac{\pi \gamma c}{\lambda z}}},$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов ( $e = 2,72$ );  $H$  – глубина рассматриваемой точки от поверхности земли, м;  $\gamma$ ,  $c$  и  $\lambda$  – соответственно плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), теплоемкость ( $\text{ккал/кг}$ ) и коэффициент теплопроводности грунта ( $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$ );  $z$  – годовой период колебания температур ( $z = 8760$ ), ч.

Формула является приближенной.

**Определение коэффициента теплоотдачи.** Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , называемый коэффициентом теплоотдачи (тепловосприятя), характеризует условия сложного теплообмена, проходящего между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела.

Принимая для шахтных стволов (без учета степени шероховатости их стенок) отношение  $l/d$  в пределах 30–200 и  $(1/d_3)^{-0,054} = 0,8/0,77$  (в среднем 0,8), после преобразования формулы А. Ф. Воропаев [1] получил формулу для определения коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = 3,3 \frac{V_0^{0,8}}{d_3^{0,2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C},$$

где  $v_0$  – средняя скорость движения воздуха, м/с;  $d_s$  – эквивалентный диаметр ствола, м.

В метростроении отношение  $l/d$  чаще встречается в пределах 50–400.

На основании проведенных в последнее время исследований установлено значительное влияние шероховатости на увеличение коэффициента теплоотдачи.

Для практических расчетов из этой зависимости получена формула [7]:

$$\alpha = 2 \frac{\varepsilon_c v_0^{0.8} \gamma_{BO}^{0.8} l^{0.2}}{F^{0.2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С},$$

где  $\varepsilon_c$  – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности;  $\gamma_{BO}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  – периметр тоннеля, обтекаемого воздухом, м;  $F$  – площадь сечения тоннеля, м<sup>2</sup>.

Формула рекомендуется для определения коэффициента теплоотдачи,  $\alpha$  в тоннелях метрополитена. Преобразовывая ее относительно  $d_s$ , получим

$$\alpha = \frac{2,64 \varepsilon_c (\gamma_{BO} v_0)^{0.8}}{d_s^{0.2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}.$$

**Определение постоянного теплового потока в грунт из тоннельных сооружений.** Процесс нагревания и охлаждения конструкции тоннеля и грунта с физико-математической точки зрения можно рассматривать как нагревание и охлаждение при нестационарном тепловом режиме неограниченного по длине полого цилиндра, имеющего неограниченную по толщине стенку. Этот процесс подчиняется дифференциальным уравнениям теплопроводности Фурье, аналитическое решение которых является сложной математической задачей, приводящей к громоздким для практического применения формулам. С целью упрощения инженерных расчетов на практике применяются формулы, точность которых уступает строгим математическим решениям, но лежит в пределах точности, удовлетворяющей практическим требованиям. Эти формулы, как правило, представляют собой аналитические решения дифференциальных уравнений, в которые внесены упрощающие предпосылки. Такие формулы, рекомендуемые для определения теплопередачи в грунт при нестационарном тепловом режиме и постоянном тепловом потоке, известны в технической литературе. К их числу относятся формулы О. Е. Власова, С. И. Наумова, Б. А. Казанцева, Ю. И. Кулжинского, Ниссоле, К. Д. Смирнова, С. С. Вялова, А. Н. Щербаня, А. Ф. Воропаева, Б. Ф. Щкурко, Л. Р. Ингерсолл, М. Рубинэ и др. Все эти формулы исходят из начальных условий конвективного теплообмена, при котором температуры воздуха  $t_b$ , внутренней поверхности стенки  $t_c$  и грунта  $t_p$  равны между собой.

Так как при стационарном режиме количество тепла, переданного воздухом внутренней стенке, равно количеству тепла, прошедшего через стенку и переданного наружной стенке и равно количеству тепла, переданного внешней среде, то величину  $Q$ , приходящуюся на 1 м длины цилиндра, можно выразить в виде

$$\frac{Q}{l_l} = q_l = \alpha_1 \pi d_1 (t_{B1}'' - t_{C1}''), \text{ ккал/ч} \cdot \text{м},$$

$$\frac{Q}{l_l} = q_l = \frac{2\pi\lambda(t_{C1}'' - t_{C1}')}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ ккал/ч} \cdot \text{м},$$

$$\frac{Q}{l_l} = q_l = \alpha_2 \pi d_2 (t_{C2}'' - t_{B2}''), \text{ ккал/ч} \cdot \text{м},$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты пропорциональности (называемые коэффициентами теплоотдачи), характеризующие условия сложного теплообмена, проходящего между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела, т. е. между средами с разными агрегатными состояниями.

Тепловой поток для всей поверхности площадью  $F$  примет вид

$$Q_{sp} = F \frac{t_{B1}'' - t_{sp}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{2\lambda} \ln \left( 1 + \frac{2e_p}{d} \right)}, \text{ ккал/ч}.$$

Тогда количество тепла  $Q_{гр}$  поступающего в грунт через всю заданную поверхность теплопередачи, выразится в виде

$$Q_{sp} = FK_z (\sigma_{B1}'' - t_{sp}), \text{ ккал/ч}.$$

Вышеперечисленные методы определения теплопередачи через ограждающие конструкции метрополитена сводятся к простым уравнениям для стационарных процессов. Что уменьшает точность результатов, так как процесс теплопереноса через ограждающие конструкции метрополитена не стационарен процессом, на который влияет наружные атмосферные факторы, движение грунтовых вод, изменение теплофизических характеристик грунтов и ограждающих конструкций в связи с изменением их влажности и температуры в течение года.

## Литература

1. Воропаев, А. Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А. Ф. Воропаев. – Москва: АН СССР, 1950. – 282 с.
2. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 396 с.
3. Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов издание второе, переработанное и дополненное / В. Я. Цодиков. – М.: Недра, 1975. – 568 с.
4. Мачинский В. Д. Теплопередача в строительстве / В. Д. Мачинский. – М.: Госстройиздат, 1938. – 294 с.
5. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: Стройиздат, 1949. – 186 с.
6. Ингерсолл Л. Р. Теплопроводность, ее применение в технике и геологии / Л. Р. Ингерсолл, О. Зобель, А. К. Ингерсолл. – М.: Машгиз, 1959. – 260 с.
7. Смухнин, П. Н. Курс отопления и вентиляции / П. Н. Смухнин, Ю. И. Кулжинский, С. И. Пейсахович. – М.: ВИА им. В. В. Куйбышева, 1961. – 542 с.

УДК 697.3.4

### **Аналитические исследования процесса охлаждения и разогрева цементобетонных покрытий и теплотехническая оценка применения разогретых заполнителей при их укладке**

Сизов В. Д., Кононов Д. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В работе рассмотрены процессы охлаждения и разогрева цементобетонных покрытий. Произведена теплотехническая оценка применения разогретых заполнителей при их укладке.*

В соответствии с технологическим регламентом [3] в условиях производства работ при строительстве Минской кольцевой автодороги необходимо было укладывать монолитное покрытие из тяжелого бетона методом сращивания двух слоев – бетон нижнего слоя (толщиной 0,18 м) и бетон верхнего слоя (толщиной 0,06 м) в соответствии с [2].

В переходный период года бетонное покрытие может охлаждаться от начальной температуры 20 °С до 0 °С, а в летнее время бетонное покрытие может разогреваться от температуры 20 °С до 30 °С в облачную погоду, а с учетом солнечной инсоляции температура поверхности может достигать и больших значений.

Для анализа температурных градиентов при указанных тепловых воздействиях необходимо в первую очередь определить время выравнивания